

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**

А.Г Карманов

ФОТОГРАММЕТРИЯ

Санкт-Петербург

2012

Учебное пособие посвящено методам и способам обработки фотографических данных полученных посредством дистанционного зондирования, в том числе с использованием автоматизированных средств фотограмметрии, применением методов фотограмметрии для решения практических задач в рамках геоинформационных систем.

Учебное пособие рекомендовано для магистров направления подготовки 210700 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», магистерская программа 210700.68.02 «Геоинформационные системы».

Целью освоения дисциплины является получение студентами знаний о наземной фотограмметрии, аэрофотограмметрии, космической фотограмметрии, видах и методах фотограмметрии, принципиальных схемах построения изображений в целях проведения исследований и решения прикладных задач картографии, оптических основах центрального проектирования, принципах наблюдения и измерения снимков, моделях объектов, видах и методах фототопографической съёмки, пространственной фототриангуляции, геометрическом анализе космической информации, принципиальных схемах построения изображений, связи между геодезическими и фотограмметрическими координатами, разрешающей способности снимка, влиянии атмосферной рефракции.

В результате изучения дисциплины студенты должны обладать рядом специализированных умений, в том числе выполнения камеральных работ, проведения первичного экспресс анализа полученных аэрофотоснимков, анализа и оценивания координаты точки объекта и её изображение на снимках, определения элементов ориентирования снимка по опорным точкам, определения координат ориентиров и целей, определения параметров динамических процессов, студенты должны уметь составлять фотосхемы и определять их точность, обрабатывать данные ДЗЗ с беспилотных летательных аппаратов.

Также изучение дисциплины предполагает получение студентами навыков владения методами исключения деформации модели и учётом систематических ошибок, способами трансформирования снимков, технологическими схемами методов комбинированного создания карт, методами и средствами обработки информации полученной по результатам дистанционного зондирования Земли с применением автоматизированных систем, формированием требований к производству аэрофотосъёмочных работ для изготовления ортофотопланов, топографических карт, а также задач воздушного мониторинга, методами расчета и инструментального контроля качества информации полученной по результатам дистанционного зондирования земли.

Дисциплина нацелена на формирование общекультурных компетенций ОК.СЛ.1 (способен совершенствовать и повышать свой интеллектуальный и общекультурный уровень, воспринимать и генерировать новые идеи), ОК.СЛ.2 (способен к самостоятельному обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности), ОК.СЛ.4 (способен адаптироваться к новым ситуациям, переоценивать накопленный опыт, анализировать свои возможности), ОК.ОН.2 (способен применять современный инструментарий математического исследования, методы анализа и оптимизации процессов и систем), ОК.И.2 (способен использовать на практике умения и навыки в организации исследовательских и проектных работ, оформлять и представлять результаты исследований и защищать интеллектуальную собственность), профессиональных компетенций

ПК.НИ.1 (готов использовать современные достижения науки и передовые информационные технологии, методы проведения теоретических и экспериментальных исследований в научно-исследовательских работах в области техники и технологии области телекоммуникаций), ПК.НИ.2 (способен самостоятельно выполнять экспериментальные исследования для решения научно-исследовательских и производственных задач с использованием современной аппаратуры и методов исследования; способен участвовать в научных исследованиях в группе, ставить задачи исследования, выбирать методы экспериментальной работы), ПК.НИ.3 (способен разрабатывать и оптимизировать программы модельных и натурных экспериментальных исследований приборов и систем телекоммуникаций), ПК.НИ.4 (готов представлять результаты исследования в форме научно-технических отчетов, рефератов, публикаций и публичных обсуждений; интерпретировать и представлять результаты научных исследований, в том числе на иностранном языке; готов составлять практические рекомендации по использованию результатов научных исследований), ПК.ПК.1 (готов осваивать современные перспективные направления развития телекоммуникационных систем и сетей; способен реализовывать новые принципы построения телекоммуникационных систем различных типов, передачи и распределения информации в сетях связи), ПК.ПК.2 (способен к разработке моделей различных приборов и устройств систем телекоммуникаций и проверке их адекватности на практике; готов использовать пакеты прикладных программ анализа и синтеза телекоммуникационных систем и сетей), ПК.ПК.3 (готов осваивать принципы работы, технические характеристики и конструктивные особенности разрабатываемых и используемых сооружений, оборудования и средств связи; способен к проектированию, строительству, монтажу и эксплуатации технических средств телекоммуникации, направляющей среды передачи информации), профессиональных компетенций профиля подготовки ПК.НИ.ПП.1(способен разрабатывать и реализовывать эффективные алгоритмы обработки фотопланов, структурных моделей рельефов, моделировать геометрические сети и анализировать результаты дистанционного зондирования Земли), ПК.НИ.ПП.2(способен исследовать, разрабатывать, адаптировать и оптимизировать задачи на основе проведенного геоинформационного анализа), выпускника.

Оглавление

Раздел 1. «Основы фотограмметрии».....	7
Общие сведения о фотограмметрии.....	7
Предмет фотограмметрии, ее содержание и задачи.....	7
Фототопография и фототопографические съемки.....	8
Прикладная фотограмметрия.....	10
История развития фотограмметрии.....	11
Оптические и геометрические основы фотограмметрии.....	16
Построение изображения в фотокамере.....	16
Характеристика фотографических объективов.....	19
Характеристика фотографических материалов.....	22
Принцип получения цифровых снимков.....	26
Центральная проекция снимка и ортогональная проекция плана.....	32
Элементы центральной проекции и ее свойств.....	34
Получение снимков местности.....	39
Аналитические основы одиночного снимка.....	40
Системы координат точек местности и снимка.....	40
Элементы ориентирования снимка.....	43
Зависимость между пространственными и плоскими координатами точки снимка.....	44
Зависимость между координатами точки местности и снимка.....	48
Зависимость между координатами точки горизонтального и наклонного снимков.....	52
Масштаб снимка.....	53
Смещение точек и искажение направлений, вызванное наклоном снимка.....	56
Смещение точек и направлений на снимке, вызванное рельефом местности.....	58
Определение элементов внешнего ориентирования снимка.....	60
Технические средства аэро и наземной фотосъемки.....	62
Летательные аппараты.....	62
Аэрофотоаппараты.....	63
Вспомогательное аэрофотосъёмочное оборудование.	65
Оборудование для фотографирования с земли.....	72
Раздел 2. Теория пары снимков.....	75
Теория пары снимков.....	75
Стереоскопическая пара снимков и элементы ее ориентирования.....	75
Зависимость между координатами точки местности и координатами ее изображения на паре снимков.....	76
Элементы взаимного ориентирования пары снимков.....	81
Уравнение взаимного ориентирования пары снимков.....	84
Определение элементов взаимного ориентирования.....	87
Построение модели с преобразованием связей проектирующих лучей.....	92
Внешнее ориентирование модели	93

Двойная обратная пространственная фотограмметрическая засечка.....	97
Особенности теории наземной фотограмметрии.....	97
Основные виды наземной стереофотограмметрической съемки.....	99
Стереоскопическое зрение, измерение снимков и модели.....	101
Основы стереоскопического зрения.....	101
Стереоскопический эффект, простейшие стереоприборы.....	106
Особенности измерения цифровых снимков.....	111
Средства измерений.....	111
Принципы измерений.....	113
Механизм корреляции изображений.....	117
Внутреннее ориентирование снимка в системе координат цифрового изображения.....	118
Технологии фототопографических съемок.....	122
Основные технологические схемы.....	122
Стереотопографический метод АФС.....	123
Технологические схемы.....	123
Летносъёмочный процесс.....	125
Особенности цифрового трансформирования и составления фотоплана.....	129
Перспективное трансформирование.....	130
Составление фотоплана.....	135
Понятие о привязке снимков.....	137
Фототриангуляция.....	138
Основные понятия.....	138
Аналитическая маршрутная фототриангуляция.....	139
Понятие о блочной фототриангуляции.....	143
Деформация модели и точность построения фотограмметрической сети.....	143
Понятие о топографическом дешифрировании снимков.....	145
Технологии, основанные на стереообработке фотоснимков.....	146
Классификация универсальных аналоговых стереоприборов.....	146
Оптические универсальные аналоговые стереоприборы.....	148
Универсальные приборы механического типа.....	150
Составление планов на СПР.....	152
Ортофототрансформирование.....	162
Автоматизация обработки снимков на фотограмметрическом оборудовании.....	164
Понятие об универсальных стереоприборах аналитического типа.....	167
Понятие о топографическом дешифрировании снимков.....	169

Раздел 1. «Основы фотограмметрии»

Общие сведения о фотограмметрии

Предмет фотограмметрии, ее содержание и задачи

Фотограмметрия - наука, изучающая способы определения форм, размеров, пространственного положения и степени изменения во времени различных объектов, по результатам измерений их фотографических изображений.

Термин "фотограмметрия" происходит от греческих слов: *photos* – свет, *gramma* – запись, *metreo* – измерение. Следовательно, его дословный перевод - измерение светозаписи.

Предметы изучения фотограмметрии это геометрические и физические свойства снимков, способы их получения и использования для определения количественных и качественных характеристик сфотографированных объектов, а также приборы и программные продукты, применяемые в процессе обработки.

Характеристики объекта могут изучаться по его изображению на одиночном снимке или по паре перекрывающихся снимков, полученных из различных точек пространства.

Если при изучении объекта используются свойства одиночного снимка, то такой метод получения необходимой информации называют фотограмметрическим. Если же он изучается по паре перекрывающихся снимков, то метод называют стереофотограмметрическим.

В настоящее время в фотограмметрии выделяют три направления исследований. В первом изучаются и развиваются методы картографирования земной поверхности по снимкам. Второе связано с решением прикладных задач в различных областях науки и техники. В третьем развиваются технологии получения информации об объектах Земли, Луны и планет солнечной системы с помощью аппаратуры, установленной на космических летательных аппаратах. Задачи и методы последнего из указанных направлений существенно отличаются от первых двух, и далее детально не рассматриваются.

Основными достоинствами фотограмметрического и стереофотограмметрического методов являются:

- высокая точность результатов, так как снимки объектов получают прецизионными фотокамерами, а их обработку выполняют, как правило, строгими методами;
- высокая производительность, достигаемая благодаря тому, что измеряют не сами объекты, а их изображения. Это позволяет обеспечить автоматизацию процесса измерений и последующих вычислений;
- объективность и достоверность информации, возможность при необходимости повторения измерений;

- возможность получения в короткий срок информации о состоянии, как всего объекта, так и отдельных его частей;
- безопасность ведения работ, так как съемка объекта выполняется неконтактным (дистанционным) методом. Это имеет особое значение, когда объект недоступен или пребывание в его зоне опасно для здоровья человека.
- возможность изучения движущихся объектов и быстро протекающих процессов.

Наряду с отмеченными достоинствами рассматриваемые методы имеют и недостатки. К ним следует отнести зависимость фотографических съемок от метеоусловий и необходимость выполнения полевых геодезических работ с целью контроля всех технологических процессов. Поэтому только разумное их сочетание с другими методами получения информации может обеспечить решение поставленной задачи с минимальными затратами труда и средств.

Современная фотограмметрия как техническая наука тесно связана с науками физико-математического цикла, достижениями радиоэлектроники, вычислительной техники, приборостроения, фотографии. Она органически связана с геодезией, топографией и картографией.

На основе достижения физики и особенно оптики созданы современные объективы съемочных и обрабатывающих приборов.

Успехи в развитии электроники, радиоэлектроники, вычислительной техники и космической геодезии способствовали автоматизации процессов самолетовождения и управления полетами космических кораблей созданию сенсоров, для получения изображений в цифровом виде, а также приборов для определения положения снимков в момент фотографирования, автоматизации процессов обработки и хранения информации, которой обладают снимки.

Благодаря химии освоен выпуск черно-белых и цветных фотоматериалов. Математика широко применяется в разработке теории фотограмметрии при решении практических задач.

Методами, известными в астрономии и геодезии, снимки обеспечиваются опорными точками, необходимыми для создания съемочной сети с целью составления топографических карт и планов или решения прикладных задач.

При создании по фотоснимкам планов и карт и их оформлении используются достижениями картографии.

Фототопография и фототопографические съемки

Фототопография решает задачу создания топографических карт и планов и построения цифровых моделей местности с использованием материалов фотосъемки. Она является разделом фотограмметрии. Комплекс процессов, выполняемых для создания по снимкам топографических карт и планов, называется фототопографической съемкой.

В зависимости от технических средств, применяемых для фотографирования местности, различают два вида фототопографической

съемки: наземную фототопографическую, аэрофототопографическую, в горной местности их иногда комбинируют.

В наземной фототопографической съемке местность фотографируют фототеодолитом с точек земной поверхности. Её применяют, как правило, в высокогорной и горной, преимущественно открытой местности со сложными формами рельефа. На небольших участках она может быть применена как самостоятельный метод, а при картографировании значительных площадей – в сочетании с другими методами съемок. Ее, в частности, с успехом применяют при маркшейдерском обслуживании открытых горных работ.

Аэрофототопографическая съемка является основным видом при топографическом картировании в масштабах от 1: 100 000 до 1: 500. Фотографирование местности в этом случае производится аэрофотоаппаратом, установленным на самолете, вертолете или другом носителе. Основными методами создания карт и планов в этом виде съемки являются комбинированный и стереотопографический.

В комбинированном методе используются свойства, как одиночного снимка, так и пары. Он предполагает получение контурной части карты в камеральных условиях (в результате составления фотопланов или средствами стереоизмерений), а рельефа - по данным полевых геодезических измерений. Этот метод используется для съемки плоскоравнинных районов, когда рельеф местности плохо просматривается стереоскопически и не может быть достаточно точно отображен по снимкам.

Стереотопографический метод съемки является основным при картографировании местности. В нем используются свойства пары снимков, что позволяет в камеральных условиях получать не только контурную, но и высотную части карты. Этим методом создаются карты (планы) высокогорных, горных, холмистых, а иногда и равнинных районов.

Основными процессами аэрофототопографической съемки являются: летносъёмочный, топографо-геодезический и фотограмметрический.

В задачу летносъёмочного процесса входят воздушное фотографирование местности, регистрация показаний спецприборов, фиксирующих положение снимков в момент фотографирования, а также фотографическая обработка материалов съемки и изготовление фотоснимков (если снимки получены не цифровыми камерами).

В топографо-геодезический процесс следует включить определение геодезических координат точек местности, изобразившихся на снимках. Эти точки называют опознаками. Их число зависит от принятой технологии съемки и ее масштаба, от качества снимков и физико-географических условий района работ. В топографо-геодезический процесс входит и дешифрирование – опознавание объектов местности, изобразившихся на снимках и определение их характеристик. Различают полевое, камеральное и комбинированное дешифрирование. Чаще применяют комбинированное дешифрирование, когда в поле составляют снимки-эталоны с результатами опознавания наиболее характерных для данного района объектов. Они затем

используются в камеральных условиях для дешифрирования остальных снимков.

Фотограмметрический процесс состоит в сгущении опорного обоснования снимков с использованием данных полевых геодезических работ и показаний спецприборов, составлении плана или карты, которые затем оформляют и размножают, цифровых моделей местности и фотопланов.

При сочетании наземной фототопографической и аэрофототопографической съемок местность фотографируется дважды: фототеодолитом с наземных станций и аэрофотоаппаратом с летательного аппарата. По наземным снимкам сгущается опорная геодезическая сеть, а по аэроснимкам составляется топографическая карта. Этот вид фототопографической съемки требует наличия аппаратуры для производства наземной и воздушной фотосъемок и приборов для обработки наземных снимков и аэроснимков. На практике он применяется редко.

Прикладная фотограмметрия

Фотограмметрия применяется главным образом для составления топографических карт и планов. Однако в настоящее время она находит все более широкое применение при решении различных прикладных задач. Для какой бы цели не применялась фотограмметрия, основные принципы ее остаются теми же самыми. Фотограмметрическое оборудование, используемое, прежде всего, в картографических целях, можно применить и в других областях науки и техники.

В процессе решения нетопографических задач часто достаточно иметь топографический план с фотопланом, или фотодокументы пониженной точности, цифровую модель участка местности, построенную по измерениям снимков или только измеренные по снимкам координаты точек изучаемого объекта.

В нашей стране фотограмметрические методы применяют:

- Для изысканий и проектирования различного рода линейных сооружений (автомобильных и железных дорог, трубопроводов, линий электропередачи и т.д.). В этих случаях обычно составляют изыскательские планы, которые могут иметь меньшую точность и условную систему координат, фотосхему полосы местности и профиль местности, построенный по измерениям снимков;
- В строительстве при определении качества строительства, повышении надежности и долговечности промышленных и гражданских сооружений и т.д.;
- В геологоразведочных работах. Аэро и космические снимки позволяют по данным дешифрирования более рационально подойти к выбору территорий, перспективных для поиска и разведке полезных ископаемых, наметить точки для бурения скважин и определить их координаты;
- В геофизике для получения координат и высот заданных точек местности и определения топографических поправок в измеренные

- значения силы тяжести;
- В архитектуре при производстве обмеров, составлении планов фасадов, изготовлении объемных моделей, съемке и воспроизведении архитектурных памятников, изучении и измерении архитектурных композиций, скульптур и т.д.
 - В горном деле для съемки открытых горных разработок с составлением маркшейдерских планов карьеров, дражных участков, бульдозерных полигонов, складов готовой продукции и т.д.;
 - В географических исследованиях (изучение ледников, селей, оползней и др.);
 - При картировании дна и получении глубин шельфа, изучении морского волнения, определении скорости и направления течения в открытом море;
 - В медицине и хирургии для диагностики и лечения заболеваний отдельных органов человека, а также для обнаружения в организме посторонних предметов и опухолей;
 - В военном деле и т.д.

История развития фотограмметрии

Начало научных основ теории определения формы, размеров и положения объектов по их перспективным изображениям было положено еще в эпоху Возрождения. Работами Альберти (1511 г.), Дюрера (1525 г.), Дезарга (1636 г.) были заложены предпосылки для развития теории перспективы, позволившие швейцарскому математику И. Ламберту опубликовать в 1759 г. обобщающий труд «Свободная перспектива». Практическое применение перспективных рисунков, полученных камерой-обскурой, в топографии связано с именами М.А. Капеллера (1725 г.), М.В. Ломоносова (1764 г.), Ш.-Ф. Ботан-Бопре (1791 г.).

Важнейшим событием в истории фотограмметрии явилось изобретение фотографии (Ж.Н. Ньепс, Ж.М. Даггер и У. Тальбот, 1839 г.) и стереофотографии (Дюбоск, 1844 г. и И.Ф. Александровский, 1852 г.). Первые теоретические и практические разработки по использованию фотографического изображения для составления топографических карт принадлежат французскому офицеру Э. Лосседа (1849-1868 гг.). Дальнейшие совершенствования фотограмметрии в конце XIX в. связано с именами А. Майденбауера, В. Иордана, С. Финстервальдера (Германия), П. Паганини (Италия), Е. Девиля (Канада), Н.Ф. Виллера, Р.Ю. Тиле, П.И. Щурова (Россия).

Большой вклад в разработку теории и практику фотограмметрических работ, создание приборов внесли русские инженеры. Первые опытные работы по фототопографической съемке выполнены в России в 1891 г. Н.Ф. Виллером при изыскании Закавказской железной дороги. В 1897 г. Р.Ю. Тиле и П.И. Щуров применили фототеодолитную съемку на изысканиях Забайкальской и Маньчжурской железных дорог. К этому времени относится

публикация первых научных трудов по фотограмметрии С. Коппе (1889 г.), Е. Девиля (1895 г.), Г.Н. Шибуева и Н.Н. Веселовского (1899 г.).

Большое влияние на дальнейшее развитие фотограмметрии оказали трехтомный труд Р.Ю. Тиле "Фотография в современном развитии" (1908-1909 гг.) и первый учебник "Измерительная фотография и ее применение в воздухоплавании" (1907 г.), написанный В.Ф. Найденовым для слушателей Военно-инженерной академии. В учебнике были обобщены вопросы теоретической фотограмметрии и дано математическое обоснование способов графического трансформирования аэроснимков.

Одновременно с наземным фотографированием развивается фотографирование с воздушных носителей (шаров, аэростатов и т.д.). Первые фотографии с аэростатов были получены в 1858 г французом Ф. Надаром. В России началу аэрофотосъемочных работ положили поручик А.М. Кованько, выполнивший в 1886 г с воздушного шара аэрофотосъемку устья реки Невы с высот 800, 1200 и 1350 м, и полковник Н.А. Козлов, впервые в 1887 г выполнивший аэрофотосъемку на пленку.

Развитие авиации, точного приборостроения и оптики привело к дальнейшему совершенствованию методов фотограмметрии. Решающими в истории ее развития после изобретения фотографии явились открытие Штольцем в 1892 г. принципа измерительной марки, изобретение Е. Девиллом в 1895 г. стереоскопического прибора для составления карт по фотоснимкам и изобретение К. Пульфрихом в 1901 г. стереокомпаратора.

Стереоскопический принцип измерения стереопары устранил трудности связанные с отождествлением одинаковых точек на разных снимках и открыл новые возможности по совершенствованию их камеральной обработки.

В 1914 г. фирма К. Цейсса выпустила первый универсальный прибор, изобретенный в 1908 г. Э. Орелем (Австрия).

В России до 1917 г. фотограмметрия применялась в основном для военных целей. Создание отечественной фотограмметрической аппаратуры и приборов тормозилось из-за слабого развития оптико-механического производства.

Исключительно большое значение для развития геодезической науки и технического прогресса в России имел подписанный В.И. Лениным в 1919 г. декрет "Об учреждении высшего геодезического управления" (ВГУ), позже реорганизованного в Главное управление геодезии и картографии (ГУГК). ВГУ было образовано для изучения территории страны в топографическом отношении в целях поднятия и развития производительных сил, производства в общегосударственном масштабе геодезических работ и топографических съемок, создания и издания картографических материалов. Аэрофототопографическая съемка была признана наиболее эффективным методом решения этой грандиозной задачи.

Первый этап (1918-1929 гг.) характеризуется организацией фототопографической службы, подготовкой кадров и разработкой новой технологии создания карт. В 1919 г. в системе Военно-топографической

службы (ВТС) был создан первый аэрофототопографический отряд. В том же году открылась Высшая аэрофототопографическая школа Красного военно-воздушного флота. В 1921 г. в Московском (бывшем Межевом) геодезическом институте открывается аэрофотогеодезическое отделение, преобразованное в последующем в факультет, чем и было положено начало подготовки инженерных и научных кадров в области фотограмметрии.

В 1925 г. общества «Добролет» и «Укрвоздухпуть» создали производственные подразделения для аэрофотосъемки. С этого момента началось бурное развитие фототопографической службы.

В ВТС страны под руководством Н.М. Алексапольского был разработан комбинированный метод аэрофототопографической съемки, который с учетом свойств одиночного снимка позволил путем трансформирования получить контурную часть плана – фотоплан. Рельеф изображался в виде горизонталей на фотоплане непосредственно в поле с помощью мензульной съемки.

За рубежом для дальнейшего совершенствования лётносъёмочных процессов и процессов создания по аэроснимкам планов и карт с 1918 г. до 1923 г. были построены специализированные самолеты, созданы аэрофотоаппараты полного автоматического действия, сконструированы и построены фототрансформаторы автоматического или полуавтоматического действия.

В 1922 г. фирмой К.Цейсса была создана первая модель стереопланиграфа, при помощи которого по снимкам, используя принцип стереоскопического зрения, стало возможным составление плана с горизонталями. Приборы такого типа названы универсальными стереофотограмметрическими приборами, а способ создания планов при помощи этих приборов – универсальным способом стереофотограмметрической съемки.

Основные принципы взаимного ориентирования пары аэроснимков были введены в фотограмметрию С. Финстервальдером еще в 1899 г.

О. Грубер (Германия) предложил решить эту задачу с помощью оптико-механических устройств. Его аналитическое решение, предложенное в 1928 г. А.С. Скиридовым, получило развитие в трудах Н.Г. Келля, Г.П. Жукова, В. Романовского, М.Д. Коншина, Н.А. Урмаева, А.Н. Лобанова и др. и привело к разработке способов взаимного ориентирования снимков путем измерения поперечных параллаксов на приборах типа стереокомпаратор.

В 1928 г. в Москве создан Государственный институт геодезии, аэрофотосъемки и картографии (ныне Центральный научно-исследовательский институт геодезии, аэросъемки и картографии им. Ф.Н. Красовского). Его ученые внесли существенный вклад в развитие топографо-геодезического и картографического производств.

Во втором периоде (1930 – 1945 гг.) проводятся работы по совершенствованию комбинированного способа съемки и разработки дифференцированного способа создания карт по снимкам. Универсальный

способ из-за высокой стоимости стереопланиграфа и низкой производительности в то время для СССР был неприемлем.

В 1931 г. в Ленинграде под руководством академика А.Е. Ферсмана организуется научно-исследовательский институт аэросъемки, ученые которого успешно разрабатывали основные вопросы аэрофотографии, фотограмметрии и дешифрирования аэроснимков. В 1934 г. он переведен в Москву и вошел в состав ЦНИИГАиК.

Первыми весомыми результатами второго периода было создание М.М. Русиновым широкоугольного и сверхширокоугольного объективов, С.П. Шокиным и Г.Г. Гордоном – топографических аэрофотоаппаратов. В 1933 г. выпущен стереоавтограф Ф.В. Дробышева. В 1934-1938 гг. им созданы стереометры, что послужило основой для широкого внедрения в производство и дальнейшего усовершенствования метода дифференцированных процессов. В теоретических исследованиях по совершенствованию отдельных процессов фототопографической съемки активно участвовали Н.М. Алексапольский, Ф.В. Дробышев, В.Ф. Дейнеко, Г.П. Жуков, М.Д. Коншин, Г.В. Романовский.

Для картографирования страны с 1937 г. начинают широко применяться методы аэрофототопографической съемки, а к 1939 г. в системе ГУГК они стали основными способами топографических съемок. Широкое применение получила съемка дифференцированным способом.

Успехи отечественной фотограмметрии позволили приступить к съемкам обширной территории страны в масштабах 1: 100000, 1: 50000 и 1: 25000. К началу Великой Отечественной войны сплошное картографирование территории страны в мелких и средних масштабах в основном было выполнено.

В годы войны продолжались теоретические исследования в области фотограмметрии. Н.А. Урмаев завершил и опубликовал работу по теории фотограмметрии в векторном исчислении, а М.Д. Коншин разработал основные теоретические положения по обработке снимков с преобразованием связок проектирующих лучей.

Во время второй мировой войны фактически все имеющиеся средства фотограмметрического картографирования были подчинены решению сложной задачи создания огромного количества карт и фотодокументов для удовлетворения нужд войны.

После Великой Отечественной войны перед геодезией была поставлена задача завершения картографирования страны в масштабе 1: 100 000 и перехода к сплошному картографированию в масштабе 1: 25 000, а для отдельных районов - к съемкам в более крупных масштабах. В связи с этим потребовалось дальнейшее усовершенствование приборов и методов съемки. В 1950 г. на базе отечественной оптики был создан сверхширокоугольный многокамерный аэропроектор - мультиплекс (М.М. Русинов, Н.В. Викторов).

Наметившаяся тенденция применения приборов универсального типа тормозилась тем, что внедрение короткофокусных объективов нарушило допустимые соотношения между фокусными расстояниями съемочных камер

и проектирующих камер универсальных приборов. Чтобы устранить эту проблему, была предложена методика обработки снимков с преобразованными связками проектирующих лучей. (М.Д. Коншин, Г.В. Романовский, Ф.В. Дробышев, А.Н. Лобанов, Г.П. Жуков, В.Я. Финковский и др.) На ее основе созданы отечественные универсальные приборы: стереопроектор Г.В. Романовского и стереограф Ф.В. Дробышева. Конструкция этих приборов упростилась благодаря тому, что аэрофотоснимки в них располагались в одной горизонтальной плоскости. В отличие от зарубежных универсальных приборов они позволили обрабатывать аэрофотоснимки с любым полем изображения, могли быть установлены без специального фундамента, требовали меньшей рабочей площади и стоили намного дешевле зарубежных аналогов. Одновременно с созданием универсальных приборов в практику аэрофотосъемки были внедрены более надежные способы регистрации отдельных элементов внешнего ориентирования снимков (статоскопы, радиовысотомеры, гиросtabilизирующие установки, радиогеодезические системы) и разработаны способы их использования в процессе построения и уравнивания сетей пространственной фототриангуляции (Г.В. Романовский, И.Д. Каргополов, В.И. Павлов и др.). Серьезное внимание уделялось развитию аналитических методов на основе применения высокоточных стереокомпараторов и ЭВМ (А.Н. Лобанов, М.Д. Коншин, И.Т. Антипов, Ф.Ф. Лысенко, В.Б. Дубиновский, Р.П. Овсянников, В.А. Полякова, И.И. Финаревский, С.Г. Могильный и др.). Разрабатывается технология крупномасштабных съемок (Н.А. Соколова, К.Н. Герценова и др.). Совершенствуется аэросъемочная оптика (Д.С. Волосов, М.М. Русинов), создаются новые приборы для дифференциального трансформирования (Е.И. Колонтаров, Г.П. Жуков, Ф.В. Дробышев и др.). Появляются автоматизированные стереокомпараторы (М.Д. Коншин, В.Д. Дервиз, В.И. Кораблев и др.), многоцелевой аналитический автоматизированный прибор стереоанаграф (Г.А. Зотов, В.Е. Копылов, А. В. Сорока и др.) и системы для автоматизации процессов фотограмметрической обработки снимков (А.Н. Лобанов, И.Г. Журкин, А.А. Чигирев и др.).

Большой вклад в развитие теории и практики фотограмметрии внесли труды В.Я. Бобира, Г.Б. Гонина, И.Ф. Куштина, Б.К. Малявского, Р.П. Овсянникова, В. И. Павлова, Н.С. Рамм, Б.Н. Родионова, М.С. Урмаева, Ю.С. Тюфлина.

Активно велись исследования и по разработке методов прикладной фотограмметрии: в горном деле для решения маркшейдерских задач (Л.Н. Келль, С.В. Чистяков, А.П. Трунин, И.И. Финаревский, Г.В. Забродин, С.Г. Могильный, Л.В. Фомичев, А.В. Стрельников и др.); в геологии и геофизике для определения координат точек и определения топографических поправок в измеренные значения силы тяжести (В.М. Воевода, В.И. Павлов, А.Г. Прихода, Ю.А. Жилин, А.А. Чигирев и др.); в архитектуре при инвентаризации и восстановлении памятников истории и культуры; в

промышленном и гражданском строительстве (М.И. Буров, А.С. Валуев, Д.П. Кораблев, Г.А. Лысков, В.М. Сердюков и др.); при изысканиях и проектировании трасс линейных сооружений (С.А. Бутлер, Б.К. Малявский, Э.Н. Норман, В.И. Павлов и др.); при определении глубин, изучении волнения, течений (В.Г. Зданович, И.А. Черкасов, Ю.Д. Шариков, Н.С. Рамм, Д.А. Янутш и др.); в сельском хозяйстве (В.Ф. Дейнеко, В.Д. Ильинский, И.В. Байков).

В последней четверти 20 века произошел качественный рывок в развитии электронно-вычислительной техники. В 1970 году создана технология получения цифровых снимков, появились довольно дешевые быстродействующие ПЭВМ с большим объемом памяти, обеспеченные качественным периферийным оборудованием (графопостроители, сканеры, принтеры и т.д.). Интенсивно разрабатывалось программное обеспечение, среди которого следует отметить и специализированные фотограмметрические пакеты. Все это привело к тому, что традиционные технологии составления карт по снимкам стали вытесняться, а на их смену приходят цифровые методы. Положительные результаты достигнуты и в нашей стране. Среди разработок следует отметить отечественные программные продукты PHOTOMOD, Талку и ЦФС.

Появились спутниковые методы позиционирования, что обеспечило аэронавигацию и получение координат точек фотографирования с высокой точностью. Это существенно сокращает объем полевых работ по геопривязке аэрофотоснимков.

Но успешное совершенствование фотограмметрических технологий возможно лишь на базе совместного использования материалов фотосъемки, спутниковой геодезии и автоматизированных систем обработки информации.

Оптические и геометрические основы фотограмметрии

Построение изображения в фотокамере

Для фотограмметрической съемки местности или исследуемых объектов применяются оптические системы – фотокамеры. Их очень часто называют метрическими камерами, так как по полученным с их помощью снимкам можно определять фотокоординаты изобразившихся на них точек (предусмотрена возможность введения системы прямоугольных координат в плоскости снимка). При этом искажение изображения на снимке сведено к минимуму. Обычные любительские фотоаппараты такими свойствами не обладают, так как для них главное - художественное качество полученных при фотографировании изображений.

Фотокамеры, используемые для фотографирования местности с летательного аппарата, называются аэрофотоаппаратами (или АФА) а, для фотографирования ее с точек земной поверхности - фототеодолитами.

Изображение в фотокамере строится на плоскости (пленке или пластинке со светочувствительным слоем, или ПЗС матрице) с помощью объектива, представляющего собой сложную оптическую систему

собирающих и рассеивающих линз, центры кривизны сферических поверхностей которых расположены на одной прямой линии, называемой *главной оптической осью*.

Рассмотрим особенности построения изображения объекта идеальным объективом. Они основаны на следующих законах геометрической оптики:

- прямолинейности распространения световых лучей в однородной среде;
- независимости распространения отдельных световых лучей и пучков;
- обратимости лучей света;
- отражении и преломлении световых лучей на границе двух сред.

Законы геометрической оптики позволяют сложную оптическую систему идеального объектива заменить упрощенной моделью (линзой), сечение которой плоскостью, проходящей через главную оптическую ось, показано на рис. 1.

На нем: R_1 и R_2 – передняя и задняя поверхности объектива; S_1 и S_2 – его передняя и задняя узловые точки; F_1 и F_2 – передний и задний главные фокусы; H_1 и H_2 – главные плоскости объектива (они проходят через точки S_1 и S_2 перпендикулярно главной оптической оси).

Передняя узловая точка S_1 относится к пространству предметов местности и является точкой фотографирования. Задняя узловая точка S_2 относится к пространству изображения и является центром проекции. Узловые точки обладают тем свойством, что любой луч, вошедший в переднюю узловую точку, выйдя из задней узловой точки, не меняет направления. Такие лучи называются центральными.

Главным фокусом объектива (линзы) называется точка схода лучей идущих от бесконечно удаленного предмета, параллельно главной оптической оси. Их два. Плоскости, проходящие через главные фокусы перпендикулярно к главной оптической оси, называются фокальными плоскостями.

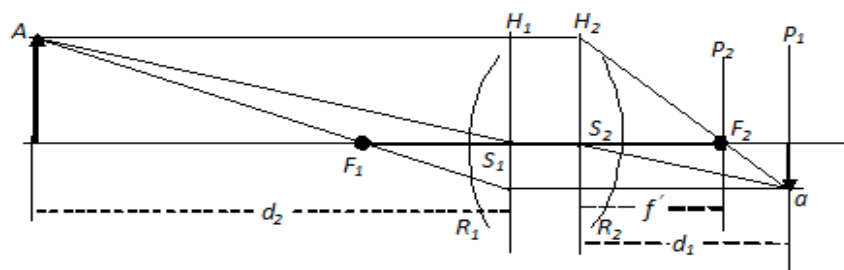


Рисунок . Построение изображения

Изображение любой точки, например, A , фотографируемого объекта местности строится следующим образом. Луч идущий параллельно главной оптической оси, преломляется на главной задней плоскости H_2 и проходит через задний фокус F_2 . Луч, проходящий через передний фокус F_1 , после преломления на передней главной плоскости H_1 пойдет параллельно

оптической оси. В соответствии с законами геометрической оптики центральный луч AS входит в переднюю узловую точку S_1 под углом α к оптической оси и выходит из задней узловой точки S_2 под тем же углом к ней. В результате таких построений все три луча пересекутся в точке a на плоскости P_1 . При этом для точек A и a будет выполняться условие оптического сопряжения

$$\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} = \frac{1}{f'} \quad (1)$$

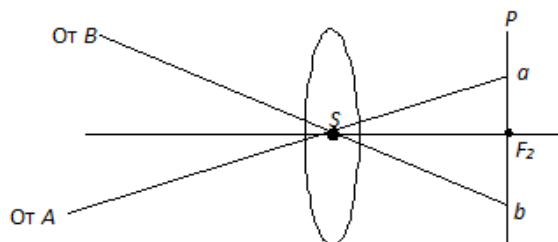
где d_1 – расстояние от плоскости H_2 до плоскости изображения P_1 ; d_2 – расстояние от плоскости H_1 до точки фотографируемого объекта; f' – фокусное расстояние объектива (рис. 1).

Говорят, что объектив, изображенный на рисунке строит действительное, уменьшенное и перевернутое (обратное) изображение рассматриваемого объекта.

Для точки расположенной ближе или дальше (т.е. d_2 другое), условие (1) не выполняется, поэтому ее изображение в плоскости P_1 будет иметь вид размытого кружка. Но если его диаметр $\delta \leq 0,02\text{мм}$, глаз воспринимает изображение как четкую точку.

При фотографировании в целях картографирования, когда расстояние d_1 значительно меньше расстояния d_2 (то есть можно считать, что d_2 равно бесконечности) $d_1 = f'$, все точки фотографируемого объекта достаточно резко изображаются на плоскости P_2 (главной фокальной плоскости), которая расположена перпендикулярно оптической оси и проходит через главный задний фокус F_2 . По этой причине в АФА и фототеодолитах плоскость изображения P , как правило, располагается вблизи главного фокуса объектива F_2 на расстоянии чуть меньше фокусного. Смещение плоскости P_2 в сторону объектива необходимо с целью улучшения резкости изображения на краях поля изображения, но за счет некоторого ухудшения его в центре. Величина этого смещения выражается долями миллиметра.

Плоскость P , в которой помещается светочувствительный материал (фотопленка или фотопластинка), называют плоскостью изображения. Расстояние от задней узловой точки объектива S_2 до плоскости изображения P называется фокусным расстоянием фотокамеры и обозначается буквой f .



Рисунок

Плоскость изображения P называют плоскостью снимка, а само изображение – снимком. Центральные лучи AS_1 и BS_1 принято называть проектирующими лучами, так как они проектируют точки объекта на снимок. Поскольку расстояние между узловыми точками мало, можно считать, что они совпадают, и рассматривать одну точку S (рис. 2). Называют ее центром проекции. Таким образом, изображение на снимке строится проектирующими лучами, проходящими через общий центр проекции, поэтому можно считать, что изображение на снимке строится по законам центральной проекции (снимок – центральная проекция сфотографированного объекта).

Совокупность центральных проектирующих лучей точек фотографируемого объекта образует две связки: переднюю (входящие лучи) с вершиной в передней узловой точке объектива и заднюю (выходящие лучи) с вершиной в задней узловой точке объектива. Так как в идеальном случае каждый выходящий центральный луч параллелен соответствующему входящему лучу, то обе связки можно считать совершенно одинаковыми (конгруэнтными).

Характеристика фотографических объективов.

Фотографические объективы характеризуются фокусным расстоянием, относительным отверстием, глубиной резкости, углами поля зрения и изображения, разрешающей способностью и аберрациями.

Понятие фокусного расстояния объектива дано выше. Его обычно определяют на специальном приборе, называемом оптической скамьей.

Относительное отверстие характеризует количество света, которое может проходить через объектив, или способность объектива передавать изображение на фотопленку или фотопластинку с определенной степенью яркости. Величина относительного отверстия зависит от диаметра d входного зрачка (действующего отверстия) объектива и его фокусного расстояния f' и находится из выражения

$$\frac{1}{k} = \frac{d}{f'} = \frac{1}{f'/d} \quad (2)$$

$$d = 4 \text{ см}$$

Например, при $f' = 8$ см относительное отверстие равно отношению 1:2.

Способность объектива давать изображение большей или меньшей яркости (т.е. создавать большую или меньшую освещенность светочувствительного слоя) называется светосилой. Светосила объектива прямо пропорциональна квадрату диаметра его отверстия и обратно пропорциональна квадрату фокусного расстояния.

$$E = d^2 / f'^2 = 1 / k^2 \quad (3)$$

При сравнении светосилы объективов необходимо сопоставлять не относительные отверстия, а их квадраты. Пусть первый объектив имеет

относительное отверстие $1:k_1=1:2$, а второй – $1:k_2=1:4$, тогда

$$E_1/E_2 = 1/k_1^2 : 1/k_2^2 = 4$$

То есть светосила первого объектив в четыре раза выше. Следовательно, при фотографировании в одних и тех же условиях выдержка для первого объектива будет в 4 раза меньше, чем для второго.

Величина относительного отверстия объектива устанавливается с помощью диафрагмы. Диафрагма состоит из тонких серповидных металлических лепестков. При вращении специального кольца или рычажка, имеющегося на оправе объектива, лепестки уменьшают или увеличивают входное отверстие объектива. Указатель установки диафрагмы, нанесенный на кольцо или рычажке, передвигается вдоль шкалы диафрагмы. Деления шкалы градуируются так, чтобы каждое из них требовало увеличения или уменьшения выдержки вдвое по сравнению с предыдущим, например 4, 5.6, 8, 11 и т.д.

Глубиной резкости (глубиной изображения) называется способность объектива передавать одинаково резко изображения предметов, находящихся на различных от него расстояниях. Глубина резкости тем больше, чем меньше фокусное расстояние, больше расстояние от объектива до снимаемого предмета и чем меньше относительное отверстие.

Если навести фотокамеру, в которой установлен объектив с малым фокусным расстоянием, например, 8-10 мм на удаленный предмет, то на матовом стекле получится изображение круга с различной резкостью и яркостью. В центральной части круга изображение имеет наибольшую резкость с равномерным распределением освещения. Далее резкость и яркость изображения уменьшается и на некотором расстоянии от центра круга совершенно исчезает. Полученное изображение называется полем зрения объектива. Угол, образованный лучами, соединяющими противоположные по диаметру точки окружности поля зрения и заднюю узловую точку объектива, носит название углол поля зрения (углол зрения). Угол поля зрения зависит от конструкции объектива, а не от фокусного расстояния. Центральная, наиболее резкая часть изображения называется полем изображения, а угол 2α – углом поля изображения (углом изображения). Величина поля изображения определяет формат кадра фотокамеры и, соответственно, формат снимка, который не должен превышать прямоугольника, вписанного в поле изображения. У конструкций современных объективов поле изображения весьма близко к полю зрения.

Угол изображения связан с фокусным расстоянием f' и диагональю кадра соотношением:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\sqrt{l_x^2 + l_y^2}}{f'} \quad (4)$$

где l_x и l_y – размеры сторон снимка, вписываемого в поле изображения.

В зависимости от величины угла изображения различают объективы узкоугольные ($20^\circ - 45^\circ$), нормальноугольные ($45^\circ - 75^\circ$), широкоугольные ($75^\circ - 100^\circ$) и сверхширокоугольные (более 100°).

Изменение освещенности в поле зрения при равномерном освещении объекта может быть приближенно охарактеризовано уравнением:

$$E = E_0 \cos^4 \beta \quad (5)$$

где E_0 – освещенность в центре поля зрения; β – угол между направлением луча и главной оптической осью.

Снижение освещенности, как видно из уравнения (5), идет от центра к краям. В нормальноугольных объективах снижение освещенности мало заметно, в сверхширокоугольных – оно значительно. Для получения равномерной освещенности перед объективом устанавливают затемнитель – нейтральный светофильтр с постепенно изменяющейся оптической плотностью, который пропускает меньше света в центре и больше к краям.

Разрешающая способность объектива характеризует его возможность воспроизводить отдельно в оптическом изображении мелкие объекты. Она выражается самым большим числом линий на 1 мм, отдельно передаваемых объективом, причём ширина линий и промежутки между ними должны быть одинаковы. В оптике указывается общее число черных и белых штрихов, а в аэрофотографии – число пар штрихов.

Обычно в паспортах, характеризующих объективы, записывают величину разрешающей способности, полученную путем фотографирования специальной миры, содержащей группы черных и белых штрихов, причем в каждой группе ширина тех и других линий постоянна. В этом случае получают разрешающую способность системы (объектив + светочувствительный слой), однако ее можно принять за разрешающую способность объектива, так как она в 3–4 раза меньше разрешающей способности используемого при фотографировании миры светочувствительного материала.

Разрешающая способность оптической системы современных отечественных топографических аэрофотоаппаратов в центре кадра составляют 30 – 40 лин/мм (мм^{-1}), на краю кадра – 10 – 15 мм^{-1} . Разрешающая способность является важной характеристикой, однако, она недостаточна для полной оценки качества изображения. Для восприятия фотографического

изображения большое значение имеет контраст объектов. Способности фотографической системы передавать контрасты объектов в зависимости от их размеров на снимке оцениваются контрастно-частотными характеристиками (КЧХ). КЧХ фотографического изображения – функция, которая характеризует зависимость между частотой штрихов и контрастом их изображения. Для определения КЧХ обычно используют миры с синусоидальным распределением плотности и специальные оптические скамьи, позволяющие построить графики КЧХ системы для различных участков поля зрения. По графикам определяется разрешающая способность как предельное значение частоты, при которой еще различаются отдельные штрихи.

Каждому объективу присущи оптические недостатки: сферическая aberrация, кома, хроматическая aberrация, дисторсия, астигматизм, кривизна поля зрения.

Фотографические объективы в зависимости от того, в какой степени устранены в них различные искажения (aberrация), делятся на перископы, апланаты и анастигматы.

Перископ представляет собой объектив, составленный из двух простых линз с диафрагмой между ними. Он принадлежит к числу объективов с большими остаточными aberrациями. Для получения резкого изображения перископы требуют значительного диафрагмирования.

Апланат является более качественным объективом. Основным его недостатком является астигматизм и кривизна поля изображения, вследствие чего снимки при полном отверстии объектива получаются резкими только в центральной части.

Анастигмат является самым совершенным типом объективов, практически свободным от всех оптических недостатков. Он состоит из комбинации линз различных по форме и составу стекла и при полном отверстии дает изображение, резкое по всей площади снимка. Они и получили наиболее широкое применение.

Объективы, в которых дисторсия сведена к минимуму, называются ортоскопическими. Такие объективы правильно передают геометрические формы изображаемых ими предметов. Эти качества позволили использовать их в аэрофототопографических, наземных и репродукционных камерах.

Характеристика фотографических материалов.

Фотографические материалы (фотоматериалы) классифицируют:

- по назначению (аэрофотопленки, фототехнические пленки и др.);
- по цвету получаемого фотографического изображения (черно-белые, спектрально-красные и цветные);
- по строению (фотопленки, фотопластинки, фотобумага).

Все фотоматериалы имеют подложку (основу) и светочувствительный или эмульсионный слой.

В аэрофотографии применяются подложки из прозрачных (триацетатных или лавсановых) пленок. При фототеодолитных съемках

подложкой используемых фотоматериалов обычно служат тонкие стеклянные пластинки.

Светочувствительный слой фотографических материалов представляет собой тонкую прозрачную пленку, большей частью желатиновую, содержащую во взвешенном состоянии галоидные соли серебра (бромистые, йодистые и хлористые) в виде отдельных кристалликов-зерен. Под воздействием света серебро освобождается, что и приводит к почернению эмульсионного слоя, тем большему, чем интенсивнее оно было. С помощью органических красителей (сенситизаторов) регулируют спектральную чувствительность эмульсии.

В аэрофотосъемочных работах применяются фотопленки: черно-белая панхроматическая, изопанхроматическая и инфрахроматическая; цветные спектрзональные для условной цветопередачи (спектрзональные); цветные для натурального воспроизведения объектов местности. При фототеодолитной съемке применяют изоортохроматические или панхроматические пластинки.

Цветные и спектрзональные пленки отличаются от черно-белых строением эмульсии. У цветных пленок эмульсия состоит из трех светочувствительных слоев (рис 3): верхнего, несенсибилизированного, чувствительного только к синим лучам; среднего, обладающего наибольшей чувствительностью к зеленым лучам; нижнего, имеющего максимальную чувствительность к красной области спектра. Между первым и вторым слоями эмульсии размещен желтый фильтровый слой. Он необходим для исключения влияния синих лучей на нижние слои.

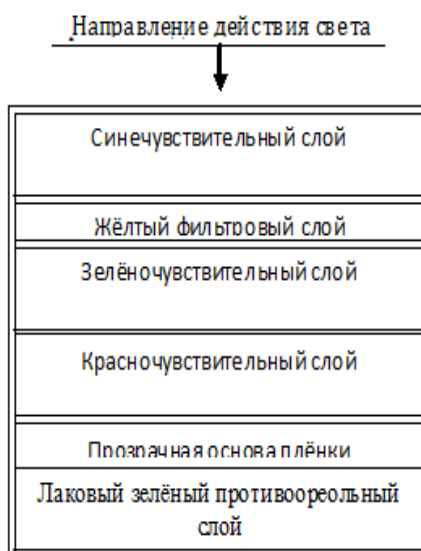


Рисунок . Схема построения цветной трехслойной пленки

На обратной стороне основы нанесен противоореольный слой. Окраска его так же, как и фильтрового слоя, уничтожается при фотохимической обработке. В процессе обработки, кроме того, все эмульсионные слои окрашиваются в цвета, дополнительные к цветам лучей, действовавших на

них. Следовательно, правильная цветопередача изображения может быть получена только при позитивной печати с цветного негатива на цветную фотобумагу или диапозитивную пленку.

Спектрональная пленка в отличие от цветной содержит эмульсию, состоящую из двух слоев, как правило, инфрахроматического и панхроматического. Цветопередача на этой пленке искажена, но она позволяет получать многие детали изображения, теряющиеся на черно-белой и цветной аэропленках.

Для правильного использования фотографических материалов необходимо знать их фотографические характеристики: светочувствительность, контрастность, фотографическую широту, вуаль, цветоточувствительность, разрешающую способность и др.

Определяются они по данным сенситометрических испытаний фотоматериала. Сенситометрия – раздел фотографической науки, посвященный учению об измерении фотографических свойств светочувствительных слоев. Сущность испытаний в том, что различным участкам фотоматериала, помещенного в прибор сенситометр, сообщаются различные закономерно изменяющиеся количества света H (свет пропускается через ступенчатый клин постепенно меняющейся оптической плотности). Затем экспонированный материал в определенных условиях проявляется, фиксируется, промывается и сушится. Такой негатив, состоящий из полей различной плотности, называется сенситограммой. (Например, $1/10$ прозрачность, 10 – непрозрачность, ее десятичный логарифм $= 1$, это плотность D). Далее на специальном приборе – денситометре измеряются оптические плотности D . Результаты измерений наносят на график, по оси

абсцисс которого отложены логарифмы экспозиций $\lg H$, а по оси ординат – оптические плотности D . Графическое отображение зависимости D от $\lg H$ называется характеристической кривой, типичный вид которой показан на рис. 4.

Различаются следующие участки характеристической кривой. Участок от точки a до точки b , на которой оптическая плотность остается постоянной, несмотря на увеличение экспозиции; это почернение, не зависящее от экспозиции, называется вуалью. Участок характеристической кривой от точки b до точки c называется областью недодержек. Минимальное почернение от точки b , едва отличимое от вуали и соответствующее низшей точке области недодержек, называется порогом почернения. Участок bc характеризуется тем, что равным приращениям логарифма экспозиций соответствует неравные между собой и притом постепенно возрастающие приращения оптической плотности. После этого участка следует область, где

плотность возрастает равномерно, т.е. увеличению $\lg H$ на определенную величину соответствует увеличение плотности на одну и ту же величину; этот участок представляет прямую линию и называется областью правильных, или нормальных экспозиций. Далее скорость нарастания

оптической плотности уменьшается и в точке ∂ делается равной нулю: этот участок кривой направлен выпуклостью вверх и называется областью передержек.

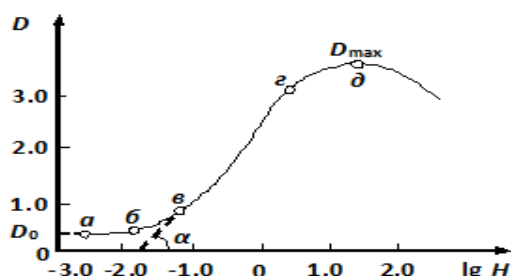


Рисунок . Характеристическая кривая

Точка $D_{\max}$ соответствует максимальной оптической плотности, которая получается на данном фотоматериале при данных условиях проявления. При еще больших экспозициях получают меньшие плотности, т.е. кривая идет вниз. Эта часть кривой называется областью соляризации.

Характеристическая кривая позволяет определить светочувствительность, коэффициент контрастности и фотографическую широту. Величина вуали, которая также представляет важную характеристику, определяется посредством измерения неэкспонированного участка сенситограммы.

Светочувствительность S – величина, обратно пропорциональная экспозиции, вызывающей после фотообработки заданную оптическую плотность D .

Контрастность – способность эмульсии пленки передавать различие в яркости отдельных частей снимаемых объектов: характеризуется коэффициентом контрастности γ . Он определяется тангенсом угла наклона между направлением прямолинейного участка характеристической кривой и осью абсцисс:

$$\gamma = \operatorname{tg} \alpha = \frac{D_r - D_b}{\lg H_r - \lg H_b} \quad (6)$$

Коэффициент зависит и от времени проявления. Наибольшая величина γ , достигаемая при данных условиях проявления, называется максимальным коэффициентом контрастности $\gamma_{\max}$.

Уменьшение величины γ после достижения $\gamma_{\max}$ связано с ростом вуали. материалы подразделяются на «мягкие» ($\gamma \leq 0,8$), «нормальные» ($0,8 \leq \gamma \leq 1,4$), «контрастные» ($1,5 \leq \gamma \leq 1,9$), «особоконтрастные» ($\gamma \geq 2,0$).

При съемке контрастных объектов используют мягкие фотоматериалы, для сверхконтрастных объектов – нормальные, а для малоконтрастных – контрастные и оособоконтрастные.

Фотографическая широта L фотопленки есть разность десятичных логарифмов экспозиций начала и конца прямолинейного участка характеристической кривой т.е.

$$L = \lg H_{\text{в}} - \lg H_{\text{г}} \quad (7)$$

Она определяет диапазон количества света, под воздействием которого получается нормальный негатив.

Величина вуали характеризует степень почернения фотоматериала, не подвергавшегося действию света. Для фотопленок она должна находиться в пределах 0,2–0,3. Цветочувствительность (спектральная чувствительность) фотопленки – чувствительность эмульсии к определенным участкам спектра и ее способность передавать цвета снимаемых объектов с различной степенью почернения.

Разрешающая способность R - число раздельно фотографически воспроизводимых на отрезке в 1 мм черно-белых штрихов равной ширины. Параметр R не полностью характеризует возможность получения фотографического изображения малоразмерных объектов различной яркости, но пока еще является общепринятым критерием для оценки фотографических приемников в этом отношении.

Принцип получения цифровых снимков

В настоящее время цифровые изображения (снимки) в основном получают либо при фотографировании объектов цифровыми камерами, либо путем сканирования их фотографических изображений.

И в том и в другом случаях изображение, сформированное посредством объектива, (Рис 5) попадает не на пленку, а на светочувствительный сенсор (матрицу). Свет улавливается множеством крошечных элементов сенсора (пикселей), каждый из которых формирует электрический заряд, в соответствии с количеством попавшего на него света, а затем заряд преобразуется в код и запоминается в цифровой форме. Pixel от англ. picture element - элемент изображения.

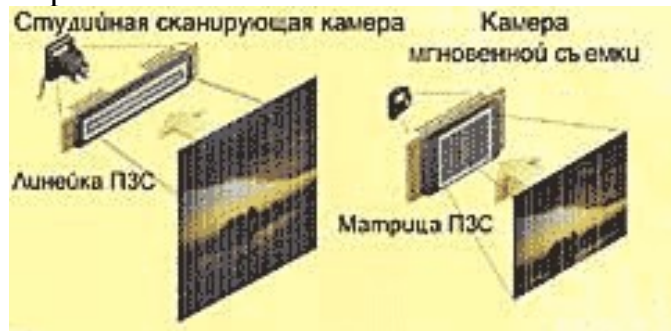


Рис. 5

В производстве сенсоров применяются две технологии: ПЗС (прибор с зарядовой связью, английский вариант названия - CCD — charge-coupled device) и КМОП (комплиментарный металлоксидный полупроводниковый прибор, английский вариант - CMOS). Первая технология старше второй, а потому и сенсоры ПЗС лучше.

ПЗС это монолитный чип представляющий собой совокупность мельчайших датчиков-фотоэлементов, тем или иным способом собранных в единую матрицу.

Появление ПЗС в какой то степени связано с попыткой в начале 60-х годов прошлого века заменить вакуумную передающую трубку твердотельным приемником изображения. Принцип зарядовой связи продемонстрировали экспериментально в 1970 году сотрудники фирмы Bell Laboratories У. Бойл и Дж.Смит, а уже в середине 70-х появились первые коммерческие матрицы производства фирм Fairchild, Bell и RCA в США, а также Phillips в Европе, совместимые с ТВ стандартом (т.е. имеющие разрешение по вертикали 476 и 576 строк – соответственно для американского и европейского стандартов разложения). Ну а вскоре в Японии было налажено массовое производство недорогих ПЗС приемлемого качества для бытовой электроники, и на смену кинокамерам пришли видеокамеры. Революционное воздействие оказали ПЗС на астрономию, где их появление по степени влияния сравнимо разве что с тем, которое оказало применение фотопластинок в качестве средств регистрации вместо человеческого глаза. Ну и, наконец, микроскопия в медицине и биологии, компьютерное зрение и видеоконференции, системы ориентации космических аппаратов и считыватели штрих-кода, телефакс и сканер...- все это стало возможным и доступны благодаря ПЗС.

Для того, чтобы понять, как ПЗС работает, представим себе МОП (металл – окисел – полупроводник) конденсатор. В принципе это просто электрод, отделенный от кремния (полупроводника) слоем диэлектрика. Для определенности будем полагать, что полупроводник p – типа, то есть концентрация дырок в нем в равновесных условиях на несколько порядков больше, чем концентрация электронов. Если на такой электрод (его называют затвором) подать положительный потенциал, электрическое поле, проникая через диэлектрик, отталкивает подвижные дырки и возникает обедненная область – некоторый слой кремния, свободный от основных носителей. При параметрах полупроводниковых подложек, типичных для ПЗС, глубина этой области составляет около 5 мкм. Напротив, электроны, если они каким либо образом окажутся вблизи (например, в результате фотогенерации), притянутся к затвору, и будут накапливаться на границе раздела - окисел-кремний непосредственно под затвором, то есть сваливаться в яму, которая совершенно официально называется потенциальной ямой (рис. 6 а). Электроны частично нейтрализуют электрическое поле, задаваемое в полупроводнике затвором, и возникающий в потенциальной яме заряд будет равен количеству света a

Ф1
Ф2
Ф3

Рис 6 а – образование потенциальной ямы; б – перетекание заряда; в – простейший трехфазный ПЗС - регистр попавшего на датчик.

Пусть теперь рядом с затвором расположен еще один, и на него тоже подан положительный потенциал, причем больший, чем на первый (рис. 6 б). Когда затворы расположены достаточно близко, их потенциальные ямы объединяются, и электроны, находящиеся в первой потенциальной яме, перемещаются в соседнюю, т.к. ее потенциал выше. Если имеется цепочка затворов, то можно, подавая на них соответствующие управляющие напряжения, передавать локализованный зарядовый пакет вдоль такой структуры. Важно то, что для управления цепочкой затворов любой длины достаточно трех тактовых шин (рис 6 в). Действительно, для передачи зарядовых пакетов необходимо и достаточно трех электродов: одного передающего (где сформировался заряд), одного принимающего и одного изолирующего, разделяющего пары передающих и принимающих друг от друга. Одноименные электроды таких троек могут быть соединены друг с другом в единую тактовую шину, требующую лишь одного внешнего вывода. Это простейший трехфазный регистр сдвига на ПЗС. Для нормальной его работы в каждый момент времени, по крайней мере, на одной тактовой шине должен присутствовать высокий потенциал, и, по крайней мере, на одной – низкий (потенциал барьера). При повышении потенциала на одной шине и понижении его на шине предыдущей происходит одновременная передача всех зарядовых пакетов под соседние затворы. А за полный цикл (один такт на каждой фазовой шине) происходит сдвиг зарядовых пакетов на один элемент регистра. Такое свойство ПЗС называют самосканированием.

Для локализации зарядовых пакетов в поперечном направлении формируются так называемые стоп каналы – узкие полоски с повышенной концентрацией основной легирующей примеси, идущие вдоль канала переноса (Рис 3). Повышенная концентрация дырок препятствует возникновению потенциальных ям в каналах переноса (чем их больше, тем труднее их отогнать, и электроны там не накапливаются). Для улучшения работы (а неприятности могут возникать из-за нарушения однородности кристаллической решетки подложки) в 1972 году были предложены ПЗС со скрытым каналом. От рассмотренного варианта последний отличается тем, что в поверхностной области кремния создается тонкий (не более 0.5 мкм) слой с проводимостью противоположного подложке типа и с такой концентрацией примеси, чтобы он мог полностью обедняться при подаче на него напряжения.

Рис 7. Вид на регистр “сверху”

Первые матрицы были с электродами, которые формировались из металла (молибдена), но была большая вероятность замыкания металлических фаз друг на друга (а значит потеря работоспособности матрицы). В 1974 году были предложены электроды из поликристаллического кремния.

Достоинства ПЗС: жесткий растр, который задается с высокой точностью в процессе изготовления, так что геометрические качества изображения зависят только от качества оптики.

Одной из важнейших характеристик светочувствительного сенсора является его *физический размер*. Размеры сенсора определяются длиной его диагонали, и измеряются в дюймах. Стандартный ряд типоразмеров светочувствительных матриц - 1/3, 1/2, 2/3 дюйма, есть и больше, например 5/3. При одинаковом разрешении (количестве ячеек) матрица большего размера лучше, чем матрица меньшего размера. Она способна воспринять больше ступеней перепадов яркости между абсолютно-белым и абсолютно-черным цветами. Количество этих градаций называется *динамическим диапазоном* и определяется числами диафрагм: 2, 2.8, 4 и т.д.

Динамический диапазон ПЗС является очень важной характеристикой качества изображения и соответствует понятию фотографической широты пленки.

Другой важный параметр сенсора - его *светочувствительность*. Она тоже зависит от физического размера сенсора, точнее, от размера ячейки. Обычная светочувствительность эквивалентна 80-200 ISO. Есть модели с очень высокой чувствительностью для специальных съемок. Но чаще всего высокая чувствительность означает низкое разрешение (и более низкое качество снимков с высоким разрешением). Некоторые камеры могут менять чувствительность (автоматически или вручную от 100 до 400, иногда 800 ISO). Увеличение чувствительности происходит на стадии обработки информации с матрицы путем усиления сигнала. Одновременно с полезным сигналом усиливаются и шумы, так что злоупотреблять этим нельзя. В профессиональных матрицах размер ячейки достигает 13 мкм (правильней - квадрат со стороной в 13 мкм), что обеспечивает светочувствительность до 1600 единиц ISO.

Но наиболее важный параметр, это *разрешение* цифровой камеры. Оно определяется количеством светочувствительных ячеек, расположенных на матрице. Стандартный ряд начинается с 350 тыс. пикселей, что соответствует экранному изображению стандарта VGA — 640x480 пикселей. Фотография хорошего качества (без пробелов, заметных цветных точек, яркая и четкая), снятая с разрешением 350 тыс. пикселей, при печати на струйном принтере получится чуть больше почтовой марки. Сенсор с разрешением 1 млн пикселей позволяет получить отпечаток размером 9x12 см и экранное представление больше, чем XGA - 1024x768 пикселей. Отпечатки еще

большого формата - 10x15 см (самый популярный потребительский формат) получатся при разрешении светочувствительной матрицы в 1,3 млн пикселей. Матрицы разрешением в 2,1 млн пикселей и более позволяют получать распечатки фотографий большого формата при умеренном динамическом диапазоне и невысокой чувствительности цифровой камеры. Камеры с матрицами разрешением в 4 млн пикселей и более позволяют печатать фотографии выставочного формата, но с предварительной обработкой в графическом редакторе. Рост разрешения, естественно, приводит к увеличению размера графического файла.

Еще одна немаловажная характеристика светочувствительных матриц - *соотношение уровней сигнала и шумов*. Это соотношение тесно связано с динамическим диапазоном сенсора. Обычно матрицы с низким динамическим диапазоном имеют высокий уровень шумов (около 10 - 15 дБ). Уровень шума возрастает при увеличении чувствительности сенсора. На практике шумы проявляются в виде различных цветовых искажений и высокой зернистости изображения. Изображение становится структурным (словно создано из отдельных песчинок), на линиях цветовых переходов образуются ореолы - так называемые «факелы».

Производство сенсоров крайне трудоемкая и технологически сложная задача. Выпускают их ограниченное число компаний, а выход годной продукции не превышает 2%. Отсюда и стоимость цифровых фотоаппаратов.

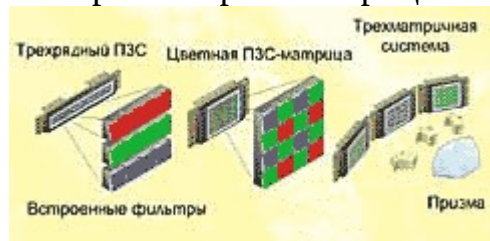
Даже прошедший заводскую отбраковку сенсор имеет «мертвые» участки. То есть некоторые из элементов не работают изначально (слишком малы их размеры, слишком велики технологические допуски при массовом производстве). Поскольку пороки эти микроскопичны, достаточно восполнить недостаток информации с «мертвого» светочувствительного элемента усредненным значением яркости засветки сенсора, полученным с соседних, работающих участков. Эта операция называется коррекцией.

Интерполяция работает так же, но служит не для коррекции изображения, полученного при помощи сенсора, а для программного увеличения его разрешения. К примеру, сенсор с разрешением в 1,3 млн пикселей можно заставить выдать изображение с разрешением в 2 млн пикселей, добавив к истинным точкам дополнительные, построенные по алгоритму усредненных значений. Ясно, что коррекция и интерполяция способствуют снижению качества изображения, которое становится «размытым».

Простой замер интенсивности света, попавшего на ПЗС-матрицу, может породить только черно-белое изображение, поэтому перед ней помещают цветные фильтры.

Самой популярной технологией получения цветного изображения является однокадровая с одной матрицей, состоящая из триад (Рис.4 слева). Перед каждым элементом триады устанавливается микроскопический светофильтр одного из базовых цветов (красный, зеленый, синий). Их сочетание дает полный спектр. Но существуют еще три технологии, применяемые гораздо реже:

1. Схема задней развертки изображения. Она похожа на принципиальную схему планшетного сканера. Сканирующая головка движется вдоль короткой стороны кадрового окна (сверху вниз) и считывает информацию построчно. Сканирующая линейка состоит из трех рядов светочувствительных элементов, каждый из которых закрыт светофильтром одного из базовых цветов (красный, зеленый, голубой). Поскольку сканирование идет построчно (один ряд пикселей за каждый шаг), выдержка становится недопустимо длинной. Подобные фотоаппараты применяются только для специальной съемки в стационарных условиях.
2. Быстрее работают трехкадровые фотоаппараты. В них экспозиция одного кадра производится трижды - через светофильтр базового цвета поочередно. В результате цветопередача получается максимального качества, но быстродействие системы не позволяет снимать движущиеся объекты. Трехкадровые фотоаппараты применяют для съемки архитектуры и репродукций.
3. Альтернативой быстродействующим системам с одной матрицей ПЗС можно считать только фотоаппараты с тремя матрицами (Рис 8 справа),



4.

5. Рис. 8

каждая из которых фиксирует изображение за своим светофильтром одного из базовых цветов. Специальная оптическая система (дихроичная призма) расщепляет сфокусированный объективом световой луч и направляет его на все три матрицы. Светофильтры, установленные перед каждой матрицей, пропускают только свою часть цветовой характеристики. После этого с помощью трех сенсоров картинка передается в электронный логический блок камеры, где становится одной фотографией, записанной во флэш-память в виде графического файла. В фотоаппаратах такую схему применяла только фирма Minolta (в дорогих профессиональных фотоаппаратах эта схема встречается чаще). Трехэлементный сенсор усложняет оптическую систему камеры и увеличивает ее габариты.

Применение сразу трех матриц позволяет получить очень высокое качество изображения. Но и втрое повышает стоимость фотоаппарата. Три матрицы устанавливаются в сменные крышки широкоформатных фотоаппаратов, которые стоят десятки тысяч долларов и предназначены исключительно для профессиональной цифровой фотосъемки. В литературе правда отмечается, невысокое разрешение (обычно 350 тыс. пикселей) подобной схемы цветопередачи.

Важной характеристикой матрицы ПЗС является метод считывания

состояния ее ячеек. Существуют три типа сенсоров - с построчным, покадровым и построчно-кадровым переносом зарядов, накопленных ячейками матрицы при их засветке. Этот показатель отражает быстродействие сенсора. Значения, собранные по всей площади сенсора, выстраиваются с высокой точностью, создавая своеобразную «карту», на которой четко определено физическое расположение всех цветов и их интенсивность. В результате и получается цифровое изображение, которое записывается в виде цифрового файла. Такой файл состоит из множества единиц информации (битов), которые затем могут быть расшифрованы и прочитаны другим цифровым устройством, например, компьютером или принтером.

Каждый пиксел несет в себе информацию о цвете. Количество получаемых цветовых оттенков определяется способностью цифровой камеры (точнее, ее аналого-цифрового преобразователя) распознать и зафиксировать количество градаций каждого из базовых цветов. 8-битное кодирование цветового канала способно передать 256 оттенков цвета. При сложении базовых составляющих цвета получится, что при 8-битном кодировании каждого канала общая разрядность цвета составит 24 бита. При этом аналого-цифровой преобразователь способен оцифровать изображение с общим количеством цветовых оттенков $256 \times 256 \times 256 = 16\,777\,216$. Еще большее количество цветов получается при 10- и 12-битном кодировании на каждый цветовой канал, что, в общем, дает 30-или 36-битную разрядность цвета — это прерогатива профессиональной съемочной техники.

Как отмечалось, с ростом разрядности цвета растет и размер графического файла, в котором хранится снимок. С ростом разрешения его размер растет еще больше.

Чтобы снимок, полученный цифровым способом, мог хотя бы приблизиться по качеству к снимку с пленочного негатива, каждый элемент сенсора должен иметь размер, который был бы сравним с частицей галогенида серебра пленочной эмульсии. Речь идет об элементе величиной с десятки микрон. Если учесть, что каждый светочувствительный элемент (пиксел) это сочетание трех более мелких субэлементов, снабженных индивидуальным светофильтром (красным, зеленым или голубым), то становится ясно, какая это сложная задача. На практике даже очень качественный и большой по физическим размерам сенсор обладает худшей разрешающей способностью, чем самая крупнозернистая фотопленка. Именно поэтому в цифровых камерах используются сложные механизмы программной коррекции и интерполяции изображения.

Центральная проекция снимка и ортогональная проекция плана.

Пусть A , B , C и D (рис. 9) точки местности, а S – центр проекции. Тогда точки пересечения a , b , c , d плоскости P с проектирующими лучами AS , BS , CS и DS есть центральные проекции соответствующих точек местности. Таковую же центральную проекцию можно построить и в том случае, если

плоскость проекции P' провести по другую сторону от центра проектирования и на том же расстоянии от него. Действительно, если это

сделать, то получим точки a' , b' , c' и d' , причем согласно условию $Sa' = Sa$, $Sb' = Sb$, $Sc' = Sc$ и $Sd' = Sd$, и .

Плоскость P проекции дает негативное (обратное) изображение точек местности, а P' – позитивное (прямое). То есть, позитив получается, когда объект и плоскость проекции помещены по одну сторону от центра проектирования, а негатив, если они расположены по разные стороны от него. Поскольку негатив и позитив располагаются симметрично относительно центра проекции, то они одинаковы (конгруэнтны). Отметим, что изображение объекта на плоскости снимка, полученное в центральной проекции, называется перспективным изображением. Если центр проектирования перенести на бесконечно большое расстояние относительно местности, то проектирующие лучи будут взаимно параллельны. Их пересечение с перпендикулярной к ним плоскостью дает ортогональную проекцию точек местности. В топографии такая проекция (при условии, что проектирующие лучи отвесны) называется горизонтальной.

S
 D
 C
 B
 A
 a
 d
 c
 b
 P
 P''
 a
 b
 c
 d
 a'_0
 b'_0
 c'_0
 d'_0
 a_0
 b_0
 c_0
 d_0
 a
 b
 c
 d
 S
 P

Рис. 10



Рис. 9

Отличие между ортогональной (горизонтальной) и центральной проекциями видно на рис. 10. Точки местности A, B, C и D изображаются на плоскости P в центральной проекции в точках a, b, c, d , а в ортогональной проекции – в точках a_o, b_o, c_o, d_o . При перемещении плоскости проекции в положение P'' взаимное положение точек a_o, b_o, c_o , построенных в ортогональной проекции, не нарушится. В то же время точки a, b, c , построенные в центральной проекции, свое взаимное положение изменят.

Понятно, что для составления плана участка местности по его изображению на снимке необходимо перспективное изображение преобразовать в ортогональное. Но переносом центра проектирования в бесконечность такое преобразование практически не осуществить. Поэтому необходимо найти косвенные пути решения задачи.

Элементы центральной проекции и ее свойств

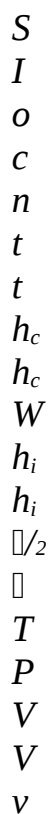


Рис. 11. Элементы центральной проекции

Представление о элементах центральной проекции дает рис. 11, на котором изображены:

- Плоскость T , в которой располагаются проектируемые точки местности, называется плоскостью основания (плоскостью предмета).
- Плоскость P , куда проектируются эти точки, называется плоскостью изображения (картины) или плоскостью снимка. Предполагается, что плоскости T и P бесконечны и ограничение их линиями является условным.
- Двухгранный угол $\angle$ между плоскостями снимка и основания – это угол наклона снимка. Он произволен, но если равен нулю, то снимок считается горизонтальным.
- S – центр проекции.
- Проектирующий луч So , перпендикулярный к плоскости снимка, называется главным лучом. Он должен совпадать с главной оптической осью фотокамеры, но в точности это не выполняется.
- Точка o пересечения главного луча с плоскостью снимка называется главной точкой, а расстояние So – его фокусным расстоянием f . Оно должно быть равно фокусному расстоянию фотокамеры.
- Точка n пересечения отвесного проектирующего луча, с плоскостью снимка называется точкой надира. Она является изображением точки N местности, которая в момент фотографирования находилась на одной отвесной линии (на линии перпендикулярной основанию) с передней узловой точкой объектива фотокамеры.
- Вертикальная плоскость W , проходящая через точки S , o , n называется плоскостью главного вертикала.
- След vv плоскости W на снимке это его главная вертикаль, а след VV плоскости W на основании называется линией направления съемки.
- Горизонтальный проектирующий луч SI , лежащий в плоскости главного вертикала W , пересекает плоскость снимка в главной точке схода I .
- Точка c пересечения биссектрисы угла $So n$ ($\angle$) с плоскостью снимка называется точкой нулевых искажений. Она обладает важными свойствами, которые будут рассмотрены при изучении геометрической характеристики наклонного снимка. Точки I , o , c и n снимка располагаются на его главной вертикали.
- Линии hh , лежащие в плоскости P и перпендикулярные к главной вертикали, есть горизонтальи снимка. Причем, $h_i h_t$ – линия основания. Это линия пересечения плоскости снимка с плоскостью основания; $h_c h_c$ – линия неискаженного масштаба – горизонталь, проходящая через точку нулевых искажений c ; $h_o h_o$ – главная горизонталь, она проходит через главную точку снимка o ; $h_i h_i$ – линия действительного (истинного) горизонта – линия пересечения снимка и горизонтальной плоскости (плоскости действительного горизонта), проходящей через центр проекции S .

Из анализа рис.11 следует справедливость следующих соотношений:

$$\begin{aligned}
 on &= f \cdot \operatorname{tg} \varepsilon & (8) \\
 oc &= f \cdot \operatorname{tg} \frac{\varepsilon}{2} & (9) \\
 oj &= f \cdot \operatorname{ctg} \varepsilon & (10) \\
 Sj &= f / \sin \varepsilon & (11)
 \end{aligned}$$

Свойства центральной проекции

1. Перспективным изображением любой точки местности, например, A , является точка a и притом единственная (рис. 12). Любой точке снимка, например, a соответствует бесчисленное множество точек местности A , A_1 и т.д.

Рис. 13

i
 a
 b
 c
 d
 A
 B
 C
 D
 S
 S
 C
 B
 K
 D
 A
 P
 c
 b
 a
 k
 d
 C_1
 B_1
 Рис.12
 A_1

Перспективным изображением любой прямой пространства, например BC , не проходящей через центр проекции, является прямая bc , и притом единственная. Но она изобразилась бы точкой, если бы располагалась на проектирующем луче, например прямая DK и точка d (или k). Любому

отрезку на снимке, например bc , соответствует бесчисленное число отрезков местности BC , B_1C_1 и т.д.

2. Изображения любой системы взаимно параллельных прямых пространства, например $AB\ CD$ и т.д., сходятся на снимке в одной точке i , которая называется точкой схода. Для того, чтобы ее получить необходимо из центра проекции провести проектирующий луч параллельно системе прямых пространства. Там, где он пересечет плоскость снимка и находится точка схода (рис.13). Любая система прямых линий, параллельных плоскости снимка, имеет точку схода в бесконечности. Если параллельные прямые находятся на местности (в плоскости основания), то точка схода их изображений расположена на линии h_ih_i действительного горизонта.

Построение изображения семейства отрезков, лежащих в плоскости основания и параллельных линии направления съемки (или составляющих с ним угол φ), выполняют следующим образом.

1. Отрезки продолжают до пересечения с линией основания картины. Полученные точки, принадлежат двум плоскостям – плоскости основания и плоскости снимка (картины).

2. На плоскости снимка находят положение главной точки схода J , и строят линию h_ih_i перпендикулярную главной вертикали (линию действительного горизонта).

3. Через центр проекции S проводят луч, параллельный заданным отрезкам. Он будет расположен в плоскости действительного горизонта. Пересечение этого луча с линией h_ih_i определяет точку схода J^i изображений отрезков.

4. Соединяют прямыми линиями точку J^i с точками, полученными на линии основания картины. Эти линии на снимке есть изображение лучей, идущих от линии основания картины, через заданные отрезки и до бесконечности.

5. Проводят проектирующие лучи через точки, ограничивающие отрезки. Их пересечение с построенными на снимке линиями и определяет искомое изображение.

По этому правилу и построены изображения прямых, параллельных направлению съемки (рис.14) и прямой, составляющей с направлением съемки угол φ (рис.15).

v

v

h_t

h_t

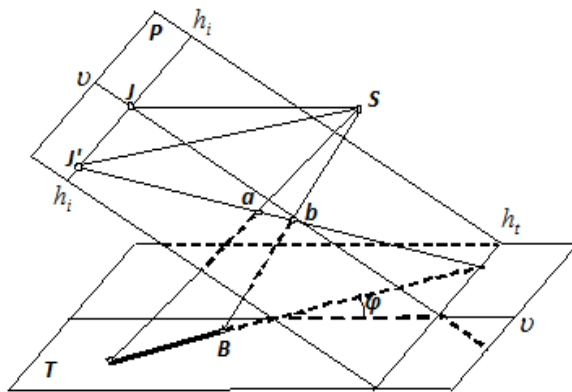
h_i

h_i

T
 D
 K
 A
 B
 a
 b
 d
 k
 S
 P
 J

Рис.14

Точка схода изображений вертикальных (отвесных) прямых совпадает с точкой надира n (рис. 16). Пересечение B_o отрезка AB с плоскостью снимка находится на следе вертикальной плоскости, проходящей через прямую AB и параллельной плоскости главного вертикала,. Поэтому отрезок NB_o есть изображение бесконечного отвесного луча, идущего из точки B_o . Проекции точек A и B принадлежат этому отрезку, значит для их построения достаточно провести проектирующие лучи. Аналогичным образом на рис. 16 построено изображение вертикальной прямой DK . Решение задачи можно было начать и с построения точки A , которая принадлежит плоскости основания.



Рисунок

Возможны и других приемы построения изображений параллельных линий.

v

v

h_t

h_t

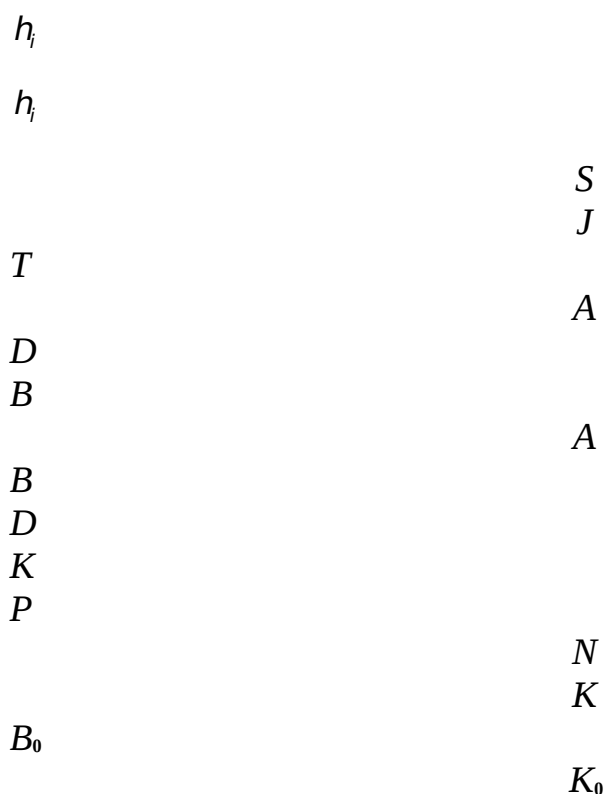


Рис. 16

Получение снимков местности

При аэрофототопографической съемке снимки местности получают путем ее фотографирования. Называют этот этап летносъёмочным процессом или аэрофотосъемкой (АФС), осуществляют - с самолёта или другого летательного аппарата. Цель – получение не только фотоснимков, удовлетворяющих заранее поставленным требованиям, но и показаний спецприборов, характеризующих их положение в момент экспонирования. В наземной фототопографической съемке фотографируют фототеодолитом, который устанавливается на штативе.

АФС можно классифицировать по количеству и расположению аэрофотоснимков (одинарная, маршрутная и площадная), положению оптической оси аэрофотоаппарата (плановая и перспективная) и масштабу фотографирования (крупномасштабная - 1: 10 000 и крупнее, среднемасштабная и мелкомасштабная - 1: 35 000 и мельче).

Одинарная АФС – фотографирование отдельных сравнительно небольших участков земной поверхности, когда аэрофотоснимки не перекрываются.

Маршрутная АФС – такое фотографирование полосы местности, при котором смежные аэрофотоснимки взаимно связаны заданным продольным перекрытием P (рис. 17). Причем величина его достигает 60 и более процентов, поэтому возникают и зоны тройного перекрытия, что очень важно при фотограмметрической обработке снимков. Маршрутная АФС может быть прямолинейной, ломаной и криволинейной. Площадная (многомаршрутная)

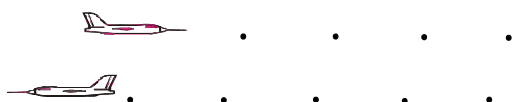
АФС – фотографирование участка земной поверхности, который не захватить одним маршрутом. В этом случае прокладываются несколько параллельных между собой аэрофотосъёмочных маршрутов (рис. 18). При этом смежные маршруты перекрываются. Называют общую часть изображений на снимках поперечным перекрытием Q .

Рис 17

Плановой называют аэрофотосъёмку, при которой стараются получать горизонтальные снимки, но получают наклонные с отклонением оптической оси АФА от вертикали не более 3° . Перспективной считают АФС при наклоне оптической оси на заданный и сравнительно больший угол.

D
 D
 Q

Рис. 18



Основным видом аэрофотосъёмки является плановая АФС. Она производится в различных масштабах, которые зависят от высоты фотографирования H и фокусного расстояния f АФА, в частности:

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{H} \quad (12)$$

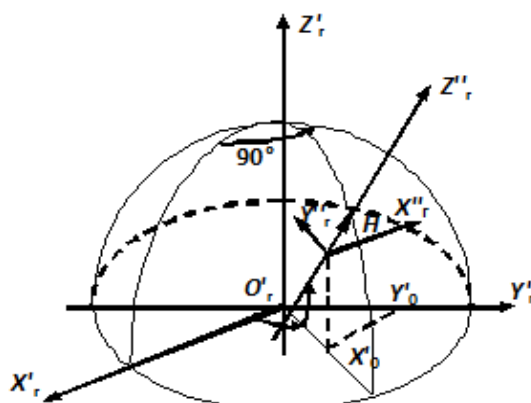
При получении снимков с поверхности земли в топографических целях местность фотографируют с разных точек пространства, но так, чтобы смежные снимки перекрывали друг друга. Оптические оси фототеодолита устанавливают при этом, как правило, горизонтально.

Аналитические основы одиночного снимка

Системы координат точек местности и снимка

Для установления связей между точками объекта и их фотографическими изображениями используются пространственные и плоские системы координат. Если картографируемый участок захватывает больше, чем 1 зону может использоваться геоцентрическая система координат (рис.5). В ней за начало координат принят центр общеземного эллипсоида O'_r , а плоскостью $X'_r Y'_r$ является плоскость экватора. Ось X'_r находится в плоскости начального меридиана, а ось Z'_r совмещена с полярной осью $O'_r P$. Система координат правая. За фигуру Земли принимается эллипсоид вращения с полуосями a и b и сжатием e . Любая точка O

пространства задаётся геодезическими координатами: широтой B , долготой L и высотой H . Геоцентрические координаты $X'_г, Y'_г, Z'_г$ точки O находят по их геодезическим координатам, с помощью известных формул сфероидической геодезии.



Рисунок

Может использоваться и прямоугольная система координат $X''_г Y''_г Z''_г$, представленная на рис.22. Она сохраняет все преимущества геоцентрической системы, но абсолютные значения координат точек в ней меньше. Ось $Z''_г$ нормальна к поверхности эллипсоида в начальной точке O картографируемого участка; ось $Y''_г$ совпадает с направлением на север. Система координат правая. За начало счёта высот принимается такое значение, при котором аппликаты всех точек положительны. Координаты $X''_г, Y''_г, Z''_г$, легко получаются из геоцентрических $X'_г, Y'_г, Z'_г$ путём трёхмерного преобразования, включающего перенос начала координат и их вращение.

При решении задач на сравнительно небольшом участке местности используется известная левая система прямоугольных координат $O_г X_г Y_г Z_г$ (рис.6) Гаусса.

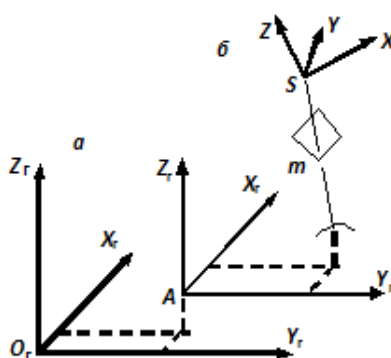


Рисунок .

На практике часто находит применение местная система пространственных прямоугольных координат $X_г Y_г Z_г$ с началом в некоторой точке A картографируемого участка (рис.23). В этой системе ось $Z_г$ нормальна к поверхности квазигеоида в точке A , ось $X_г$ горизонтальна и параллельна

осевому меридиану зоны, в которой находится участок съёмки, а ось Y_T направлена на восток. Координаты начала задаются в системе $O_T X_T Y_T Z_T$.

Системы координат $O_T X_T Y_T Z_T$ и $A X_T Y_T Z_T$ в фотограмметрии принято называть геодезическими.

Координаты точек местности, полученные по результатам измерения снимков, определяются, как правило, в так называемой фотограмметрической пространственной прямоугольной системе координат $SXYZ$ (рис.6). Она правая. Ее начало и направление координатных осей выбираются так, чтобы наиболее просто осуществлялся переход от координат точек снимка к координатам точек местности. Обычно начало координат совмещается с точкой фотографирования S или с какой-либо точкой местности, а плоскость XY устанавливается горизонтально или параллельно плоскости одного из снимков.

Поскольку системы координат XYZ и $X_T Y_T Z_T$ не совпадают, то при переходе от фотограмметрических координат к геодезическим необходимо выполнять преобразование координат из системы в систему.

На каждом снимке по его периметру имеется ряд координатных меток, которые определяют плоскую прямоугольную систему координат $o'x'y'$. Такая система при наличии на снимке четырёх меток 1, 2, 3, 4 показана на рис. 7. Начало координат находится в точке o' пересечение отрезков 1-2 и 3-4. Ось x совмещается с прямой 1-2, а ось y с перпендикуляром к оси x в точке o' . Возможны и другие варианты. Например, ось y – это главная вертикаль, а ось x – одна из горизонталей и т. д. Отметим, что на наземных снимках оси обозначают буквами x и z , а координаты в системе координат снимка иногда называют фотокоординатами.

m
 y
 x
 o'
 x
 y

Рисунок 7. Плоская прямоугольная система координат снимка

Z'
 Y'
 X'
 X'_m
 Y'_m
 Z'_m
 M
 S
 m
 o

Рисунок 8. Пространственная система координат точки снимка

x
 y

Положение точка на снимке определяется координатами x и y , но это можно сделать и в пространственной фотограмметрической системе $X'Y'Z'$ (рис.8). Начало координат этой системы всегда совмещено с точкой фотографирования S , а оси X' , Y' , Z' параллельны осям X , Y , Z фотограмметрической системы координат точек объекта местности или осям геодезической системы координат.

Связи между плоскими и пространственными координатами точек снимка и местности устанавливаются через элементы ориентирования снимка.

Элементы ориентирования снимка.

Элементами ориентирования снимка называются величины, определяющие его положение в момент фотографирования относительно выбранной пространственной прямоугольной системы координат. Различают элементы внутреннего и внешнего ориентирования снимка.

S

f
 y
 o
 o'
 x
 y_0
 x_0

Рисунок 9. Элементы внутреннего ориентирования снимка

Элементы внутреннего ориентирования позволяют найти положение центра проекции относительно снимка, а значит восстановить связку проектирующих лучей, существовавшую в момент фотографирования. К ним относятся координаты главной точки x_0, y_0 снимка и фокусное расстояние f фотокамеры (рис.9).

Элементы внешнего ориентирования (ЭВО) позволяют установить положение снимка (связки), которое она занимала в момент фотографирования относительно заданной пространственной прямоугольной системы координат. Для снимков, полученных АФА, на практике используют две таких системы.

В первую систему ЭВО (рис.10) входят координаты X_s, Y_s, Z_s точки фотографирования, а также углы поворота снимка α, ω и κ

Продольный угол наклона снимка α образуется осью Z' и проекцией главного луча So на плоскость $X'Z'$.

Поперечный угол наклона снимка ω заключён между главным лучом So и его проекцией на плоскость $X'Z'$.

Угол поворота снимка κ образуют ось y снимка и след плоскости, проходящей через главный луч So и ось Y' (в этой плоскости находится угол ω).

На рис. 10 углы κ и ω положительные, угол α - отрицательный.

Вторая система (рис.11) ЭВО содержит:

- координаты X_s, Y_s, Z_s точки фотографирования;
- t – дирекционный угол оптической оси фотокамеры – он образуется следом плоскости главного вертикала W и положительным направлением оси X' ;
- ε - угол наклона снимка, находится в плоскости главного вертикала между главным и надирным лучами;
- κ – угол поворота в плоскости снимка, образуется главной вертикалью

vv

и осью u плоской системы координат x, y .

На рисунке изображены положительные углы.

Различают абсолютные и относительные ЭВО снимка. Абсолютные элементы определяют положение связки в геодезической системе координат.

Таким образом, положение одиночного снимка определяется девятью элементами ориентирования, из них три - элементы внутреннего ориентирования и шесть - элементы внешнего ориентирования.

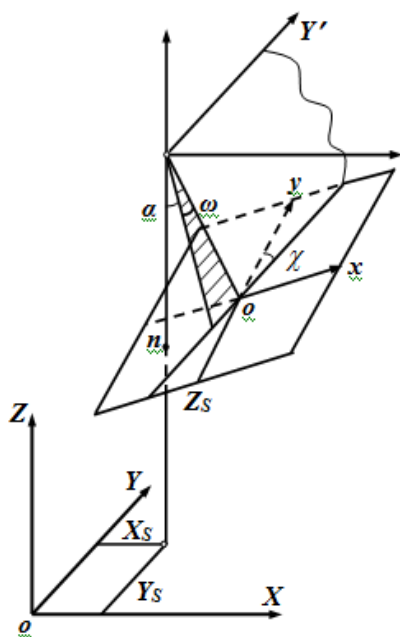


Рисунок . Первая система

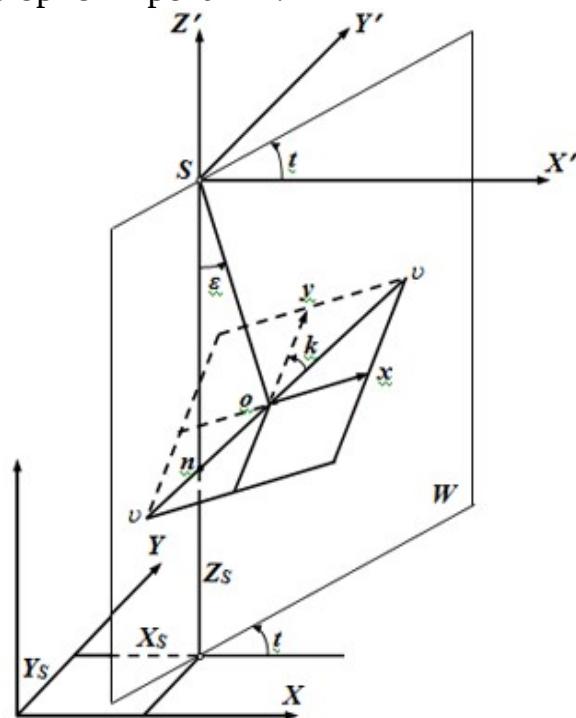


Рисунок . Вторая система

Зависимость между пространственными и плоскими координатами точки снимка

При изучении теории фотограмметрии и решении практических задач используются зависимости между плоскими координатами x, y точек снимка и их пространственными координатами X', Y', Z' . Эти зависимости можно установить, если известны элементы внутреннего и угловые элементы внешнего ориентирования снимка.

Введём для этого систему координат $Sxyz$ с началом в точке фотографирования S (рис. 12). Координатные оси x, y этой системы расположим параллельно соответствующим осям на снимке, а ось z совместим с главным лучом связки So . Тогда координаты x, y любой точки снимка в пространственной системе имеют те же значения, что и в плоской, а координата z для всех точек постоянна и равна фокусному расстоянию снимка ($z = -f$).

Системы $SX'Y'Z'$ и $Sxyz$ имеют общее начало, поэтому в процессе преобразования координат из одной системы в другую следует выполнять только вращение, что выражается, например, формулой:

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (14)$$

х
о
s
z
х
у
у

Рис. 12

Ортогональная матрица A имеет третий порядок и называется матрицей преобразования координат. Ее элементами являются 9 направляющих косинуса, поэтому выше приведенное соотношение можно записать и так:

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (15)$$

Причем, каждый из направляющих косинусов это косину угла между соответствующими осями систем координат участвующих в преобразовании, то есть:

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(X'x) & \cos(X'y) & \cos(X'z) \\ \cos(Y'x) & \cos(Y'y) & \cos(Y'z) \\ \cos(Z'x) & \cos(Z'y) & \cos(Z'z) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (16)$$

Отметим, что в формуле 16 не произведения координат, заключенных в скобках, а обозначение осей, между которыми берется угол.

В силу ортогональности направляющие косинусы матрицы связаны между собой шестью независимыми уравнениями:

$$\begin{aligned} a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 &= 1, & a_1b_1 + a_2b_2 + a_3b_3 &= 0, \\ b_1^2 + b_2^2 + b_3^2 &= 1, & b_1c_1 + b_2c_2 + b_3c_3 &= 0, \\ c_1^2 + c_2^2 + c_3^2 &= 1, & c_1a_1 + c_2a_2 + c_3a_3 &= 0. \end{aligned} \quad (17)$$

Один поворот в пространстве можно заменить тремя последовательными поворотами в плоскости (вокруг осей Z, X и Y, рис.13). Им будут соответствовать матрицы A_χ , A_ω , и A_α . В соответствии с рис. 26 для каждого из поворотов соотношение 16 можно представить следующим образом:

$\begin{pmatrix} y \\ x \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y \\ X \\ Z \end{pmatrix}$

$Z \rightarrow$

$\begin{pmatrix} y \\ Y \\ Z \\ z \\ x \\ X \\ a \\ b \\ c \end{pmatrix}$

Рисунок 13. Преобразование

$$A_\chi = \begin{pmatrix} \cos\chi & -\sin\chi & 0 \\ \sin\chi & \cos\chi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad A_\omega = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega & -\sin\omega \\ 0 & \sin\omega & \cos\omega \end{pmatrix}$$

$$A_\alpha = \begin{pmatrix} \cos\alpha & 0 & \sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{pmatrix}$$

Общая матрица преобразования A равна произведению:

$$A = A_\alpha A_\omega A_\chi$$

После перемножения матриц и получим формулы для вычисления направляющих косинусов. В данном случае они будут иметь вид:

$$\begin{aligned}
a_1 &= \cos(X', x) = \cos\alpha \cos\chi + \sin\alpha \sin\omega \sin\chi \\
a_2 &= \cos(X', y) = -\cos\alpha \sin\chi + \sin\alpha \sin\omega \cos\chi \\
a_3 &= \cos(X', z) = \sin\alpha \cos\omega \\
b_1 &= \cos(Y', x) = \cos\omega \sin\chi \\
b_2 &= \cos(Y', y) = \cos\omega \cos\chi \\
b_3 &= \cos(Y', z) = -\sin\omega \\
c_1 &= \cos(Z', x) = -\sin\alpha \cos\chi + \cos\alpha \sin\omega \sin\chi \\
c_2 &= \cos(Z', y) = \sin\alpha \sin\chi + \cos\alpha \sin\omega \cos\chi \\
c_3 &= \cos(Z', z) = \cos\alpha \cos\omega.
\end{aligned} \tag{18}$$

Таким образом, направляющие косинусы $a_1, a_2, a_3, \dots, c_3$ зависят от трёх угловых элементов внешнего ориентирования снимка и являются координатами единичных векторов, определяющих взаимное положение рассматриваемых систем координат: $X' Y' Z'$ и $x y z$.

Аналогично для второй группы элементов внешнего ориентирования снимка можно получить:

$$\begin{aligned}
a_1 &= \cos(X', x) = \cos\epsilon \sin t + \cos k \cos t \\
a_2 &= \cos(X', y) = -\sin\epsilon \sin t + \cos k \cos t \\
a_3 &= \cos(X', z) = -\sin\epsilon \cos t \\
b_1 &= \cos(Y', x) = -\cos\epsilon \cos t + \cos k \sin t \\
b_2 &= \cos(Y', y) = \sin\epsilon \cos t + \cos k \sin t \\
b_3 &= \cos(Y', z) = -\sin\epsilon \sin t \\
c_1 &= \cos(Z', x) = \sin\epsilon \sin t \\
c_2 &= \cos(Z', y) = \sin\epsilon \cos t \\
c_3 &= \cos(Z', z) = \cos\epsilon
\end{aligned} \tag{19}$$

Формулы (18) и (19) позволяют установить связь между элементами ориентирования и направляющими косинусами разных систем ЭВО:

$$\begin{aligned}
\operatorname{tg} \alpha &= \frac{a_3}{c_3} = -\operatorname{tg} \epsilon \cos t, \quad \sin \omega = -b_3 = \sin \epsilon \sin t, \\
\operatorname{tg} \chi &= \frac{b_1}{b_2} = \frac{\cos \epsilon \operatorname{tg} k \operatorname{tg} t - 1}{\operatorname{tg} k + \cos \epsilon \operatorname{tg} t}
\end{aligned}$$

Можно было бы привести и ещё ряд соотношений.

Переход от пространственных координат к плоским осуществляется по формулам:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = A^T \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} \tag{20}$$

где A^T – транспонированная матрица A .

Если начало координат снимка не совпадает с его главной точкой, то вместо координат x и y в формулах 14,15,16 и 20 следует использовать разности $x - x_0$ и $y - y_0$.

Формулы (14) – (20) справедливы для любых значений угловых элементов внешнего ориентирования снимка.

Для плановых снимков, когда α , ω и χ малы, с точностью до членов второго порядка малости можно записать:

$$\begin{aligned} a_1 &= 1 - \frac{\alpha^2}{2} - \frac{\kappa^2}{2}, & a_2 &= -\chi + \alpha\omega, & a_3 &= \alpha, \\ b_1 &= \chi & b_2 &= 1 - \frac{\omega^2}{2} - \frac{\kappa^2}{2}, & b_3 &= -\omega, \\ c_1 &= -\alpha + \omega\kappa, & c_2 &= \alpha\kappa + \omega, & c_3 &= 1 - \frac{\alpha^2}{2} - \frac{\omega^2}{2}, \end{aligned} \quad (21)$$

Если же учитывать только члены первого порядка малости, то:

$$\begin{aligned} X' &= x - y\chi - z\alpha, \\ Y' &= y + x\chi - z\omega, \\ Z' &= z + x\alpha + y\omega. \end{aligned} \quad (22)$$

Для случая, изображенного на рис. 29 матрица A будет единичной, то есть:

$$a_1 = b_2 = c_3 = 1, \quad a_2 = a_3 = b_1 = b_3 = c_1 = c_2 = 0, \quad (23)$$

Полученные зависимости между системами координат $X' Y' Z'$ и $x y z$ используются в аналитических способах определения координат точек местности по измерениям снимков.

Зависимость между координатами точки местности и снимка

Точка местности M и её изображение на снимке m находятся на одном проектирующем луче (рис.14). Положение точек S и M в системе координат

местности $X Y Z$ определяется векторами соответственно $\bar{R}_S$ и $\bar{R}_M$, а положение точек m и M в системе координат $S X' Y' Z'$ – векторами $\bar{r}$ и $\bar{R}$.

Векторы $\bar{r}$ и $\bar{R}$ коллинеарны, поэтому

$$\bar{R} = \lambda \bar{r}, \quad (24)$$

$$\bar{R} = \bar{R}_M - \bar{R}_S.$$

где λ – скаляр, а

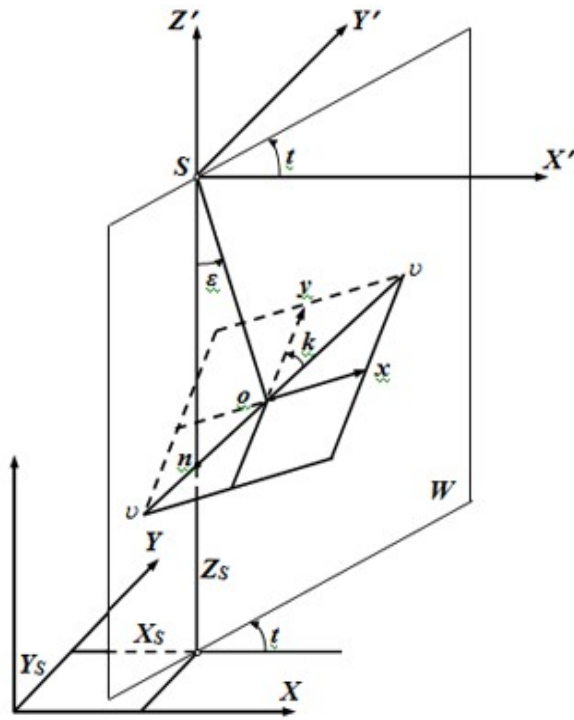


Рисунок . Схемы связи координат точки местности и снимка

r и $\bar{R}$

Спроектируем векторы на координатные оси X, Y, Z , тогда:

$$\begin{pmatrix} R_X \\ R_Y \\ R_Z \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} r_X \\ r_Y \\ r_Z \end{pmatrix} \quad (25)$$

Из третьего равенства (25) найдем λ и подставим его выражение в первое и второе. Тогда:

$$R_X = R_Z \frac{r_{X'}}{r_{Z'}}, \quad R_Y = R_Z \frac{r_{Y'}}{r_{Z'}}. \quad (26)$$

Так как

$$\begin{aligned} R_X &= X - X_S, & R_Y &= Y - Y_S, & R_Z &= Z - Z_S, \\ r_{X'} &= X', & r_{Y'} &= Y', & r_{Z'} &= Z', \end{aligned}$$

то

$$X = X_S + (Z - Z_S) \frac{X'}{Z'}, \quad Y = Y_S + (Z - Z_S) \frac{Y'}{Z'} \quad (27)$$

Или, с учётом равенства (15)

$$\begin{aligned} X &= X_s + (Z - Z_s) \frac{a_1(x - x_0) + a_2(y - y_0) + a_3z}{c_1(x - x_0) + c_2(y - y_0) + c_3z}, \\ Y &= Y_s + (Z - Z_s) \frac{b_1(x - x_0) + b_2(y - y_0) + b_3z}{c_1(x - x_0) + c_2(y - y_0) + c_3z}. \end{aligned} \quad \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 8) \end{pmatrix}$$

Итак, если элементы ориентирования снимка даны, то два уравнения (27) имеют три неизвестных. Отсюда следует, что пространственные координаты точки местности по одиночному снимку не определить. Можно получить лишь ее плановое положение. Но надо знать высоту фотографирования $H = -(Z - Z_s)$.

В фотограмметрии часто используются обратные зависимости (между координатами точки снимка и координатами соответствующей точки местности). Для их получения, спроектируем векторы $\vec{R}$ и $\vec{r}$ равенства (24) на координатные оси системы координат $Sxyz$ (рис. 31), в результате получим:

$$\begin{pmatrix} R_x \\ R_y \\ R_z \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{pmatrix} \quad (29)$$

Решим третье уравнение относительно λ и подставим его значение в первое и второе уравнения. Тогда:

$$r_x = r_z \frac{R_x}{R_z}, \quad r_y = r_z \frac{R_y}{R_z}. \quad (30)$$

Матрицы-столбцы равенств (29) можно представить в виде:

$$\begin{pmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \\ 1) \end{pmatrix};$$

$$\begin{pmatrix} R_x \\ R_y \\ R_z \end{pmatrix} = A^T \begin{pmatrix} R_x \\ R_y \\ R_z \end{pmatrix} = A^T \begin{pmatrix} X - X_s \\ Y - Y_s \\ Z - Z_s \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \\ 2) \end{pmatrix}$$

Подставив выражения проекций векторов r и R из (31) и (32) в (30), будем иметь:

$$\begin{aligned} x - x_0 &= z \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} = z \frac{X^*}{Z^*} \\ y - y_0 &= z \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} = z \frac{Y^*}{Z^*} \end{aligned} \quad (33)$$

Формулы (28) и (33) справедливы при любых значениях элементов ориентирования снимка.

Пусть $x_0 = y_0 = 0$, $X_s = Y_s = 0$, $Z_s - Z = H$, тогда при условии расположения осей как на рис. 24 (снимок можно считать горизонтальным) формулы (28) и (33) будут выглядеть следующим образом:

$$X = H \frac{x^0}{f}, \quad Y = H \frac{y^0}{f}. \quad (34)$$

$$x^0 = X \frac{f}{H}, \quad y^0 = Y \frac{f}{H}, \quad (35)$$

где x^0, y^0 – координаты точки горизонтального снимка.

$$t = 90^\circ, \chi = 0.$$

Предположим теперь, что снимок наклонный, но при этом Матрица преобразования координат A будет иметь вид:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varepsilon & -\sin \varepsilon \\ 0 & \sin \varepsilon & \cos \varepsilon \end{pmatrix} \quad (36)$$

И при указанных выше условиях ($x_0 = y_0 = 0$, $X_s = Y_s = 0$, $Z_s - Z = H$), получим:

$$X = H \frac{x}{f \cos \varepsilon - y \sin \varepsilon} \quad Y = H \frac{y \cos \varepsilon + f \sin \varepsilon}{f \cos \varepsilon - y \sin \varepsilon} \quad (37)$$

Уравнения (37) записаны для случая, когда начало координат на местности совмещено с точкой S или N , а на снимке - с главной точкой o . Если же начала координат перенести соответственно в точки C и c , то соотношения станут еще более простыми:

$$X = H \frac{x}{f - y \sin \varepsilon} \quad Y = H \frac{y}{f - y \sin \varepsilon} \quad (38)$$

При условии, что за начало координат на местности принята точка N , а на снимке – соответствующая ей точка надира n , справедливы следующие соотношения;

$$X = H \frac{x \cos \varepsilon}{f - y \sin \varepsilon \cos \varepsilon}, \quad Y = H \frac{y \cos^2 \varepsilon}{f - y \sin \varepsilon \cos \varepsilon} \quad (39)$$

Уравнения (38) и (39) легко получить из соотношения 37 и переносом систем координат на снимке и в пространстве.

Зависимость между координатами точки горизонтального и наклонного снимков

В фотограмметрии часто применяются зависимости между координатами точек горизонтального и наклонного снимков. Их легко получить из уравнений (28) и (34), с учетом того, что $Z_s - Z = H$ и координаты главной точки равны нулю. Левые части этих уравнений выражают одни и те же величины – координаты X и Y точки местности. Поэтому справедливо:

$$X = X_s - H \frac{x a_1 + y a_2 + z a_3}{x c_1 + y c_2 + z c_3} = X_s + \frac{H}{f} x^0,$$

$$Y = Y_s - H \frac{x b_1 + y b_2 + z b_3}{x c_1 + y c_2 + z c_3} = Y_s + \frac{H}{f} y^0.$$

Откуда

$$x^0 = -f \frac{x a_1 + y a_2 + z a_3}{x c_1 + y c_2 + z c_3},$$

$$y^0 = -f \frac{x b_1 + y b_2 + z b_3}{x c_1 + y c_2 + z c_3}. \quad (40)$$

Таким образом, если даны его угловые элементы внешнего ориентирования, то по формулам (40) можно перейти от координат точек на наклонном снимке, к координатам соответствующих точек на горизонтальном снимке. Этот процесс называется трансформированием координат. Они справедливы при любых значениях угловых элементов внешнего ориентирования снимка.

Подставив в уравнения (40) выражения направляющих косинусов из (21), после преобразований с точностью до членов второго порядка малости получим:

$$x^0 = x - \left(f + \frac{x^2}{f} \right) \alpha + \frac{xy}{f} \omega - y \chi$$

$$y^0 = y - \frac{xy}{f} \alpha + \left(f + \frac{y^2}{f} \right) \omega + x \chi \quad (41)$$

Приведенные формулы проще, но они перестали быть строгими.

Строгие и простые соотношения можно написать, если начало координат на снимке и на местности совместить с точкой нулевых

искажений s , тогда с учетом уравнений (34) и (38) получим:

$$x^0 = \frac{x}{1 - \frac{y}{f} \sin \varepsilon}, \quad y^0 = \frac{y}{1 - \frac{y}{f} \sin \varepsilon}. \quad (42)$$

Масштаб снимка

Масштабом снимка $1/m$ в данной точке по данному направлению называется отношение бесконечно малого отрезка dl на снимке к соответствующему отрезку dL на местности. То есть:

$$\frac{1}{m} = \frac{dl}{dL}. \quad (43)$$

dL
 X
 Y
 S
 dX
 dY
 x
 dx
 y
 o
 dy
 dl
 $\square$
 a
 b

Рис 14. a – горизонтальный отрезок на местности, b -его изображение

Пусть местность равнинная, а начала координат в пространстве и на снимке расположены соответственно в точках S и o , (рис. 14).

Обозначив проекции отрезков dl и dL на соответствующие координатные оси через dx , dy и dX , dY , с учетом данного определения масштаба и рис. 32 напишем:

$$\frac{1}{m} = \frac{dx}{\cos \varphi \sqrt{dX^2 + dY^2}} \quad (44)$$

где φ – угол между осью x снимка и заданным направлением отрезка dl .

При указанном выборе систем координат, и при условии, что оси ординат расположены в плоскости главного вертикала, справедливы

уравнения (37) зависимости между координатами точек местности и снимка. Продифференцируем их по переменным x и y , в результате получим:

$$dY = \frac{H dy}{f \left(\cos \varepsilon - \frac{y}{f} \sin \varepsilon \right)^2}; \quad dX = H \frac{\left(\cos \varepsilon - \frac{y}{f} \sin \varepsilon \right) dx + \frac{x}{f} \sin \varepsilon dy}{f \left(\cos \varepsilon - \frac{y}{f} \sin \varepsilon \right)^2}.$$

Введём обозначение:

$$k = \cos \varepsilon - \frac{y}{f} \sin \varepsilon, \quad p = \frac{x}{f} \sin \varepsilon,$$

и учтем, что $dy = dx \operatorname{tg} \varphi$, тогда

$$dY = \frac{H dx}{f k^2}, \quad dX = -\frac{H (k + p \operatorname{tg} \varphi) dx}{f k^2}, \quad (45)$$

Подставив выражения dX и dY из соотношений (45) в формулу (44), будем иметь:

$$\frac{1}{m} = \frac{f k^2}{H \sqrt{\sin^2 \varphi + (k \cos \varphi + p \sin \varphi)^2}} \quad (46)$$

Полученное равенство показывает, что масштаб снимка зависит от фокусного расстояния АФА, высоты фотографирования, угла наклона снимка, положения точки на снимке (координат x и y), в которой взят элемент dl и от направления φ этого элемента относительно линии главного вертикала vv .

Определим значение масштаба $1/m$ для частных случаев.

1. Масштаб горизонтального снимка ($\varepsilon = 0$). Подставив это значение в формулу (46), с учетом принятых обозначений k и p получим:

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{H},$$

т. е. масштаб горизонтального снимка плоской местности во всех точках постоянный.

2. Масштаб наклонного снимка по направлению главной вертикали ($x = 0$, $\varphi = 90^\circ$):

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{H} \left(\cos \varepsilon - \frac{y}{f} \sin \varepsilon \right)^2 \quad (47)$$

На основании уравнения (47) запишем значение масштаба $1/m$ в характерных точках, лежащих на линии главного вертикала:

В главной точке снимка o ($y = 0$)

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{H} \cos^2 \varepsilon$$

;

$$\left(y = -f \operatorname{tg} \frac{\varepsilon}{2} \right)$$

В точке нулевых искажений c , поэтому:

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{H}$$

;

$$(y = -f \operatorname{tg} \varepsilon)$$

В точке надира n , после подстановки получаем:

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{H \cos^2 \varepsilon}$$

;

$$l \ (y = f \operatorname{ctg} \varepsilon)$$

В главной точке схода

$$\frac{1}{m} = 0$$

.

Таким образом, масштаб в точке нулевых искажений равен, в главной точке мельче, а в точке надира крупнее масштаба горизонтального снимка. Масштаб в точке нулевых искажений называется главным масштабом снимка.

3. Масштаб наклонного снимка по направлению горизонтали ($\varphi = 0^\circ$)

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{H} \left(\cos \varepsilon - \frac{y}{f} \sin \varepsilon \right) \quad (48)$$

Поскольку в уравнении абсцисса точки отсутствует, то вдоль горизонтали, если местность равнинная, масштаб величина постоянная.

Запишем выражения $1/m$ для горизонталей, проходящих через характерные точки снимка:

$$h_l \ h_l \ (y = f \operatorname{ctg} \varepsilon)$$

По линии действительного горизонта, поэтому:

$$\frac{1}{m} = 0$$

;

$$h_0 \ h_0 \ (y = 0)$$

Вдоль главной горизонтали, после подстановки имеем:

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{H} \cos \varepsilon$$

$$h_c h_c \left(y = -f \operatorname{tg} \frac{\varepsilon}{2} \right)$$

На линии неискажённого масштаба, значит

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{H}$$

По горизонтали $h_n h_n$, проходящей через точку надира $n (y = -f \operatorname{tg} \varepsilon)$, и:

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{H \cos \varepsilon}$$

Выполненный анализ показал, что масштаб снимка в точке с по любому направлению равен масштабу горизонтального снимка.

Смещение точек и искажение направлений, вызванное наклоном снимка

Из формулы 42 следует справедливость пропорции:

$$\frac{x^0}{x} = \frac{y^0}{y}$$

с
 x^0
 y^0
 y
 x
 r
 r^0
 $\square r$
 y
 x

Рис.33 Совмещенный чертеж

□

А это означает, что если наклонный снимок совместить с горизонтальным, вращением его вокруг линии неискаженных масштабов (рис. 33.) то соответствующие точки окажутся на одном луче, проходящем через точку нулевых искажений с.

Разность

$$\delta r_\varepsilon = r - r^0 \quad (49)$$

называется смещением точки за наклон снимка. И понятно, что направлено оно вдоль луча, проходящего через точку с.

Очевидно, что в выше приведенную пропорцию между координатами можно включить отношение r^0/r , тогда, с учетом соотношений (42), и того что $x = r \sin \varphi$

, будем иметь:

$$r^0 = \frac{r}{1 - \frac{r \sin \varphi \sin \varepsilon}{f}}$$

;

Подставив это равенство в уравнение (49), после преобразований получим:

$$\delta r_\varepsilon = -\frac{r^2 \sin \varphi \sin \varepsilon}{f - r \sin \varphi \sin \varepsilon} \approx -\frac{r^2 \sin \varphi \sin \varepsilon}{f} \quad (50)$$

Из формулы (50) видно, что смещение δr_ε возможно как в сторону точки нулевых искажений, при $\varphi(0^\circ, 180^\circ)$, так и в противоположную сторону. Максимально оно на главной вертикали (φ равно 90° или 270°). На линии неискаженных масштабов точки за наклон не смещаются.

Величина смещения зависит и от фокусного расстояния снимка. С его увеличением она уменьшается. Для планового снимка ($\varepsilon \leq 3^\circ$) величину максимального смещения точек можно оценивать по приближенной формуле:

$$\delta r_\varepsilon = -\frac{r^2}{f} \varepsilon \quad (51)$$

Оно приводит к ошибкам в определении по снимкам направлений, расстояний и площадей.

На рис. 33, кроме того, видно, что не изменился и угол α , значит, если вершиной горизонтальных углов местности будет точка С, то на снимке они не искажаются.

Рассмотрим еще раз совмещенный чертеж (рис 34), введя дополнительно линию Ea на наклонном снимке и, соответствующую ей линию, на горизонтальном снимке. Как было показано, точки на линии неискаженных масштабов не смещаются, что относится и к точке E , а точка a^0 изменила свое положение. В результате изменилось направление Ea^0 на угол δA . Этот угол и называют искажением горизонтального направления на наклонном снимке. Не трудно заметить (рис.34), что $tg \delta A = \delta r / Ea$

, и с учетом приближенного соотношения (50), а также того, что $Ea = r \cos \varphi$, получим

$$tg \delta A = \frac{r \cos \varphi \sin \varepsilon}{f} \quad (52)$$

у
х
Е
а
а°
r
r
A

Рис. 34 Искажение направления на наклонном снимке

Формула (52) подтверждает, что направления не искажаются, если они проходят через точку нулевых искажений (т.е. при $r=0$), а также показывает, что и направления горизонталей не искажены ($\alpha=90^\circ$). Искажение максимально при $\alpha=90^\circ$. И если снимок плановый, то его можно оценить по приближенной формуле:

$$\Delta A = r \sin \alpha / f \quad (53)$$

Смещение точек и направлений на снимке, вызванное рельефом местности

Рельеф местности также вызывает смещение точек, причем по направлениям проходящим через точку надира n , в которую сходятся изображения отвесных прямых. То есть, если h - превышение точки A над точкой B , расположенной в плоскости предмета, и отрезок AB отвесный, то точка a на снимке сместится относительно точки b на величину $ab = \delta r_h$ (рис. 35). При $h > 0$ смещение происходит от точки надира, когда $h < 0$, – к точке надира.

Предположим, что снимок является горизонтальным, тогда $SN=H$, $Sn=f$, и если отрезок ab на снимке обозначить через r , то из прямоугольных треугольников можно составить следующие пропорции:

$$\frac{\delta r_h}{A_0 B} = \frac{f}{H}, \quad \frac{A_0 B}{h} = \frac{A_0 N}{H}, \quad \frac{A_0 N}{r} = \frac{H}{f}$$

Теперь, путем последовательной подстановки получаем:

$$\delta r_h = \frac{r h}{H} \quad (54)$$

Можно доказать, что полученная формула дает хорошую оценку величины смещения точек за рельеф и для плановых снимков. Значит, по измеренной на плановом снимке величине смещения δr_h можно в ряде случаев с достаточной для практики точностью определить высоту отдельных объектов (дерева, столба, здания, трубы и т. д.).

S
n

A_o

A

a

b

Рис. 36 Искажение за рельеф

h

d

$\square$

B

a_o

$\square A$

$\square$

S

n

N

B

A

a

b

Рис. 35 Смещение за рельеф

h

A

B

N

A_o

Смещение точек за рельеф приводит на снимке и к искажению направлений отрезков, иногда довольно значительному. Для простоты рассмотрим горизонтальный снимок, на котором изображены отрезок AB и его горизонтальная проекция A_oB (рис.36). Искажением направления за рельеф является угол $\square A$. В соответствии с теоремой синусов (треугольник aa_ob), имеем:

$$\sin \delta A = \frac{\delta r \sin \varphi}{ba_o}$$

Обозначим отрезок an через r , тогда очевидно aa_o – смещение $\square r_h$ точки A за рельеф. Из рис. 36 следует, что $\sin \square = d/r$ и $A_oB = h/tg \square$, тогда, с учетом того, что $a_ob = fA_oB/H$ и формулы (54), получим:

$$\sin \delta A = \frac{d}{f} \operatorname{tg} \nu \approx \frac{d}{f} \nu \quad (55)$$

Анализ формулы (55) показывает, что при $d=f$ искажение направления отрезка может оказаться равным его углу наклона.

Определение элементов внешнего ориентирования снимка

Для решения ряда фотограмметрических задач необходимо знать элементы ориентирования снимка.

Его элементы внешнего ориентирования могут быть получены либо с помощью специальных приборов в процессе аэрофотосъёмки либо в камеральных условиях по геодезическим и фотокоординатам опорных точек. Второй вариант назвали обратной пространственной фотограмметрической засечкой. Математической основой ее решения являются прямые или обратные уравнения коллинеарности.

Рассмотрим один из возможных способов математического решения засечки, основанный на применении уравнений (33).

Пусть на снимке изобразились точки местности, геодезические координаты которых известны (такие точки называют опознаками), и координаты x , y этих точек определены по данным измерений снимка. Примем, что элементы внутреннего ориентирования снимка даны. Тогда неизвестными величинами в формулах (33) окажутся координаты X_s , Y_s , Z_s центра проекции снимка и три угла α, ω, χ .

Указанные уравнения нелинейны по отношению к неизвестным, поэтому последние определяются способом приближений. То есть, вначале из каких-либо соображений принимают приближенные значения неизвестных, а затем определяют поправки к ним, используя технику уравнивания параметрическим способом. Таким образом, задачу решают следующим образом:

1. Определяют приближенные значения элементов внешнего ориентирования снимка. Например, угловые величины принимают равными нулю, а координаты центра проекции определяют по данным бортовых измерений или каким-либо другим способом.

2. Выполняют измерение с целью определения координат x и y опознаков на снимках.

3. Приближенные значения элементов внешнего ориентирования, а также элементы внутреннего ориентирования и заданные координаты опознаков подставляют в уравнения (33) и вычисляют координаты x^j и y^j изображений опознаков на снимке. В силу погрешностей измерений, неточности приближенных величин, принятых в качестве неизвестных, и других причин вычисленные координаты не будут равны измеренным.

4. Составляют уравнения поправок, принимая разности l между измеренными и вычисленными координатами точек на снимке в качестве их свободных членов. Указанные уравнения будут иметь вид:

$$\begin{aligned} a\delta X_s + b\delta Y_s + c\delta Z_s + d\delta\alpha + e\delta\omega + g\delta\chi + l_x &= v_x \\ a'\delta X_s + b'\delta Y_s + c'\delta Z_s + d'\delta\alpha + e'\delta\omega + g'\delta\chi + l_y &= v_y \end{aligned} \quad (56)$$

где $\delta X_s, \delta Y_s, \dots, \delta\chi$ – поправки в приближённые значения элементов внешнего ориентирования снимка; $l_x = x - x^*$; $l_y = y - y^*$; v_x, v_y – поправки в измеренные координаты x, y . Численные значения коэффициентов $a, b, \dots, g'$ уравнений (56) вычисляются как частные производные функций x, y (уравнения 33) по соответствующим переменным. Например:

$$a = \frac{\partial x}{\partial X_s} = z \frac{a_3 X^* - a_1 Z^*}{(Z^*)^2}$$

и т.д.

Система уравнений (56) содержит шесть неизвестных. Один опознак позволяет составить два уравнения, поэтому для решения задачи их должно быть не менее трех.

5. При избыточном количестве опознаков система линейных уравнений решается при условии

$$V^T P V = \min$$

где P – матрица весов измеренных координат точек снимка.

То есть составляют и решают нормальные уравнения. Для системы (56) они имеют вид:

$$(B^T P B) \delta + B^T P l = 0, \quad (57)$$

где B – матрица коэффициентов $a, b, \dots, g'$ для опорных точек снимка; $\delta = \delta X_s, \delta Y_s, \dots, \delta\chi$ – вектор поправок; l – вектор свободных членов уравнений (56).

Решая уравнения (57), определяют вектор поправок

$$\delta = -(B^T P B)^{-1} B^T P l. \quad (58)$$

6. Вводят поправки δ к приближённым значениям элементов внешнего ориентирования, получают уточнённые значения неизвестных. Поскольку исходная система (35) нелинейная, а приближённые значения могут существенно отличаться от искомых величин, вычисления повторяют, начиная с пункта 3, и продолжают их до тех пор, пока разность векторов δ двух последних приближений не станет меньше установленного допуска. Такой путь решения называют методом итераций.

Выполняют оценку точности решения задачи. Для этого в последнем приближении вычисляют весовые коэффициенты Q и поправки V . Средние квадратические ошибки элементов вычисляют по формуле:

$$m = \mu \sqrt{Q_{ii}} \quad (59)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots, 6$ – номер поправки δ в уравнениях (56).

Ошибка единицы веса находят из соотношения

$$\mu = \sqrt{\frac{P_x v_x^2 + P_y v_y^2}{2n - 6}} \quad (60)$$

где n – число опорных точек.

Иногда, например, при калибровке камер, возникает задача определения элементов внутреннего ориентирования снимка. В этом случае необходимо дополнить матрицу δ поправками $\delta x_0, \delta y_0, \delta f$, а матрицу B –

коэффициентами h, m, n, h', m', n' при определяемых поправках. Поскольку количество неизвестных увеличивается до 9, число опознаков необходимых для решения задачи, должно быть не менее 5, а ошибка единицы веса должна определяться по формуле:

$$\mu = \sqrt{\frac{P_x v_x^2 + P_y v_y^2}{2n - 9}} \quad (61)$$

Следует иметь в виду, что при аэрофотосъёмке равнинной местности включение дополнительных неизвестных в систему уравнений поправок приводит к ухудшению обусловленности матрицы системы нормальных уравнений. Это приводит к снижению точности определения искомых величин.

Технические средства аэро и наземной фотосъёмки

Летательные аппараты

Аэрофотосъёмка производится с самолёта АН-30, ИЛ-14ФК, АН-2, Л-410 или вертолёта, например, К-26.

Практический потолок полёта самолёта АН-30 - 8000 м. Его редняя крейсерская скорость равна 440 км/час. Кабины самолёта герметизированы. Он используется для аэрофотосъёмки в средних и мелких масштабах.

Самолёт ИЛ-14ФК предназначен для аэрофотосъёмки в средних масштабах. Его практический потолок полёта - 5600 м. Средняя крейсерская скорость - 300 км/час.

Практический потолок полёта самолёта АН-2 - около 5000 м. Средняя крейсерская скорость - 180 км/час. Он используется для аэрофотосъёмки в крупных масштабах.

Вертолёт К-26 применяется для аэрофотосъёмки небольших участков местности в крупных масштабах. Максимальная высота полёта - 3100 м. Крейсерская скорость - 140 км/час.

Фотографирование небольших участков местности иногда выполняют с минисамолётов, подвесных аэростатов, радиоуправляемых авиамodelей и др. летательных аппаратов. При съёмке из космоса носителем фотографирующей системы является космический аппарат.

Аэрофотоаппараты

Аэрофотоаппарат (АФА) служит для получения аэрофотоснимков земной поверхности. Он представляет собой сложную фотографическую систему, отфокусированную на бесконечность и работающую автоматически в сложных условиях вибраций, толчков и перегрузок.

АФА, применяемые при аэрофотосъёмке, классифицируются по целевому назначению, принципу действия, размерам аэроснимка, величине фокусного расстояния и типу используемых фотоматериалов.

По целевому назначению они подразделяются на топографические и нетопографические.

Топографическими называются АФА, которые обеспечивают получение аэроснимков с высокими измерительными и изобразительными свойствами. Они имеют строгие оптические характеристики объектива, жёсткую конструкцию, гарантирующую неизменность его констант, и надёжную систему выравнивания аэрофотоплёнки в плоскость в момент фотографирования. Важно, что на снимках, полученных топографическими АФА можно ввести прямоугольную систему координат.

Нетопографические АФА отличаются тем, что их конструкция не гарантирует выполнения выше указанных свойств. При картографировании они практически не применяются и используются только для дешифрирования объектов местности.

Аэрофотоаппараты бывают цифровые и нецифровые. У первых в качестве сенсора используются ПЗС линейки. Они начали появляться на рынке только с 2000 года, и пока широкого применения не имеют. Нецифровые АФА по принципу действия бывают кадровыми, щелевыми и панорамными. Все нецифровые топографические АФА – кадровые.

Выпускаемые отечественной промышленностью АФА по размеру кадра, могут быть разделены на две группы: стандартные 18×18 см. и широкоформатные 30×30 см. Все топографические АФА имеют аэрофотоснимки стандартного формата. Западноевропейский стандарт снимков - 23×23 см.

По величине фокусного расстояния АФА подразделяются на короткофокусные ($f < 150$ мм), среднефокусные ($f = 150-300$ мм) и длиннофокусные ($f > 300$ мм), или соответственно - на узкоугольные, нормальные и широкоугольные.

Фотографирование может осуществляться на фотопленку или на стеклянную фотопластинку. Но второй вариант встречается крайне редко.

Несмотря на большое разнообразие, все топографические АФА имеют ряд общих частей и элементов. Схема его устройства показана на рис. 19. Он имеет фотокамеру 1 и кассету 2, как правило, съемную.

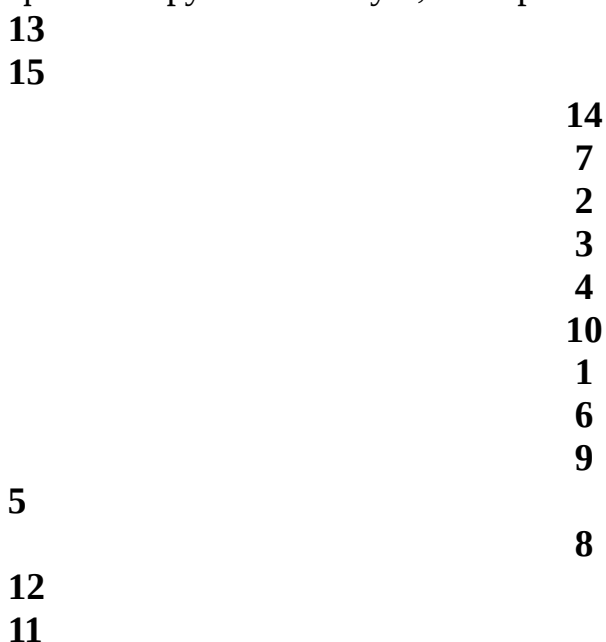


Рис. 19

S_2

S_1

Фотоаэрофотоаппарат состоит из корпуса 5, объективного блока 6 и прикладной рамки 7, к которой в момент экспонирования должен прижиматься эмульсионный слой фотоматериала. В нижней части объективного блока смонтирован объектив 8. Расстояние от задней узловой точки S_2 объектива до плоскости прикладной рамки 7 постоянно и равно фокусному расстоянию АФА. Между компонентами объектива установлены диафрагма 9 и центральный многодисковый затвор. Конструкции затворов рассчитаны на диапазон выдержек от 1/50 до 1/1000 сек. и меньше.

Для надежного выравнивания аэрофотопленки в плоскость прикладной рамки устанавливается выравнивающие плоскопараллельное стекло 10. На нем выгравированы координатные метки, контрольные линии или координатная сетка в виде крестов, с промежутками в 1 или 2 см. В нижней части фотокамеры под объективом устанавливается защитное стекло 11, а между защитным стеклом и объективом – светофильтры 12.

Кассета служит для размещения аэрофотопленки и предохранения ее от воздействия света. В ней есть механизмы для выравнивания пленки в плоскость и ее перемотки (направляющие валики, сматывающая 13 и наматывающая 14 катушки).

Выравнивание осуществляется пружинным столом кассеты 15 путем прижима пленки к плоскости выравнивающего стекла. Если его нет, то создается дополнительное давление в фотокамере или вакуум в кассете, и пленка прижимается к рабочей поверхности прижимного стола. В этом

случае система координат снимка (плоскости изображения) и положение его главной точки определяются координатными метками прикладной рамки 7.

Для удобства перезарядки и эксплуатации у большинства АФА кассеты легко отделяются от корпуса. На катушке кассеты размещается до 120 м 18×18 см

аэрофотопленки, что позволяет при формате кадра получить до 560 фотоснимков.

В нашей стране наиболее распространены аэрофотоаппараты: АФА-ТЭ, АФА-ТЭС, АФА 41, ТАФА.

АФА-ТЭ (топографический, электрический) имеют объективы с фокусными расстояниями 55-500 мм. Плёнка выравнивается в плоскость вакуумным способом. Диапазон выдержек до 1/300 – 1/400 с.

АФА-ТЭС и АФА-41 являются модернизацией АФА-ТЭ. АФА-ТЭС выпускаются с объективами, имеющими фокусные расстояния 50, 72 и 100 мм. Выравнивание фотоплёнки в плоскость осуществляется путём её прижима к стеклу, помещённому в фокальной плоскости объектива. Диапазон выдержек до 1/700 – 1/850 с. Цикл работы фотокамер от 1,2 до 2,4 с.

АФА-41 предназначен для аэрофотосъёмок с высот до 20 км. У АФА-42 размер кадра 30×30 см.

В ГП «Аэрогеодезия» для получения высококачественного фотографического изображения местности применяют АФА-ТК-21/23 (размер кадра 23×23 см). Он может работать синхронно со спутниковым приёмником. Комплект АФА состоит из 4 блоков: пульт управления, электронный блок, кассетный баул (2 шт.) и оптико-механический блок (камера). Фокусное расстояние камеры 210 мм. Возможно, они изготавливаются и с фокусами 150 мм и 300 мм.

Разрешающая способность аэроснимков в среднем 40-50 мм⁻¹ в центре и 20-25 мм⁻¹ на краю. Дисторсия объективов различных фотокамер изменяется от 10 до 30 мкм.

За рубежом топографические аэрофотоаппараты выпускают фирмы Германии, Швейцарии, США и других стран. В нашей стране используются АФА MRB и LMK (Карл Цейсс), RMC (Оптон, ФРГ), RC-10 (Вильд, Швейцария). Формат их кадра 23×23 см.

Вспомогательное аэрофотосъёмочное оборудование.

Для топографической аэрофотосъёмки с летательного аппарата кроме АФА используется аэрофотоустановка 4 (рис. 19), оптический визир и командный прибор 3.

Аэрофотоустановка (АФУ) служит для крепления АФА к носителю съёмочной аппаратуры. Она обеспечивает получение плановых снимков и позволяет: осуществлять разворот АФА вокруг его оси; изменять положения оптической оси камеры в пространстве; предохранять АФА от ударных нагрузок при взлёте и посадке самолёта или вертолёт; уменьшать вибрации. Для автоматического горизонтирования и ориентирования камеры применяют

гиростабилизирующую установку, обеспечивающую получение аэрофотоснимков с углом наклона, не более 1° .

Оптический визир предназначен для определения в полёте интервала воздушного фотографирования и угла отклонения (угла сноса) летательного аппарата от намеченного маршрута.

Командный прибор (КП) служит для дистанционного управления работой фотокамеры. С его помощью устанавливается интервал между экспозициями, выдержка затвора, ведётся счёт кадров.

Спуск затвора фотокамеры осуществляется электрическим импульсом, посылаемым КП. Используют два их типа. Один выдерживает постоянным интервал фотографирования, другой – заданный процент продольного перекрытия. Первый тип КП применяют при аэрофотосъёмке равнинной и всхолмленной местности, второй – при аэрофотосъёмке горной местности. Он позволяет изменять интервал фотографирования пропорционально изменению высоты фотографирования. Более совершенным является электронный командный прибор (ЭКП), позволяющий по данным изменения путевой скорости и высоты полёта с учётом заданного продольного перекрытия изменять величину интервала фотографирования. Вычисляется также угол сноса и отрабатывается сигнал на разворот АФА на этот угол. Последние конструкции гиростабилизирующей установки позволяют по командам ЭКП автоматически разворачивать АФА на угол сноса с точностью 45° .

Для ослабления при аэрофотосъёмке влияния дымки АФА снабжаются светофильтрами ЖС-18, ЖС-16, ОС-14, ОС-12 и КС-14. Их применение приводит к увеличению выдержки и уменьшению в связи с этим исходного контраста некоторых природных объектов. Поэтому подбираются они в зависимости от высоты полёта, природных условий фотографирования и типа применяемой аэроплёнки.

Большинство аэрофотосъёмок производится на чёрно-белые изопанхроматические плёнки различных типов. Они имеют светочувствительность от 100 до 3000 единиц ГОСТа, коэффициент контрастности от 1,5 до 3,5, разрешающую способность R от 65 до 250 мм^{-1} .

Наиболее универсальны изопанхроматические аэроплёнки средней чувствительности Т-17 (тип 17), Т-20, Т-22, Т-27, Т-33. Их светочувствительность порядка 500 единиц ГОСТа, разрешающая способность до 160 мм^{-1} , коэффициент контрастности 1,5-2,0 и фотографическая широта до 1,2-1,5.

При фотографировании АФА со светосильными объективами ярких малоконтрастных объектов целесообразно использовать низко чувствительную аэроплёнку, например, Т-28. Её светочувствительность 180 единиц ГОСТа, но преимуществом является высокая разрешающая способность (порядка 250 мм^{-1}) и повышенный коэффициент контрастности.

Инфрахроматические аэроплёнки используются довольно редко вследствие низкой общей чувствительности и нестабильности. На них

хорошо изображается растительность и дешифрируются небольшие различия во влажности объектов.

Отечественная промышленность выпускает также спектрозональные аэроплёнки СН-6, СН-2М и СН-8 с панхроматическим и инфрахроматическим слоями. Изображение местности на них получается в условных цветах: длинноволновой части видимого спектра соответствует пурпурный цвет, а инфракрасной области – голубой. Спектрозональная аэроплёнка объединяет преимущества, имеющиеся у инфрахроматической и цветной плёнок. Она позволяет уменьшить влияние воздушной дымки, чётко выделяет урез воды, передаёт различие во влажности и растительном покрове. При аэрофотосъёмке на спектрозональную плёнку применяют светофильтры (ОС-14, КС-14 и ЖС-16).

Цветные аэроплёнки позволяют получать изображение местности в цветах, близких к естественным. В аэрофотографии для получения цветных аэроснимков используются в основном трёхслойные фотографические материалы с цветным проявлением, например, аэроплёнка ЦН-3. Она имеет светочувствительность 80-100 единиц ГОСТа, разрешающую способность $50-60 \text{ мм}^{-1}$, коэффициент контрастности 0,8-1,0, фотографическую широту 0,9. Но все характеристики плёнки ЦН-3 значительно менее благоприятны для аэросъёмки, чем у чёрно-белых и спектрозональных аэроплёнок.

В процессе аэрофотосъёмки с помощью специальных приборов могут быть определены превышения, высоты и координаты точек фотографирования, а также углы наклона снимков. Использование таких дополнительных данных приводит к сокращению объёма полевых геодезических работ, а значит к повышению эффективности применения аэрофотоснимков, как для создания топографических карт, так и для решения инженерных задач.

Статоскоп представляет собой дифференциальный жидкостной барометр, измеряющий изменение давления воздуха, при изменении высоты полёта. При аэрофотосъёмке используются статоскопы С-51 и С-51М. В них положения уровней жидкости фиксируются фоторегистратором с помощью подсветки в момент срабатывания затвора АФА. По данным измерения давления в точках фотографирования вычисляют изменение высоты фотографирования относительно изобарической поверхности. Точность определения разности высот фотографирования зависит главным образом от состояния этой поверхности. На высотах ниже 1 км увеличиваются ошибки за счёт неустойчивости атмосферы, а на высотах выше 3 км чувствительность прибора уменьшается из-за разрежённости атмосферы. Средние квадратические ошибки определения превышений точек фотографирования по показаниям статоскопа колеблются в пределах 0,6-1,5 м.

Радиовысотомер (РВ) служит для определения высот точек фотографирования относительно земной поверхности. Принцип его работы основан на измерении времени t прохождения радиоволной расстояния D от

передатчика до ближайшей точки местности и обратно к приёмнику. Расстояние D вычисляется по формуле:

$$D = 0,5 v t \quad (13)$$

где v – скорость распространения радиоволны.

Значение D высвечивается либо на круговой шкале, расположенной на экране электронно-лучевой трубки и автоматически фиксируются фоторегистратором на плёнку, либо в цифровом виде с помощью индикаторных ламп. В случае плоской местности расстояние, измеренное радиовысотометром, равно высоте фотографирования H .

Точность определения высот фотографирования РВТД-А существенно зависит от характера местности. При съёмке водной и открытой равнинной поверхности она равна 1,2 м. В горной местности возникают сложности в нахождении точек отражённого импульса, что приводит к погрешности определения высот до 5 и более метров.

От этого недостатка свободны лазерные высотомеры, обладающие узкой диаграммой направленности излучателя и мощными импульсами. Они бывают непрерывного и импульсного действия. Испытания лазерного высотомера показали, что точность определения им высот фотографирования несколько выше, чем у радиовысотомера. Лазерные высотомеры непрерывного излучения входят в состав аэропрофилографов, которые позволяют определять высоты точек местности с точностью 1-3 м.

Радиодальномерная станция (РДС) используется для определения плановых геодезических координат центров проекций аэрофотоснимков. Комплект состоит из двух-трёх наземных и одной самолётной станций. Наземные станции устанавливают в районе аэрофотосъёмки и привязывают к пунктам геодезической сети. Во время фотосъёмки самолётная станция непрерывно находится в радиосвязи с наземными станциями, и в момент срабатывания затвора АФА фоторегистратор фиксирует её показания. Расстояние от задающей радиостанции, расположенной на самолёте, до наземных находят по разности фаз. Точность определения координат равна 5-8 м при расстояниях до 350 км.

В последние годы в аэрофототопографии все более широко применяют спутниковые методы определения координат, как точек полевой подготовки, так и точек фотографирования.

Углы наклона аэрофотоснимка определяются по фотографиям линии горизонта, Солнца и звёзд, полученным с помощью камеры горизонта и солнечного перископа. Однако из-за невысокой точности их определения и усложнения конструкции съёмочной аппаратуры эти приборы не получили широкого применения при аэрофотосъёмке.

С 1980 года в АФА начала применяться цифровая электроника. Но с появлением портативных компьютеров и глобальных навигационных систем создавалась уже не просто аэрофотоаппаратура, а целые аппаратно-программные комплексы. Пример – аэрофотосъёмочный комплекс фирмы LН

Systems. Он включает АФА RC-30, объективы – 15/4 UAG-S (фокус 153 мм, угол поля зрения 90°) или 30/4 NAT-S (фокус 303 мм, угол поля зрения 55°), гиростабилизированную платформу - PAV30, систему управления и контроля съемки- ASCOT с самолетной GPS станцией и программное обеспечения пост-обработки данных - Flycin Suite+.

АФА RC-30 имеет прямой интерфейс с бортовой навигационной системой, позволяет автоматически аннотировать кадры в процессе съемки и проводить коррекцию. Сама камера является модульной. Необходимые компоненты – устройства транспортировки фильма и устройства компенсации сдвиги изображения – входят в центральный управляющий блок. Сменные модули: объективы и кассеты для фильма. В процессе съемки камерой управляют микропроцессор, и программное обеспечение. Диапазон продольного перекрытия снимков регулируется от 1% до 99% с шагом 1%. Автоматический измеритель экспозиции РЕМ-F специально разработан и оптимизирован для аэрофотосъемки и обеспечивает корректную экспозицию при полетах над любым типом местности, на разных высотах носителя и с любым типом пленки. В процессе фотографирования в негатив можно впечатывать любые из 200 символов по выбору пользователя, например: масштаб, координаты центра проекции, дату, время, текущий номер снимка, тип пленки и т.д.

Сменные объективы для камеры RC-30 изготавливаются с высоким качеством. Их разрешение $110-115 \text{ мм}^{-1}$. Камера имеет 8 координатных меток на стекле. Диапазоны выдержек: затвора – $1/100 - 1/1\ 000$, диафрагмы – $1/4 - 1/22$.

Вообще съемочные камеры должны обладать высокими измерительными и изобразительными качествами, которые подлежат проверке на фотограмметрическом тест-объекте в лабораторных условиях или на испытательном фотограмметрическом полигоне. Относительная средняя квадратическая погрешность определения высот точек местности

при обработке снимков испытательного полигона должна быть не менее $1/10\ 000$, а средняя квадратическая погрешность определения плановых координат - не более 15 мкм в масштабе снимка. Средняя квадратическая

величина искажений координат X Y крестов контрольной сетки из-за нелинейной составляющей деформации аэропленки и невыравнивания ее в плоскость для форматов 18x18 см, 23x23 см и 30x30 см не должна превышать 8 мкм, 10 мкм и 14 мкм соответственно. Разрешающая способность по полю изображения снимка не должна быть меньше той, что установленной в ТУ на фотокамеру.

Если используются данные спутниковых систем, следует учесть, что они отнесены к общеземным эллипсоидам WGS-84 (для GPS) или ПЗ-90 (для ГЛОНАСС). Топографо-геодезические работы в России выполняются в системе координат конформной поперечно-цилиндрической проекции, рассчитанной на референц-эллипсоиде Ф.Н.Красовского (в системах

координат СК-42 или СК-95). Из-за различия параметров названных эллипсоидов, а также различий в положении начала систем координат и ориентации их осей возникает необходимость корректировки данных GPS и ГЛОНАСС. Такая корректировка выполняется по указаниям и с помощью программных средств, предназначенных специально для этих целей. Важно чтобы точность спутниковых определений соответствовала измерительной точности снимков.

В соответствии с основными положениями [] договором на выполнение аэросъемочных работ должны быть определены:

Масштабы аэрофотосъемки и составляемого плана.

Тип и фокусное расстояние АФА.

Необходимость применения специальных приборов (статоскопа, радиовысотомера и др.). Отметим, что в настоящее время не вызывает сомнений необходимость применения при аэрофотосъемке и привязке снимков спутниковых систем.

Сроки производства аэрофотосъемки и сдачи продукции.

Состояние местности.

Какие то особенности аэрофотосъемки могут устанавливаться заказчиком по согласованию с исполнителем.

В основных положениях определены требования к проложению аэрофотосъемочных маршрутов, фотограмметрическому и фотографическому качеству материалов аэрофотосъемки, аэрофотоаппаратуре, оформлению и сдаче материалов заказчику, правила приемки и оценки их качества, а также приведены основные технические характеристики рекомендуемых АФА и аэропленок.

Особенности, которые нужно учитывать при проектировании лётно-съемочных работ и являющиеся следствиями теории фотограмметрии, состоят в следующем:

ошибка определения высоты по паре снимков, зависит от высоты фотографирования, а значит, при заданном ее масштабе, нужно лететь пониже и использовать АФА с фокусом поменьше (70, 100 мм);

широкоугольными АФА не следует фотографировать застроенные территории, особенно, если этажность зданий и плотность застройки велики;

при прочих равных условиях смещение за рельеф обратно пропорционально фокусному расстоянию АФА, значит, лететь следует повыше, если проектом предусмотрено составление фотоплана (выбирают АФА в основном с фокусом 200, 350 и 500 мм);

в процессе проектирования аэрофотосъемки нужно учитывать допустимый коэффициент перехода от ее масштаба к масштабу составляемого плана, который зависит не только от конструктивных особенностей обрабатывающего прибора, но и от разрешающей способности аэроснимков.

В целом можно сказать, что если проектом предусмотрено определять высоты точек местности по фотоснимкам, а картографируемая территория плоско-равнинная, то следует использовать широкоугольные или

сверхширокоугольные камеры. Для предгорных и горных территорий, застроенной, залесенной местности предпочтительнее нормальноугольные и узкоугольные камеры. При картографировании городов, особенно с многоэтажной застройкой, при выборе камеры следует учитывать величину смещения изображения крыши здания на снимке относительно его основания. С этой точки зрения, а также с учетом повышенных требований к точности определения плановых координат объектов местности наиболее подходящими являются узкоугольные камеры.

В принципе все это обобщено в нормативных требованиях и рекомендациях (например, инструкция [15]), и их можно придерживаться с учетом, конечно, того, что аналоговые стереофотограмметрические приборы практически не применяются на производстве.

Для того, чтобы не учитывать разномасштабность изображений крыш и оснований построек при составлении фотопланов, рекомендуется фокусное расстояние АФА (в мм) подбирать, исходя из неравенства:

$$F_k > Lh/k,$$

Где h – преобладающая высота построек, м; L преобладающая протяженность построек; k – равно 20, 3.2, 0.8 или 0.2 для масштабов 1:5 000, 1:2 000, 1:1 000, 1:500 соответственно.

Иногда аэрофотосъемку производят двумя АФА с кратным соотношением фокусов. По снимкам более крупного масштаба в этом случае выполняют дешифрирование.

При фотографировании значительных территорий преимущественные направления маршрутов: север – юг или запад – восток, правда, при съемке городов более выгодными могут оказаться и другие направления, например параллельные основным проездам. Для уменьшения объема работ по плано-высотной привязке снимков по краям картографируемого участка прокладывают каркасные маршруты. Они перпендикулярны основному направлению аэрофотосъемки.

Следует помнить, что, как правило, отрицательным фактором, снижающим объем полезной информации на снимке, являются листва на деревьях и тени в солнечную погоду.

После фотографирования участка местности полученные материалы изучают и оценивают. При этом проверяют:

полноту и качество аэрофотосъемочных работ;

соответствие фотографического и фотограмметрического качества материалов требованиям нормативно-технических документов [7] и дополнительным условиям, предусмотренным в договоре на выполнение съемок;

полноту паспортных данных использованных съемочных систем (элементы внутреннего ориентирования, дисторсия объектива и др.) и соответствие фактических параметров съемочных камер проектным значениям;

обеспеченность снимками картографируемой территории, ее границ (одновременно составляется схема расположения снимков, подлежащих фотограмметрической обработке, по их номерам);

наличие, полноту и качество дополнительной бортовой информации (координат центров проектирования снимков, полученных из спутниковых определений, данных инерциальной системы, лазерного профилографа и др.).

Оборудование для фотографирования с земли

В наземной фототопографической съемке фотографирование местности выполняют фототеодолитами. При решении прикладных задач используются также инженерные и стереофотограмметрические камеры, а иногда любительские фотоаппараты, стереокамеры и кинотеодолиты.

Фототеодолиты бывают различной конструкции и отличаются по формату кадра, фокусному расстоянию и другим характеристикам. В СССР выпускались фототеодолиты «Геодезия», но наибольшее распространение на горных предприятиях страны получил фототеодолитный комплект фирмы «Карл Цейсс Йена». Фототеодолит Photo 19/1318 этой фирмы (рис. 20) предназначен для фотографирования местности на вертикально расположенные фотопластинки низкой чувствительности (то есть оптическая ось камеры горизонтальна). Цифры в названии прибора указывают приблизительную величину фокусного расстояния камеры и формат снимков в сантиметрах. Камера 1 имеет жесткую конструкцию. Изготовлена она из легкого сплава. На ней укреплено ориентирующее устройство 2, для приведения оптической оси в заданное положение, и уровни для горизонтирования прибора. Объектив 3 снабжен светофильтром ЖС-18, укреплен на суппорте и может перемещаться по его направляющим параллельно вертикальной оси камеры вверх и вниз от центрального положения с шагом 5 мм. В задней части в фокальной плоскости объектива расположена прикладная рамка 4, к которой в момент фотографирования с помощью прижимного устройства 5 прижимается фотопластинка. На прикладной рамке укреплены координатные метки с отверстиями. Они фиксируются на фотопластинке и служат для введения прямоугольной системы координат. Кроме того, в фокальной плоскости объектива установлены регистраторы и индикаторы, позволяющие зафиксировать на каждой фотопластинке величину фокусного расстояния камеры, номер снимка, положения объектива в момент экспозиции и направление α оптической оси (вид съемки). Номера фотоснимков от 0 до 99 можно устанавливать с помощью барабанчиков, расположенных на боковой поверхности камеры. Указатель вида съемки имеет 6 положений:

A - нормальный вид съемки с левой точки базиса ($\alpha = 0^\circ$)

AL – отклоненный случай влево ($\alpha = 31.5^\circ$)

AR – отклоненный случай вправо ($\alpha = -31.5^\circ$).

B, BL и BR – те же варианты съемки, но с правой точки базиса фотографирования. Указанные выше углы обеспечивают составление плана

участка без разрывов, при минимальном перекрытии. Поэтому угол $\alpha = 31.5^\circ$ называют стандартным. Ориентирное устройство - это фактически теодолит технической точности.

Затвора и фокусирующего устройства фототеодолит не имеет.
Фирмой «Карл Цейсс Йена» Рис. 20

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5

выпускалась универсальная измерительная камера УМК 10/1318, 20/1318 и 30/1318, а также стереокамера SMK 5.5/0808. Первая может быть использована как для выполнения инженерных съемок, так и при наземной фототопографической съемке. В ее комплект входит аккумуляторная батарея напряжением 12В, обеспечивающая работу затвора и индикаторных ламп. Затвор может работать и механически. Вторая предназначена для фотографирования объектов, расположенных на расстояниях не более 40 метров. Они имеют постоянный базис 400 или 1200 мм. В маркшейдерии могут быть полезны при изучении трещиноватости горных пород на карьерах.

Для получения студентами практических умений и навыков по данному разделу предусмотрено проведение четырех практических заданий и четырех лабораторных работ:

Практическое занятие 1. Свойства и проекции цифровых снимков. Оптические и геометрические данные цифровых снимков. Целью работы является Изучение принципа получения цифровых снимков, центральной проекции снимка и ортогональной проекции плана, элементов центральной проекции и ее свойств.

Практическое занятие 2. Технические средства аэро и наземной съёмки. Целью работы является Изучение основных технических средств проведения аэросъемки и наземной съемки, их основных характеристик, особенностей, назначения, особенностей применения.

Практическое занятие 3. Определение смещения точек и искажение направлений одиночного снимка. Целью работы является Получение навыков определения смещения точек и искажения направлений одиночного снимка, смещения точек и искажения направлений, вызванных наклоном снимка, определения элементов внешнего ориентирования снимка.

Практическое занятие 4. Построение моделей на основе пары снимков. Целью работы является Изучение и ознакомление со стереоскопическим зрением, получение навыков измерения снимков и моделей. Изучение стереоскопического эффекта, ознакомление и получение навыков работы с простейшими стереоприборами.

Лабораторная работа 1: «Загрузка и выравнивание фотографий в PhotoScan». Целью работы является ознакомление способами и средствами

обработки информации программными средствами, в том числе обучение выравниванию фотографий с различными параметрами.

Лабораторная работа 2: «Построение геометрии модели в PhotoScan».

Целью работы является ознакомление способами и средствами обработки информации программными средствами, получение навыков построения 3D модели для набора фотографий различными методами реконструкции, с различными параметрами, текстурами, сохранение промежуточных результатов и проведение экспортирования результатов в различные форматы, экспорт ортофото и карты высот.

Лабораторная работа 3: «Построение текстуры модели в PhotoScan».

Целью работы является ознакомление способами и средствами построения текстуры 3D модели.

Лабораторная работа 4: «Калибровка камеры с помощью PhotoScan». Целью работы является ознакомление способами и средствами обработки информации программными средствами, получение навыков ручной и автоматической калибровки камеры.

Раздел 2. Теория пары снимков

Теория пары снимков

Стереоскопическая пара снимков и элементы ее ориентирования

Два снимка с изображениями одного и того же участка местности, полученные с двух точек пространства, называются стереоскопической парой снимков (стереопарой). Снимок, полученный с точки фотографирования S_1 , называется левым, а с S_2 – правым.

На рис. 15 изображена пара снимков в положении, которое она занимала в момент фотографирования. A – точка местности, изобразившаяся на снимках в точках a_1 и a_2 . Они называются соответственными или одноимёнными точками. Проектирующие лучи S_1A и S_2A , проходящие через эти точки называются соответственными или одноимёнными проектирующими лучами.

Рис.15.

A

a_1

a_2

$A^\square$

S_1

S_2

$S_2^\square$

$a_2^\square$

W_1

W_2

b_n

Расстояние B между точками фотографирования S_1 и S_2 – базис фотографирования.

Плоскость W_A , проходящая через базис и точку A местности есть базисная плоскость.

Плоскости, проходящие через базис фотографирования и главные лучи являются главными базисными плоскостями (W_1 - левого W_2 - правого снимков).

Любая пара соответственных лучей пересекается, если снимки занимают положение, которое было в момент фотографирования. Совокупность их точек пересечения образует поверхность. Ее называют стереомоделью или просто моделью местности. При выше названных условиях она совпадает с земной поверхностью, значит масштаб такой модели 1:1.

Представим теперь, что одна из связок (например, правая) поступательно перемещается вдоль базиса из положения S_2 в $S_2^\square$. Модель при этом не разрушится, но изменится ее масштаб. Расстояние b_n между центрами

проекций двух связок, по которым построена модель, называется базисом проектирования, и ее масштаб вычисляется по формуле:

$$\frac{1}{t} = \frac{b_n}{B}. \quad (62)$$

Существует понятие элементы ориентирования стереопары. К ним относят рассмотренные ранее элементы ориентирования (внутреннего x_0, y_0, f и внешнего $X_s, Y_s, Z_s, \alpha, \omega$, и κ) каждого из образующих ее снимков, таким образом, общее их число 18. Если фотографирование местности с точек S_1 и S_2 выполнено одним и тем же АФА, то стереопара имеет 15 элементов ориентирования. Другую тройку угловых элементов внешнего ориентирования снимков на практике также используют, но значительно реже. В системах координат снимков положение точек a_1 и a_2 (изображений точки A местности) определяется координатами x_1, y_1 и x_2, y_2 соответственно.

Зависимость между координатами точки местности и координатами ее изображения на паре снимков

Получим уравнения связи между координатами точки A местности и координатами ее изображений на паре снимков, исходя из предположения, что элементы ориентирования стереопары известны.

Для решения этой задачи используем в качестве исходной систему координат XYZ с началом в точке фотографирования S_1 левого снимка (рис.

15). Вектор $\bar{R}_0$ определяет в этой системе положение точки фотографирования S_2 правого снимка, а вектора $\bar{R}_1$ и $\bar{r}_1$ - положение точек A и ее изображения a_1 на левом снимке соответственно. Точки a_2 правого снимка и A местности определяют вектора $\bar{r}_2$ и $\bar{R}_2$ в системе координат S_2XYZ . Ее начало находится в точке S_2 , а оси параллельны соответствующим осям системы координат S_1XYZ . Векторы $\bar{R}_0, \bar{r}_1$ и $\bar{r}_2$ известны, поскольку принято, что элементы ориентирования снимков даны. Искомым является вектор $\bar{R}_1$.

В силу коллинеарности векторов $\bar{R}_1$ и $\bar{r}_1$ имеем:

$$\bar{R}_1 = N \bar{r}_1, \quad (63)$$

где N – скалярный множитель.

Векторы $\bar{R}_2$ и $\bar{r}_2$ также коллинеарны, поэтому $\bar{R}_2 \times \bar{r}_2 = 0$.

Согласно рис. 38 $\bar{R}_2 = \bar{R}_1 - \bar{R}_0$ или, с учётом уравнения коллинеарности $\bar{R}_2 = N\bar{r}_1 - \bar{R}_0$.
 (63), Поэтому можно записать:
 $(N\bar{r}_1 - \bar{R}_0) \times \bar{r}_2 = 0$

Решая это равенство относительно N , получим

$$N = \frac{\bar{R}_0 \times \bar{r}_2}{\bar{r}_1 \times \bar{r}_2}. \quad (64)$$

Или, с учетом соотношения (63):

$$\bar{R}_1 = \frac{\bar{R}_0 \times \bar{r}_2}{\bar{r}_1 \times \bar{r}_2} \bar{r}_1. \quad (65)$$

$\bar{r}_2$

$\bar{r}_1$

$\bar{R}_0$

$\bar{R}_1$

$\bar{R}_2$

Z

Y

X

A

Z

Y

X

S_1

S_2

y_2

y_1

x_2

a_1

a_2

P_1

P_2

o_1

o_2

Рис.15.

Уравнение (65) - векторное. Выразим искомую зависимость в координатной форме.

$$\bar{R}_0 \text{ и } \bar{r}_2, \quad \bar{r}_1 \text{ и } \bar{r}_2$$

Векторные произведения векторов можно представить в виде определителей третьего порядка:

$$\bar{R}_0 \times \bar{r}_2 = \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ B_x & B_y & B_z \\ X'_2 & Y'_2 & Z'_2 \end{vmatrix}; \quad \bar{r}_1 \times \bar{r}_2 = \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ X'_1 & Y'_1 & Z'_1 \\ X'_2 & Y'_2 & Z'_2 \end{vmatrix}$$

$$\bar{i}, \bar{j}, \bar{k}$$

где $\bar{i}, \bar{j}, \bar{k}$ - единичные векторы координатных осей X, Y, Z ;

$$\bar{R}_0$$

B_x, B_y, B_z - координаты вектора $\bar{R}_0$, определяющие положение точки фотографирования S_2 в системе координат S_1XYZ ;

X'_1, Y'_1, Z'_1 и X'_2, Y'_2, Z'_2 - пространственные координаты соответственных точек a_1 (вектора $\bar{r}_1$) и a_2 (вектора $\bar{r}_2$) на первом и втором снимках.

Разложив определители по элементам первых строк, получим:

$$\begin{aligned} \bar{r}_1 \times \bar{r}_2 = \bar{r}' &= (Y'_1 Z'_2 - Y'_2 Z'_1) \bar{i} + (X'_2 Z'_1 - X'_1 Z'_2) \bar{j} + (X'_1 Y'_2 - X'_2 Y'_1) \bar{k}, \\ \bar{R}_0 \times \bar{r}_2 = \bar{R}' &= (B_y Z'_2 - B_z Y'_2) \bar{i} + (B_z X'_2 - B_x Z'_2) \bar{j} + (B_x Y'_2 - B_y X'_2) \bar{k}. \end{aligned}$$

$$\bar{r}_1 \text{ и } \bar{r}_2$$

$$\bar{R}_0 \text{ и } \bar{r}_2$$

$$\bar{r}'$$

Векторные произведения векторов $\bar{r}_1$ и $\bar{r}_2$, а также $\bar{R}_0$ и $\bar{r}_2$ есть вектора $\bar{r}'$ и $\bar{R}'$, направленные перпендикулярно к базисной плоскости W_A . По этой причине они коллинеарны.

На основании их коллинеарности формулу (64) можно записать в виде следующих пропорций:

$$N = \frac{B_y Z'_2 - B_z Y'_2}{Y'_1 Z'_2 - Y'_2 Z'_1} = \frac{B_z X'_2 - B_x Z'_2}{X'_2 Z'_1 - X'_1 Z'_2} = \frac{B_x Y'_2 - B_y X'_2}{X'_1 Y'_2 - X'_2 Y'_1}. \quad (66)$$

Пространственные координаты X', Y', Z' , входящие в уравнения (72), вычисляются по формулам (14-18). Составляющие базиса фотографирования определяются через линейные элементы ориентирования пары снимков:

$$\begin{aligned} B_x &= X_{S_2} - X_{S_1}, \\ B_y &= Y_{S_2} - Y_{S_1}, \\ B_z &= Z_{S_2} - Z_{S_1}. \end{aligned} \quad (67)$$

$$\bar{R}_1 \text{ и } \bar{r}_1$$

Спроектируем векторы $\bar{R}_1$ и $\bar{r}_1$ на координатные оси X, Y, Z . Тогда в соответствии с равенством (63) будем иметь:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = N \begin{pmatrix} Y'_1 \\ X'_1 \\ Z'_1 \end{pmatrix}. \quad (68)$$

Рассмотренная задача определения пространственных координат точки местности по её изображению на снимках стереопары называется прямой пространственной фотограмметрической засечкой. Её решение значительно проще для идеальной пары снимков. Случай съёмки называется идеальным, если снимки получены с одной и той же высоты

$$\alpha = \omega = \chi = 0.$$

фотографирования, а их углы При указанных условиях справедливо:

$$\begin{aligned} X'_1 &= x_1^0, \quad Y'_1 = y_1^0, \\ X'_2 &= x_2^0, \quad Y'_2 = y_2^0, \\ Z'_1 &= Z'_2 = -f. \end{aligned} \quad (69)$$

Примем, что ось X совпадает с направлением базиса фотографирования, а ось Y параллельна плоскости снимков. Тогда $B_Z = B_Y = 0$, $B_X = B$, и из второго отношения пропорции (66) имеем:

$$N = \frac{B}{x_1^0 - x_2^0}. \quad (70)$$

Разность абсцисс p соответственных точек, измеренных на паре снимков, называется продольным параллаксом, т.е.:

$$p = x_1 - x_2, \text{ или на идеальной паре } p^0 = x_1^0 - x_2^0. \quad (71)$$

Тогда

$$N = \frac{B}{p^0}. \quad (72)$$

Подставив выражение N из (72) в (68), с учётом (69) получим:

$$\begin{cases} X = \frac{B}{p^0} x_1^0 = -\frac{Z}{f} x_1^0, \\ Y = \frac{B}{p^0} y_1^0 = -\frac{Z}{f} y_1^0, \end{cases} \quad (73)$$

и

$$Z = -\frac{B}{p^0} f. \quad (74)$$

В соотношениях (73) и (74) $Z = -H$ – (высоте фотографирования над точкой местности). Поэтому, согласно формуле (74), параллакс p^0 можно определить из соотношения:

$$p^0 = B \frac{f}{H}. \quad (75)$$

Оно показывает, что продольный параллакс соответственных точек идеальной пары снимков равен базису фотографирования в масштабе снимков.

Формулы (69-75) справедливы и для нормального случая съемки (главные луч перпендикулярны к наклонному базису и взаимно параллельны, а угловые элементы внешнего ориентирования относительно фотограмметрической системы координат равны нулю). При этом предполагается, что ось X совпадает с базисом, а ось Z - с главным лучом левого снимка.

По паре горизонтальных снимков сравнительно просто решается задача определения превышений точек местности. Примем, что высота точки A местности известна. Тогда превышение точки M над точкой A :

$$h = -(Z_M - Z_A). \quad (76)$$

Подставив в (76) для каждой из точек выражение из (74), получим:

$$h = \frac{B f (p_m^0 - p_a^0)}{p_a^0 p_m^0}.$$

Разность продольных параллаксов $p_m^0 - p_a^0$ обычно обозначают через Δp^0 , поэтому, опуская индексы, можно записать:

$$h = \frac{H \Delta p}{p + \Delta p}. \quad (77)$$

Углы наклона снимков не превышающие 3° , практически не влияют на точность определения превышений между близко расположенными точками. Поэтому формула (77) широко используется для определения высот отдельных объектов и по плановым снимкам (например, деревьев, домов, заводских труб, глубин оврагов и т.д.).

Иногда удовлетворительный результат получается при использовании приближенной формулы:

$$h = \frac{H \Delta p}{b}, \quad (78)$$

где b – базис фотографирования в масштабе снимка.

Для оценки точности определения превышения продифференцируем функцию (78) по входящим в неё переменным b , Δp , H и перейдём к средним квадратическим ошибкам. В результате получим

$$m_h = h \left[\left(\frac{m_b}{b} \right)^2 + \left(\frac{m_{\Delta p}}{\Delta p} \right)^2 + \left(\frac{m_H}{H} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (79)$$

где m_h – средняя квадратическая ошибка определения превышений;

m_b , $m_{\Delta p}$, m_H – средние квадратические ошибки определения базиса фотографирования, разности продольных параллаксов и высоты фотографирования соответственно.

На практике влиянием m_b и m_H пренебрегают, и для оценки используют приближённое соотношение:

$$m_h = \frac{H}{b} m_{\Delta p}. \quad (80)$$

Оно показывает, что величина ошибки m_h прямо пропорциональна высоте фотографирования (или фокусному расстоянию АФА, при заданном масштабе аэрофотосъёмки) и обратно пропорциональна базису фотографирования.

Элементы взаимного ориентирования пары снимков

Взаимное ориентирование снимков стереопары это установка их в положение, при котором любая пара соответственных лучей пересекается, то есть обеспечивается построение модели. Величины, определяющие такое положение снимков, называются элементами взаимного ориентирования (ЭвзО).

На практике выполнение условия пересечения соответственных лучей достигается поворотом обоих снимков или поворотами и смещениями только одного из них при неподвижном положении второго. В соответствии с этим различают две системы элементов взаимного ориентирования. В первой неподвижными считают базис фотографирования и главную базисную плоскость левого снимка; во второй – левый снимок.

Первая система элементов. Начало системы координат $S_1 X_1' Y_1' Z_1'$ – в центре проекции S_1 левого снимка P_1 (рис. 39). Ось X_1' совмещена с базисом фотографирования, а ось Z_1' установлена в главной базисной плоскости левого снимка. Система координат $S_2 X_2' Y_2' Z_2'$ параллельна системе координат

$S_1X_1'Y_1'Z_1'$.

Элементами взаимного ориентирования являются:

- α'_1 - угол в главной базисной плоскости левого снимка между осью Z_1' и главным лучом связки;
- χ'_1 - угол на левом снимке между осью y_1 и следом плоскости $S_1o_1Y_1'$;
- α'_2 - угол в главной базисной плоскости левого снимка между осью Z_2' и проекцией главного луча правой связки на главную базисную плоскость левого снимка;
- ω'_2 - угол между проекцией главного луча правой связки на главную базисную плоскость левого снимка и главным лучом;
- χ'_2 - угол на правом снимке между осью y_2 и следом плоскости $S_2o_2Y_2'$.

$\bar{r}_2$

r_1

$\bar{R}_1$

Z_1'

Y_1'

Y_2'

Z_2'

S_1

S_2

x_1

x_2

α'_2

m_1

m_2

M

y_1

y_2

$X_{1',2}$

$\bar{R}_0$

$\bar{R}_2$

o_1

o_2

P_1

P_2

χ'_1

χ'_2

ω'_2

□₁

Рис.39.

Вторая система элементов. За начало пространственной фотограмметрической системы координат принимается центр проекции

левого снимка S_1 . Координатные оси X'_1, Y'_1 этой системы направлены параллельно соответствующим координатным осям x_1, y_1 левого снимка (рис. 40), а ось Z'_1 совпадает с главным лучом левой связки. Система координат $S_2 X'_2 Y'_2 Z'_2$ параллельна системе координат $S_1 X'_1 Y'_1 Z'_1$.

$\bar{r}_1$

$\bar{r}_2$

$\bar{R}_1$

$\bar{R}_0$

Z'_1

Y'_1

Z'_2

Y'_2

X'_2

X'_1

S_1

S_2

B_z

B_y

B_x

S_0

y_2

x_2

P_1

o_1

o_2

P_2

m_2

m_1

y_1

x_1

M

$\bar{R}_2$

v

τ

$\Delta\gamma$

$\Delta\omega$

$\Delta\alpha$

Рис.16.

Элементами взаимного ориентирования являются:

τ - угол между осью X'_1 и проекцией базиса на плоскость $X'_1 Y'_1$ (или элемент ориентирования B_y);

v - угол наклона базиса $S_1 S_2$ относительно плоскости $X'_1 Y'_1$ (или B_z);

$\Delta\alpha$ - взаимный продольный угол наклона снимков, составленный осью Z'_2 с проекцией главного луча правой связки на плоскость $X'_2 Z'_2$;

$\Delta\omega$ - взаимный поперечный угол наклона снимков, заключённый между

плоскостью $X'_2Z'_2$ и главным лучом правой связки;
 $\Delta\chi$ - взаимный угол поворота снимков, угол на правом снимке между осью y_2 и следом плоскости $S_2O_2Y'_2$.

Таким образом, каждая система включает пять элементов взаимного ориентирования. Зная их, можно по формулам (66-68) найти пространственные фотограмметрические координаты любой точки модели.

Уравнение взаимного ориентирования пары снимков

По условию взаимного ориентирования пары снимков необходимо, чтобы для любой точки M (рис. 39 и 40) векторы r_1, r_2 и R_0 лежали в одной плоскости, т.е. выполнялось условие компланарности трёх векторов

$$R_0 \cdot (r_1 \times r_2) = 0. \quad (81)$$

В координатной форме это условие выражается равенством нулю определителя третьего порядка, составленного из координат векторов: r_1 (X'_1, Y'_1, Z'_1) и r_2 (X'_2, Y'_2, Z'_2) и R_0 (B_x, B_y, B_z), (координат B_x, B_y, B_z):

$$\begin{vmatrix} B_x & B_y & B_z \\ X'_1 & Y'_1 & Z'_1 \\ X'_2 & Y'_2 & Z'_2 \end{vmatrix} = 0. \quad (82)$$

Определитель (82), записанный на основе условия компланарности, может быть получен из решения уравнений коллинеарности (27), записанных для одной и той же точки местности, изобразившейся на паре снимков, полученных с точек фотографирования S_1 и S_2 .

В соответствии с этими уравнениями, связи между координатами точки местности X, Y, Z и координатами её изображения на левом X'_1, Y'_1, Z'_1 и правом X'_2, Y'_2, Z'_2 снимках имеют следующий вид:

$$X = X_{S_1} + (Z - Z_{S_1}) \frac{X'_1}{Z'_1}, \quad X = X_{S_2} + (Z - Z_{S_2}) \frac{X'_2}{Z'_2},$$

$$Y = Y_{S_1} + (Z - Z_{S_1}) \frac{Y'_1}{Z'_1}, \quad Y = Y_{S_2} + (Z - Z_{S_2}) \frac{Y'_2}{Z'_2}.$$

Поэтому:

$$X_{S_2} - X_{S_1} - (Z - Z_{S_1}) \frac{X'_1}{Z'_1} + (Z - Z_{S_2}) \frac{X'_2}{Z'_2} = 0,$$

$$Y_{S_2} - Y_{S_1} - (Z - Z_{S_1}) \frac{Y'_1}{Z'_1} + (Z - Z_{S_2}) \frac{Y'_2}{Z'_2} = 0.$$

Решив первое (или второе) уравнение относительно Z и подставив результат во второе (или первое) уравнение, после преобразований запишем:

$$(X_{S_2} - X_{S_1})(Y'_1 Z'_2 - Y'_2 Z'_1) - (Y_{S_2} - Y_{S_1})(X'_1 Z'_2 - X'_2 Z'_1) + \\ + (Z_{S_2} - Z_{S_1})(X'_1 Y'_2 - X'_2 Y'_1) = 0.$$

$$X_{S_2} - X_{S_1} = B_x, Y_{S_2} - Y_{S_1} = B_y, Z_{S_2} - Z_{S_1} = B_z,$$

Так как, то полученное уравнение является результатом разложения определителя (82) по элементам первой строки.

Условие (82) не нарушается, если вектор $\bar{R}_0$ заменить коллинеарным вектором R'_0 . Эта замена равноценна изменению масштаба модели местности.

Запишем уравнение (82) для двух рассмотренных систем элементов взаимного ориентирования пары снимков.

При использовании первой системы составляющие базиса фотографирования $B_y = B_z = 0$, а $B_x = B$, поэтому:

$$\begin{vmatrix} B & 0 & 0 \\ X'_1 & Y'_1 & Z'_1 \\ X'_2 & Y'_2 & Z'_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ X'_1 & Y'_1 & Z'_1 \\ X'_2 & Y'_2 & Z'_2 \end{vmatrix} = 0,$$

или

$$Y'_1 Z'_2 - Y'_2 Z'_1 = 0. \quad (83)$$

А с учетом формул (15):

$$(x_1 b'_1 + y_1 b'_2 - f b'_3)(x_2 c'_1 + y_2 c'_2 - f c'_3) - \\ - (x_2 b'_1 + y_2 b'_2 - f b'_3)(x_1 c'_1 + y_1 c'_2 - f c'_3) = 0, \quad (84)$$

где x_1, y_1 и x_2, y_2 – координаты соответственных точек на левом и правом снимках; $b'_1, b'_2, \dots, c'_3$ – направляющие косинусы матрицы преобразования

$b'_1, b'_2, \dots, c'_3$ координат левого снимка; $b'_1, b'_2, \dots, c'_3$ – то же правого снимка.

Направляющие косинусы вычисляются по формулам (18) с использованием угловых элементов $\alpha'_1, \omega'_1 = 0, \chi'_1$ для левого снимка и $\alpha'_2, \omega'_2, \chi'_2$ для правого.

Для второй системы элементов согласно рис. 40

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{B_y}{B_x}, \quad \operatorname{tg} \nu = \frac{B_z}{S_1 S_0} = \frac{B_z}{B_x} \cos \varphi. \quad (85)$$

Поэтому определитель (82) имеет вид:

$$\begin{vmatrix} 1 & \frac{B_y}{B_x} & \frac{B_z}{B_x} \\ X'_1 & Y'_1 & Z'_1 \\ X'_2 & Y'_2 & Z'_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & \operatorname{tg} \varphi & \frac{\operatorname{tg} \nu}{\cos \varphi} \\ X'_1 & Y'_1 & Z'_1 \\ X'_2 & Y'_2 & Z'_2 \end{vmatrix} = 0. \quad (86)$$

В результате его разложения по элементам первой строки получим:

$$(Y'_1 Z'_2 - Y'_2 Z'_1) - (X'_1 Z'_2 - X'_2 Z'_1) \operatorname{tg} \varphi + (X'_1 Y'_2 - X'_2 Y'_1) \frac{\operatorname{tg} \nu}{\cos \varphi} = 0. \quad (87)$$

Как и в первом случае, координаты X'_1, Y'_1, Z'_1 и X'_2, Y'_2, Z'_2 можно вычислить по формулам (15) и (18), приняв $\alpha_1 = \omega_1 = \chi_1 = 0$ для левого снимка и $\Delta \alpha, \Delta \omega, \Delta \chi$ для правого.

Воспользуемся формулой (15) и заменим пространственные координаты X', Y', Z' плоскими координатами точек пары снимков. При этом $X'_1 = x_1, Y'_1 = y_1, Z'_1 = -f$. Учтём, что

$$\begin{aligned} & \text{В результате получим:} \\ & (x_2 \bar{a}_1'' + y_2 \bar{a}_2'' - f \bar{a}_3'')(f \operatorname{tg} \varphi + y_1 \frac{\operatorname{tg} \nu}{\cos \varphi}) - \\ & - (x_2 \bar{b}_1' + y_2 \bar{b}_2'' - f \bar{b}_3'')(f + x_1 \frac{\operatorname{tg} \nu}{\cos \varphi}) - \\ & - (x_2 \bar{c}_1'' + y_2 \bar{c}_2'' - f \bar{c}_3'')(y_1 - x_1 \operatorname{tg} \varphi) = 0, \end{aligned} \quad (88)$$

где $\bar{a}_1'', \bar{a}_2'', \dots, \bar{b}_3'', \dots, \bar{c}_3''$ - направляющие косинусы матрицы преобразования координат правого снимка.

Уравнения (84) и (88) справедливы для любых значений элементов взаимного ориентирования. Для плановых снимков можно использовать их приближенный вариант. Так, на основании зависимостей (21) с точностью до членов первого порядка малости для первой системы элементов (верхняя строчка для левого снимка, нижняя - для правого) имеем:

$$\begin{aligned} & a_1' = b_2' = c_3' = 1, \quad a_2' = -b_1' = -\kappa_1', \quad a_3' = -c_1' = \alpha_1', \quad b_3' = \\ & c_2' = 0 \\ & a_1'' = b_2'' = c_3'' = 1, \quad a_2'' = -b_1'' = -\kappa_2'', \quad a_3'' = -c_1'' = \alpha_2'', \quad b_3'' = \end{aligned} \quad (89)$$

$$c_2'' = \omega_2$$

для второй системы элементов:

$$a_1' = b_2' = c_3' = 1, \quad a_2' = a_3' = b_1' = b_3' = c_1' = c_2' = 0$$

$$a_1'' = b_2'' = c_3'' = 1 \quad a_2'' = -b_1'' = -\Delta\kappa \quad a_3'' = -c_1'' = \Delta\alpha \quad b_3'' = c_2'' = \Delta\omega \quad (90)$$

Подставив указанные выше значения направляющих косинусов соответственно в уравнения (84) и (88), после преобразований получим:

для первой системы элементов –

$$\frac{x_1 y}{f} \alpha_1' - \frac{x_2 y}{f} \alpha_2' - \left(f + \frac{y^2}{f} \right) \omega_2' + x_1 \chi_1' - x_2 \chi_2' + q = 0, \quad (91)$$

для второй –

$$\frac{x_2 y}{f} \Delta\alpha + \left(f + \frac{y^2}{f} \right) \Delta\omega + x_2 \Delta\chi + \frac{y(x_1 - x_2)}{f} v + (x_1 - x_2) \tau + q = 0 \quad (92)$$

где

$$q = y_1 - y_2. \quad (93)$$

Величина q называется поперечным параллаксом.

В коэффициентах при элементах взаимного ориентирования принято, $y_1 \approx y_2 = y$,

так как для плановых снимков это существенно не влияет на точность результата.

Из формул (91) и (92) видно, что если элементы взаимного ориентирования, равны нулю, то поперечный параллакс q во всех точках ориентирования отсутствует.

Определение элементов взаимного ориентирования

Взаимное ориентирование пары снимков определяется пятью элементами. Следовательно, для их определения необходимо измерить на снимках координаты как минимум пяти соответственных точек, составить для них систему уравнений взаимного ориентирования и решить её относительно неизвестных величин.

На практике точек берут больше пяти, поэтому задачу решают методом итераций по способу наименьших квадратов (как это было сделано при определении элементов внешнего ориентирования снимка). Например, для первой системы:

1. Принимают нули в качестве приближенных значений элементов взаимного ориентирования снимков пары.

2. Выполняют измерение с целью определения координат соответственных точек x_1, y_1 и x_2, y_2 .

3. Приближенные значения элементов взаимного ориентирования, а также элементы внутреннего ориентирования и измеренные координаты

соответственных точек подставляют в уравнения (83), которое является функцией искомых величин, то есть

$$\varphi_i(\alpha'_1, \alpha'_2, \omega'_2, \chi'_1, \chi'_2) = Y'_{1,i} Z'_{2,i} - Z'_{1,i} Y'_{2,i} = 0.$$

Из-за погрешностей измерений, неточности приближенных величин, принятых в качестве неизвестных, и других причин указанная выше функция равна нулю не будет. Обозначим полученные значения через l_i , где i номер соответственной точки.

4. Принимают l_i , в качестве свободных членов, составляют уравнения поправок $\delta\alpha_1, \delta\alpha_2, \delta\omega_2, \delta\chi_1, \delta\chi_2$, которое в общем случае выглядит следующим образом:

$$a\delta\alpha'_1 + b\delta\alpha'_2 + c\delta\omega'_2 + d\delta\chi'_1 + e\delta\chi'_2 + l = v, \quad (94)$$

где v – остаточная величина невязки уравнения взаимного ориентирования, Коэффициенты перед поправками – частные производные функции (83) по соответствующим неизвестным. Например, коэффициенты a и b могут быть вычислены по формулам:

$$a = \frac{\partial \varphi}{\partial \alpha'_1} = X'_1 Y'_2, \quad b = \frac{\partial \varphi}{\partial \alpha'_2} = Y'_1 X'_2,$$

Уравнений составляют столько, сколько измерено соответственных точек.

5. При избыточном их количестве система линейных уравнений (94) решается при условии:

$$V^T P V = \min$$

где P – матрица весов измеренных координат точек снимка.

То есть составляют и решают нормальные уравнения по формулам (57) и (58), в результате чего определяют вектор поправок.

6. Вводят поправки δ к приближённым значениям элементов взаимного ориентирования, получают уточнённые значения неизвестных, которые опять принимают за приближенные значения и т. д. В качестве критерия точности определения элементов взаимного ориентирования, можно использовать величины поправок δ , поправок v или остаточных параллаксов

$$\delta q = y_1^0 - y_2^0, \quad (95)$$

вычисляемых после каждого приближения для всех точек ориентирования. Ординаты y_1^0 и y_2^0 определяются по второй формуле (40) через полученные элементы взаимного ориентирования и измеренные координаты x , у соответственных точек левого и правого снимков.

Для оценки точности определения элементов взаимного ориентирования в последней итерации находят весовые коэффициенты Q_{jj} и поправки v . По этим данным вычисляют ошибку единицы веса

$$\mu = \sqrt{\frac{[pvv]}{n-5}}, \quad (96)$$

а по формуле (59) - средние квадратические погрешности определения ЭВЗО.

3
1
5
6
2
4
о₁'
о₂
у₂
х₂
х₁
у₁
о₁
о₂'
3
4
1
2
5
6
b
у=-a
у=+a

Рис. 41.

При плановой аэрофотосъёмке искомые величины могут быть получены из решения приближенных уравнений (91) или (92). Используют, как правило, не 5, а шесть точек, и располагают их по стандартной схеме (рис. 41). Координаты соответственных точек 1÷6 приведены в таблице. ($p \approx b$).

Примем, они будут такими, если местность равнинная

таблица			
№	х ₁	х ₂	у
точки			
1	0	-b	0
2	b	0	0
3	0	-b	a
4	b	0	a
5	0	-b	-a
6	b	0	-a

Такой выбор позволяет получить относительно простые зависимости между элементами взаимного ориентирования и поперечными параллаксами q . В первой системы ЭВЗО, если подставить координаты для каждой из точек в уравнение (91) получим:

$$(1) - f\omega'_2 + b\chi'_2 + q_1 = v_1$$

$$(2) - f\omega'_2 + b\chi'_{12} + q_2 = v_2$$

(

$$(3) -\frac{ab}{f}\alpha'_2 - \left(f + \frac{a^2}{f}\right)\omega'_2 + b\chi'_2 + q_3 = v_3 \quad (97)$$

$$(4) -\frac{ab}{f}\alpha'_1 - \left(f + \frac{a^2}{f}\right)\omega'_2 + b\chi'_1 + q_4 = v_4$$

$$(5) \frac{ab}{f}\alpha'_2 - \left(f + \frac{a^2}{f}\right)\omega'_2 + b\chi'_2 + q_5 = v_5$$

$$(6) \frac{ab}{f}\alpha'_1 - \left(f + \frac{a^2}{f}\right)\left(f + \frac{a^2}{f}\right)\omega'_2 + b\chi'_1 + q_6 = v_6.$$

Величины v являются поправками к измеренным значениям поперечных параллаксов q . Они связаны с параллаксами условным уравнением, которое получается путём образования разности между суммами уравнений для точек (3), (5) и дважды (2) и для точек (4), (6) и дважды (1) т.е.

$$[(3)+(5)+2(2)]-[(4)+(6)+2(1)]=0. \quad (98)$$

Подставив в условное уравнение (98) уравнения взаимного ориентирования из (97), будем иметь

$$-2v_1 + 2v_2 - v_3 + v_4 - v_5 + v_6 + W = 0, \quad (99)$$

где

$$W = 2q_1 - 2q_2 - q_3 + q_4 - q_5 + q_6. \quad (100)$$

Величина W - невязка, поскольку теоретически правая часть уравнения (100) должна равняться нулю. Она может служить критерием качества измерений поперечных параллаксов q на стандартных точках, так как при условии, что они равноточны, на основании зависимости (110) можно написать:

$$m_W = m_q \sqrt{12}$$

где m_q – средняя квадратическая ошибка измерения поперечных параллаксов q .

В результате допустимую невязку можно подсчитать по формуле:

$$W_{\Pi} = 3m_W \approx 10m_q. \quad (101)$$

$$m_q = \pm$$

Пусть поперечный параллакс q измерен с ошибкой $0,01$ мм. Тогда допуск равен $0,10$ мм.

Формулы для определения ЭВЗО пары снимков можно получить или путем решения системы (97) по способу наименьших квадратов или из

решения ее отдельных уравнений после введения поправок v_i в параллаксы q_i .

Во втором варианте поправки v согласно (99) находятся через коррелятное уравнение из выражений:

$$v_1 = -v_2 = W/6, \quad v_3 = -v_4 = v_5 = -v_6 = -W/12 \quad (102)$$

После введения поправок v_i система (97) становится совместной, а значения неизвестных определяются по формулам:

$$\begin{aligned} \alpha'_1 &= -\frac{f}{2ab}(q_6 - q_4), \\ \alpha'_2 &= -\frac{f}{2ab}(q_5 - q_3), \\ \omega'_2 &= \frac{f}{4a^2}(-2q_1 - 2q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6), \\ \chi'_1 &= \frac{f}{b}\omega'_2 - \frac{q_2}{b} - \frac{W}{6b}, \\ \chi'_2 &= \frac{f}{b}\omega'_2 - \frac{q_1}{b} - \frac{W}{6b}. \end{aligned} \quad (103)$$

Аналогично получаются формулы для второй системы ЭВЗО:

$$\begin{aligned} \Delta\alpha &= \frac{f}{2ab}(-q_3 + q_4 + q_5 - q_6), \\ \Delta\omega &= \frac{f}{4a^2}(-2q_1 - 2q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6), \\ \Delta\chi &= \frac{1}{b}(q_2 - q_1 + \frac{W}{3b}), \\ \tau &= -\frac{f}{b}\Delta\omega + \frac{q_2}{b} + \frac{W}{6b}, \quad (by = b\tau), \\ v &= \frac{f}{2ab}(q_4 - q_6), \quad (bz = bv). \end{aligned} \quad (104)$$

Согласно (103) и (104) средние квадратические ошибки определения ЭВЗО пары снимков предусчитываются по формулам:

- для первой системы элементов:

$$m_{\alpha'_1} = m_{\alpha'_2} = \frac{f}{ab\sqrt{2}}m_q, \quad m_{\omega'_2} = \frac{f}{2a^2}\sqrt{3}m_q, \quad (105)$$

$$m_{\chi_1} = m_{\chi_2} = \frac{m_q}{b} \sqrt{1 + \frac{3}{4} \frac{f^4}{a^4}};$$

- для второй:

$$\begin{aligned} m_{\Delta\alpha} &= \frac{f}{ab} m_q, & m_{\Delta\omega} &= \frac{f}{2a^2} \sqrt{3} m_q, & m_{\Delta\chi} &= \frac{1}{b} \sqrt{2} m_q, \\ m_t &= \frac{m_q}{b} \sqrt{1 + \frac{3}{4} \frac{f^4}{a^4}}, & m_v &= \frac{f m_q}{ab\sqrt{2}}. \end{aligned} \quad (106)$$

Они показывают, что при одной и той же ошибке m_q измерения поперечных параллаксов точность определения ЭВЗО тем выше, чем меньше величина фокусного расстояния f и больше параметры a и b стандартного расположения точек 1÷6.

В свою очередь параметр a зависит от формата снимков, а длина базиса b и от величины продольного перекрытия. При этом следует учесть, что точки 3, 4, 5 и 6 должны выбираться не ближе 2 см от края снимка, поскольку метрические качества изображения по его краям хуже, чем в центральной части.

Из сравнения формул (103) и (104) можно заключить, что между первой и второй системами ЭВЗО существует следующая связь:

$$\Delta\alpha = \alpha'_2 - \alpha'_1, \quad \Delta\omega = \omega'_2, \quad \Delta\chi = \chi'_2 - \chi'_1, \quad \tau = -\chi'_1, \quad \nu = \quad (107)$$

Но она справедлива только с точностью до величин первого порядка малости.

Теоретические исследования [4 и проч.] показали неопределённость решения задачи определения ЭВЗО, когда на местности точки 1, 3, 5 и 2, 4, 6 лежат на окружностях, а базис фотографирования расположен на образующей цилиндра, для которого эти окружности являются направляющими. Рассматриваемый случай возможен при съёмке горной местности и карьеров. При такой ситуации задача решается, но произойдет некоторое снижение точности определения координат точек местности.

Построение модели с преобразованием связей проектирующих лучей

S_1

S_2

X

Z

A

$A^\square$

$S_2^\square$

$S_1^\square$

a_1

a_2

f
 f'
 O_1
 O_2

Рис. 42

Иногда строят модель, когда расстояние f' от центра проекции до снимка не соответствует фокусному расстоянию f камеры АФА. В этом случае говорят, что связка проектирующих лучей преобразована. Для того чтобы понять к чему это приводит, изменим фокусное расстояние АФА в k раз при построении модели по паре горизонтальных снимков нормального случая съемки (Рис. 42). Из рисунка видно, что условие взаимного ориентирования пары снимков при этом не нарушится, то есть каждая пара соответственных лучей преобразованных связок будет пересекаться.

Совокупность точек, в которых пересекаются соответственные лучи преобразованных связок, называется преобразованной (аффинной) моделью. Однако заметим, что при преобразовании связок проектирующих лучей точка A модели переместилась в точку A' . Причем, отрезок AA' - параллелен оси Z , так как он лежит на линии пересечения двух отвесных плоскостей $S_1S_1'a_1$ и $S_2S_2'a_2$. Отсюда сразу же следует, что в плане никаких изменений не происходит. Изменяется только координата Z , то есть горизонтальный масштаб $1/M_H$ модели не изменится. Станет иным вертикальный масштаб $1/M_V$, и он не будет теперь равен горизонтальному.

$$M_V = M_H / k$$

Причем, из рисунка легко получить соотношение между их знаменателями.

Отметим, что преобразованную модель местности можно построить не только по горизонтальным, но и по плановым снимкам.

Внешнее ориентирование модели

Определив ЭВЗО пары снимков (построив модель), можно получить пространственные прямоугольные координаты ее точек в условной фотограмметрической системе, причем в произвольном масштабе, так как расстояние между центрами проекций принимается произвольно. На производстве планы составляют в прямоугольной геодезической системе координат. Для перехода от условной пространственной системы координат к геодезической необходимо выполнить внешнее ориентирование модели.

$$O_H X_H Y_H Z_H$$

На рис. 43 показаны геодезическая и фотограмметрическая $SXYZ$ системы координат. Начало второй из них совмещено с точкой S модели,

$$X_{H_0}, Y_{H_0}, Z_{H_0}$$

геодезические координаты которой известны.

□

□
□
S
Z_Г
X_Г
Y_Г
Z
Y
X

Рис. 43

$Y_Г^0$
 $Z_Г^0$
 $X_Г^0$

Введем вспомогательную систему координат с началом в точке S. Ее оси направим параллельно осям системы координат $O_Г X_Г Y_Г Z_Г$. Взаимное положение координатных систем $S X Y Z$ и $S X'_Г Y'_Г Z'_Г$ определяется углами ξ , η и θ .

ξ - продольный угол наклона модели, составленный осью $SZ'_Г$ с проекцией оси Z на плоскость $X'_Г SZ'_Г$.

η - поперечный угол наклона модели, заключённый между осью SZ и её проекцией на плоскость $X'_Г SZ'_Г$.

θ - угол поворота модели вокруг оси SZ, находится в плоскости XSY.

Таким образом, для внешнего ориентирования модели необходимо знать: t - знаменатель масштаба модели; геодезические координаты точки $X_{Г_0}, Y_{Г_0}, Z_{Г_0}$

ξ , η , θ её поворота. Эти семь величин называются элементами внешнего ориентирования модели.

Если они известны, координаты точки местности в геодезической системе координат определяются по формулам:

$$\begin{pmatrix} X_Г \\ Y_Г \\ Z_Г \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{Г_0} \\ Y_{Г_0} \\ Z_{Г_0} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta X_Г \\ \Delta Y_Г \\ \Delta Z_Г \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{Г_0} \\ Y_{Г_0} \\ Z_{Г_0} \end{pmatrix} + A_{\xi\eta\theta} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} t, \quad (10)$$

8)

где, $A_{\square\square}$ - матрица поворота, которая зависит от угловых элементов внешнего ориентирования модели. Ее направляющие косинусы a , b , c вычисляются по формулам, похожим на уравнения (18) при подстановке

вместо углов α, ω, χ и углов ξ, η, θ (с учетом изменения правой системы координат на левую).

Элементы внешнего ориентирования, необходимые для преобразования фотограмметрических координат точек модели, определяются, как правило, по опорным точкам. Система уравнений (108), записанная для этих точек, содержит семь неизвестных величин. Для их определения необходимо иметь не менее трёх опорных точек, причём одна из них может быть высотной.

Задача решают графическим, графо-аналитическим или аналитическим способами. Алгоритм аналитического решения уже дважды обсуждался. Речь идет о методе итераций.

То есть, принимаются приближенные значения ЭВО модели $(X_{\Gamma_0}), (Y_{\Gamma_0}), (Z_{\Gamma_0}), (\xi), (\eta), (\theta), (t)$

и путем подстановки их в уравнения (108) вычисляются геодезические координаты опознаков. Они не будут равны исходным координатам. Разности l_x, l_y и l_z между вычисленными и исходными значениями координат принимаются за свободные члены

уравнений поправок $\delta X_0, \delta Y_0, \delta Z_0, \delta \xi, \delta \eta, \delta \theta, \delta t$, т.е:

$$l_x = (X_0) + \Delta X'_{\Gamma} - X_{\Gamma}, \quad l_y = (Y_0) + \Delta Y'_{\Gamma} - Y_{\Gamma}, \quad l_z = (Z_0) + \Delta Z'_{\Gamma} - Z_{\Gamma}.$$

Сами уравнения поправок имеют вид:

$$\begin{aligned} a_x \delta X_0 + d_x \delta \xi + e_x \delta \eta + f_x \delta \theta + g_x \delta t + l_x &= v_x, \\ b_y \delta Y_0 + d_y \delta \xi + e_y \delta \eta + f_y \delta \theta + g_y \delta t + l_y &= v_y, \\ c_z \delta Z_0 + d_z \delta \xi + e_z \delta \eta + f_z \delta \theta + g_z \delta t + l_z &= v_z. \end{aligned} \quad (109)$$

Коэффициенты перед поправками это частые производные функций (108) по элементам внешнего ориентирования модели. И если их взять, то для некоторых из них, например, получим:

$$\begin{aligned} \frac{\partial X_{\Gamma}}{\partial X_0} &= a_x = 1, \quad \frac{\partial X_{\Gamma}}{\partial Y_0} = b_x = 0, \quad \frac{\partial X_{\Gamma}}{\partial Z_0} = e_x = 0, \quad \frac{\partial X_{\Gamma}}{\partial \xi} = d_x = -\Delta Z'_{\Gamma}, \\ \frac{\partial X_{\Gamma}}{\partial \eta} &= e_x = -\Delta Y'_{\Gamma} \sin \xi, \quad \frac{\partial X_{\Gamma}}{\partial \theta} = f_x = (a_2 X - a_1 Y) t, \quad \frac{\partial X_{\Gamma}}{\partial t} g_x = \Delta X \\ \frac{\partial Y_{\Gamma}}{\partial Y_0} &= b_y = 1, \quad \frac{\partial Y_{\Gamma}}{\partial X_0} = a_y = 0, \quad \frac{\partial Y_{\Gamma}}{\partial Z_0} = e_y = 0, \quad \frac{\partial Y_{\Gamma}}{\partial \xi} = d_y = 0, \end{aligned} \quad (110)$$

$$[p_{vv}] = \min$$

Уравнения (109) решают под условием Критерием целесообразности выполнения последующего приближения являются или заданные величины поправок к приближённым значениям ЭВО модели, или заданные величины изменения этих поправок. Если полученные величины меньше установленного допуска, то решение задачи прекращается. По данным последнего приближения выполняется оценка μ точности определения ЭВО модели. Ошибка единицы веса μ находится по формуле

$$\mu = \sqrt{\frac{[p_{vv}]}{3n-7}},$$

а средние квадратические ошибки определения ЭВО модели – по формуле (59).

Далее, используя ЭВО модели можно для всех ее точек вычислять геодезические координаты.

$$\xi, \eta \text{ и } \theta$$

Если элементы ориентирования малы, а t незначительно отличается от единицы, то за начальное приближение можно принять $(\xi) = (\eta) = (\theta) = 0, t = 1$.

$$a_1 = b_2 = c_3 = 1,$$

В этом случае а остальные направляющие косинусы равны нулю. Тогда

$$\begin{aligned} \delta X_0 - Z\xi - Y\theta + X\delta t + l_x &= v_x, \\ \delta Y_0 - Z\eta + X\theta + Y\delta t + l_y &= v_y, \\ \delta Z_0 + X\xi + Y\eta + Z\delta t + l_z &= v_z, \end{aligned} \quad (111)$$

где

$$l_x = (X_0) + X - X_{\Gamma},$$

$$l_y = (Y_0) + Y - Y_{\Gamma},$$

$$l_z = (Z_0) + Z - Z_{\Gamma}.$$

Формулы (111) удобны для изучения точности процесса внешнего ориентирования модели, поскольку в явном виде выражают связи между фотограмметрическими и геодезическими координатами через элементы внешнего ориентирования модели.

Двойная обратная пространственная фотограмметрическая засечка

Обратим теперь внимание на то, что введение понятия о взаимном ориентировании пары снимков, позволяет создать достаточно эффективную технологию определения пространственных координат точек местности, а значит и ее картографирования. Эффективность состоит, прежде всего, в том, что для построения модели используется лишь та информация, которой получают снимки в процессе фотографирования. А опознаки, нужны только в процессе ее внешнего ориентирования. Отсюда минимальный объем дорогостоящих и трудоемких полевых работ. Эта технология была названа двойной обратной пространственной фотограмметрической засечкой. Она включает следующие этапы

1. Внутреннее ориентирование снимков пары (построение связок проектирующих лучей).
2. Взаимное ориентирование снимков (построение модели произвольного масштаба).
3. Внешнее ориентирование модели.
4. Определение координат отдельных точек местности или ее картографирование.

Именно эта технология и нашла наибольшее применение на производстве.

Особенности теории наземной фотограмметрии

В принципе для теории фотограмметрии безразлично как снимок расположен в пространстве. Но незначительные особенности при картографировании по наземным снимкам есть, и их следует рассмотреть.

Во-первых, несколько иначе вводится система координат на наземном снимке (Рис.44), но в основном путем использования координатных меток. Как следует из рисунка, оси на снимке обозначены буквами x и z . Это означает, что его элементами внутреннего ориентирования являются величины f , x_0 и z_0 .

За начало фотограмметрической системы координат чаще всего принимают центр проекции S , ось Z устанавливают отвесно, а оси X и Y – горизонтально. Угловыми элементами внешнего ориентирования снимка являются: ω - угол между осью Y и проекцией главного луча на плоскость SXY (на рисунке он отрицательный); φ - угол наклона главного луча; κ - разворот снимка в своей плоскости, например, угол между главной горизонталью и осью x (на рис. 44 не показан).

z
 x
 f
 o
 x_0

z_0
 S
 $\square$
 $\square$
 X
 Z
 Y

Рис. 44 Элементы ориентирования наземного снимка

При определении пространственных координат точки на снимке формулы (15) примут вид:

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x - x_0 \\ f \\ z - z_0 \end{pmatrix} \quad (112)$$

Направляющие косинусы матрицы A поворота в выше приведенной формуле получаются, как произведение $A_0 A_1 A_2$ и могут быть вычислены по формулам:

$$\begin{aligned} a_1 &= \cos \varphi \cos \omega + \sin \varphi \sin \omega \sin \theta, & a_2 &= -\sin \varphi \cos \omega, & a_3 &= -\cos \varphi \sin \omega + \sin \varphi \sin \omega \cos \theta, \\ b_1 &= \sin \varphi \cos \omega - \cos \varphi \sin \omega \sin \theta, & b_2 &= \cos \varphi \cos \omega, & b_3 &= -\sin \varphi \sin \omega - \cos \varphi \sin \omega \cos \theta, \\ c_1 &= \cos \varphi \sin \omega, & c_2 &= \sin \varphi, & c_3 &= \cos \varphi \cos \omega \end{aligned} \quad (113)$$

При условии учета зависимостей (112) и (113), соотношения между координатами точек местности и снимка те же, что и для аэрофотоснимка, например, уравнения (25).

Если оси X и Z пространственной фотограмметрической системы координат параллельны соответствующим осям x и z снимка и координаты главной точки равны нулю, то, используя их, можно получить:

$$X = \frac{Y}{f} x, \quad Z = \frac{Y}{f} z \quad (114)$$

Значение координаты Y часто называют отстоянием. Из выше приведенной формулы следует, что отношение отстояния к фокусному расстоянию снимка является масштабом изображения.

Особенностью наземной фототопографии является и то, что при фотографировании объектов элементы внешнего ориентирования снимков устанавливаются с достаточно высокой точностью. Поэтому довольно часто координаты точек местности по паре снимков определяют путем решения прямой пространственной фотограмметрической засечки. При этом за начало фотограмметрической системы координат принимают центр проекции левого снимка пары, ось Y направляют вдоль проекции главного луча на горизонтальную плоскость, ось Z – отвесно, (система правая).

Угловые элементы внешнего ориентирования ω , φ и κ , каждого из снимков стереопары являются и элементами самой пары. Но ω , как правило, это угол в горизонтальной плоскости между проекцией на нее главного луча и перпендикуляром к базису фотографирования. Понятно, что при таком подходе линейные элементы внешнего ориентирования левого снимка равны нулю, а правого - это проекции базиса фотографирования на оси координат.

Отметим, что формулы прямой пространственной фотограмметрической засечки, установленные для пары аэрофотоснимков справедливы (с учетом выше приведенных замечаний) и для пары наземных снимков. Но после получения координат точек местности необходимо выполнять процесс внешнего ориентирования. В этом случае он проще, так как поворот следует выполнять только вокруг оси Z (снимок в процессе фотографирования устанавливается отвесно). Элементами внешнего ориентирования считают: геодезические координаты начала фотограмметрической системы координат X_s , Y_s и Z_s (левого центра проекции); дирекционный угол α главного луча (или базиса фотографирования α_b); поправку ΔZ_r за кривизну Земли и вертикальную рефракцию. Формулы преобразования в этом случае имеют вид:

$$\begin{aligned} X_r &= X_s + Y_s \sin \omega - X_s \sin \omega, \\ Y_r &= Y_s + Y_s \sin \omega + X_s \cos \omega, \\ Z_r &= Z_s + Z + \Delta Z_r \end{aligned} \quad (115)$$

Основные виды наземной стереофотограмметрической съемки

Очень часто формулы для определения координат точек местности по паре наземных снимков стараются упростить. С этой позиции в зависимости от положения снимков в момент фотографирования различают пять основных случаев (видов) съемки: нормальный, равноотклоненный (скошенный), конвергентный, равнонаклонный и общий (произвольный). В наземной фототопографии чаще всего применяют первые два. При решении специальных задач популярен и конвергентный случай, реже равнонаклонный.

При конвергентном случае съемки главные лучи снимков горизонтальны, но не параллельны друг другу, а оси x на снимках горизонтальны (рис. 45). То есть $\omega_l = \omega_n$, $\omega_l = \omega_n = \omega_r = \omega_n = 0$.

Угол ω между главными лучами левого и правого снимков называют углом конвергенции, если лучи сходятся, и углом дивергенции, если они расходятся

При таком выборе системы фотограмметрических координат, как на рис. 45, угловые элементы внешнего ориентирования левого снимка равны нулю, и, при условии равенства нулю координат главной точки:

$$\begin{aligned} X_l &= x_l, & Y_l &= f & \text{и} & & Z_l &= z_l \end{aligned} \quad (116)$$

Правый снимок развернут на угол φ , поэтому в соответствии с формулами (113): $a_1 = \cos\varphi$, $a_2 = -\sin\varphi$, $b_1 = \sin\varphi$, $b_2 = \cos\varphi$, $c_3 = 1$. Остальные направляющие косинусы равны нулю. Таким образом, согласно формуле (112) получим:

$$\begin{aligned} X_2 &= x_2 \cos\varphi - f \sin\varphi, & Y_2 &= x_2 \sin\varphi + f \cos\varphi, & Z_2 &= z_2 \end{aligned} \quad (117)$$

В соответствии с рис. 46 базисные составляющие (118) равны:

$$\begin{aligned} &B \\ &Y \\ &X \\ &S_\varphi \\ &S_n \\ &B_Y \\ &B_X \\ &-\varphi_n \\ &\varphi_n \\ &-\varphi_n \\ &\varphi \\ &\varphi \end{aligned}$$

Рис. 45 Конвергентная съемка

$$B_X = B \cos\varphi_n, \quad B_Y = -B \sin\varphi_n$$

С учетом выше приведенных уравнений (116-118) и в соответствии с пропорцией (66) выражение для скаляра будет иметь вид:

$$N = \frac{B[x_2 \sin(\varphi_n + \gamma) + f \cos(\varphi_n + \gamma)]}{(x_1 x_2 + f^2) \sin\gamma + f \cos\gamma (x_1 - x_2)} \quad (119)$$

Зная скаляр, по формулам (68) можно вычислить фотограмметрические координаты точек местности.

В равноотклоненном случае съемки углы скоса главных лучей не равны нулю, но взаимно параллельны, то есть: $\varphi_n = \varphi_n = \varphi \neq 0$, $\varphi_n = \varphi_n = \varphi_n = \varphi_n = 0$. Подставим угол $\varphi = 0$, в соотношение (119), и с учетом формулы (68) получим:

$$\begin{aligned} Y &= \frac{B}{\rho} f \left(\cos\varphi + \frac{x_2}{f} \sin\varphi \right), \\ Y &= \frac{B}{\rho} x_1 \left(\cos\varphi + \frac{x_2}{f} \sin\varphi \right) = \frac{Y}{f} x_1, \\ Z &= \frac{B}{\rho} z_1 \left(\cos\varphi + \frac{x_2}{f} \sin\varphi \right) = \frac{Y}{f} z_1, \end{aligned} \quad (120)$$

Где p – продольный параллакс, равный разности абсцисс соответственных точек левого и правого снимков.

Если случай съемки нормальный все угловые элементы снимков равны нулю, поэтому в соответствии с уравнениями (120) будем иметь:

$$X = \frac{B}{p} x_1, \quad Y = \frac{B}{p} f, \quad Z = \frac{B}{p} z_1 \quad (121)$$

Стереоскопическое зрение, измерение снимков и модели

Основы стереоскопического зрения

Как показывают предыдущие разделы, для достижения основной цели - определения координат точек местности по фотоснимкам, нужно их измерять. Из данных природой человеку органов чувств, особое значение для этого имеет зрение. Обеспечивается оно системой глаз – мозг.

Рис. 17 Схема устройство глаза

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10
- 11
- 12
- 13

Глаз человека это сложное и совершенное оптическое устройство (рис. 17). Он имеет форму, приближающуюся к шару с радиусом около 12 мм; его поверхность состоит из трёх оболочек. Наружная защитная оболочка глаза (склера) 1 в передней своей части переходит в тонкую и прозрачную роговицу 10. Под склерой находится сосудистая оболочка 2, переходящая в непрозрачную радужную оболочку 9. Она имеет красящие вещества (пигменты), определяющие цвет глаз. Спереди радужной оболочки находится зрачок 11 (отверстие с изменяющимся в пределах 2-8 мм диаметром). Он играет роль диафрагмы и регулирует количество поступающих в глаз световых лучей. Третья (внутренняя) оболочка 3 называется сетчаткой и

состоит из фоторецепторов - большого числа светочувствительных элементов (колбочек и палочек), передающих своё раздражение через нервную систему в мозг наблюдателя. Палочки чувствительны к слабому сумеречному освещению, колбочки – к дневному, яркому свету и обладают цветочувствительностью. Место вхождения зрительного нерва в сетчатку носит название слепого пятна 7, так как оно не имеет колбочек и палочек, а, следовательно, и не реагирует на световое раздражение. В середине сетчатки напротив зрачка находится жёлтое пятно 4, являющееся наиболее чувствительной частью сетчатки. Центральное углубление жёлтого пятна 5 состоит из одних колбочек. Диаметр впадины жёлтого пятна составляет примерно 0,4 мм, диаметр колбочки приблизительно 2 мкм.

Спереди глаза за зрачком расположен хрусталик 12, представляющий собой двояковыпуклую линзу. Он строит на сетчатке действительное, уменьшенное и обратное изображение наблюдаемого объекта. Таким образом, его назначение аналогично объективу фотоаппарата. Сетчатка играет такую же роль, что и матрица ПЗС.

Резкость изображения на сетчатке достигается посредством аккомодации хрусталика (изменение его кривизны, происходящее рефлекторно). Чем ближе находится рассматриваемый предмет, тем большей должна быть кривизна поверхности хрусталика. Осуществляют аккомодацию глазные мышцы 8. Они не напряжены, если рассматриваемый объект находится в бесконечности (более 10 м). При этом фокусное расстояние хрусталика равно приблизительно 16 мм. Но при наблюдении на таком расстоянии упускаются мелкие детали. Оптимально, когда и детали видны и мышцы не очень напряжены. Такие условия для нормального глаза выполняются на расстоянии наилучшего зрения (около 25 см).

Пространство между роговицей и хрусталиком наполнено «водянистой влагой», а между хрусталиком и сетчаткой – «стекловидной влагой» 13, Их коэффициенты преломления примерно равны между собой.

Луч, проходящий через центр впадины жёлтого пятна и заднюю узловую точку оптической системы глаза, называется зрительной осью глаза, а прямая, проходящая через центры кривизны поверхностей роговицы и хрусталика – его оптической осью. Угол между этими осями равен 5° .

Поле зрения неподвижного глаза составляет 150° по горизонтали и 120° по вертикали. В его разных частях изображение воспринимается с различной чёткостью. Лучше видны те предметы, которые попадают на центральную ямку сетчатки.

Угол, под которым виден диаметр центральной ямки жёлтого пятна из узловой точки хрусталика, называется углом отчётливого зрения. Он равен $1,5^\circ$.

Раздражение светом палочек и колбочек вызывает зрительное ощущение, если длина электромагнитных волн находится в пределах 360 – 760 нм. Максимальная чувствительность к желтой части спектра, примерно 555 нм.

Существует статистическая и динамическая теории зрения. В

соответствии с динамической теорией большую роль при рассматривании предметов играют движения глаз. Они бывают произвольными (зависят от воли человека) и непроизвольными (физиологические нистагмы). Непроизвольные движения включают:

- Дрожь – колебание глаз со скоростью 20° в секунду с амплитудой $10-20^\circ$;
- Колебания – быстрые вращения со скоростью примерно 6000° в секунду с амплитудой $1 - 25^\circ$. Происходят не регулярно с интервалами $0.05 - 5$ сек.;
- Медленные движения со скоростью 1° в секунду с амплитудой до 5° .

Непроизвольными движениями глаз сканирует изображение, построенное хрусталиком.

Различают два вида зрения: монокулярное и бинокулярное.

Зрение одним глазом называется монокулярным зрением. Наблюдатель обычно подсознательно поворачивает глаз так, чтобы изображение объекта оказалось на углублении жёлтого пятна. Пересечение зрительной оси глаза с рассматриваемым объектом называется точкой фиксации F монокулярного зрения.

Для оптических наблюдений и измерений важную роль играет острота зрения, т.е. способность невооружённого глаза воспринимать две расположенные рядом точки или линии как разные элементы. Минимальный угол, под которым наблюдатель ещё видит раздельно две светящиеся точки, называется остротой монокулярного зрения первого рода. Для нормального глаза этот угол равен примерно $45''$. Но он зависит от многих факторов (дифракция, абберрации, освещение, тип тест объекта, длина волны и т.д.) и колеблется в пределах $0.5^\circ - 10^\circ$.

Остротой монокулярного зрения второго рода называется минимальный угол, под которым человеческий глаз видит раздельно две параллельные линии. Она выше, чем острота монокулярного зрения первого рода и примерно равна $20''$. Это объясняется тем, что изображение линий воспринимается не одной, а целой группой колбочек.

Существует понятие стереоскопического (пространственного) восприятия объектов. Оно может быть монокулярным и бинокулярным.

При монокулярном зрении об удалённости наблюдаемых предметов можно судить только по косвенным признакам (относительный размер предметов, свет и тени, перекрытия, перспектива, визуальные контрасты, параллакс движений, детальность изображений и т.д.). Указанные признаки оценки пространственной глубины при монокулярном зрении дают приближённое, а иногда неверное представление о расстояниях.

F
 A
 $\square_A$
 $\square_F$
 b
 O_1

O_2
 f_1
 f_2
 a_2
 a_1
 L_A
 $\square L$
 L_F
 P_2
 P_1
 $f_{\square 1}$
 $f_{\square 2}$
 $a_{\square 1}$
 $a_{\square 2}$

Рис.18 Бинокулярное зрение

Стереоскопическое зрение это пространственное восприятие, возникающее при рассматривании объекта двумя глазами. Такое наблюдение называется бинокулярным зрением. В этом случае наблюдатель устанавливает глаза таким образом, чтобы изображение объекта оказалось в центральных ямках f_1 и f_2 сетчаток обоих глаз (рис. 18). Поэтому зрительные оси глаз пересекаются в том месте объекта, которое наблюдатель желает отчётливо рассмотреть. Точка пересечения зрительных осей называется точкой фиксации F бинокулярного зрения.

Расстояние b между центрами хрусталиков левого и правого глаз это глазной базис. Он у людей разный и колеблется в пределах от 55 до 72 мм.

Угол γ_F , под которым пересекаются зрительные оси, называется углом конвергенции (сходимости).

Величина угла конвергенции зависит от отстояния L точки F . Эта зависимость выражается приближённым уравнением:

$$\gamma_F = b/L \quad (122)$$

Размеры жёлтого пятна позволяют увидеть при данном положении глаз и другие точки (рис. 47). Изображения a_1 и a_2 точки A объекта, полученные на сетчатках глаз, называются соответственными точками, а лучи $O_1 a_1$ и $O_2 a_2$ –

соответственными лучами. Угол γ_A , под которым пересекаются соответственные лучи, называется параллактическим углом.

Неравенство углов γ_F и γ_A вызывает неравенство дуг $\cup f_1 a_1$ и $\cup f_2 a_2$, полученных в пределах жёлтого пятна левого и правого глаз. Алгебраическая их разность называется физиологическим параллаксом и обозначается p , т.е.:

$$p = \cup f_1 a_1 - \cup f_2 a_2 \quad (123)$$

Дуга считается положительной, если она находится слева от центральной ямки. Наличие физиологического параллакса является причиной пространственного восприятия при стереоскопическом зрении.

Абсолютная величина угла конвергенции ощущается при этом с невысокой точностью, поэтому и отстояние наблюдаемой точки определяется приближённо. В то же время изменения величин параллактических углов относительно угла конвергенции воспринимаются с высокой точностью. Это обстоятельство позволяет определить изменения отстояний других точек относительно точки фиксации также с высокой точностью. Установлено, что разность отстояний воспринимается человеком, когда $\frac{\gamma}{\gamma_F} = \pm 70\%$. Если это условие не выполняется, то он меняет точку фиксации.

Для определения соотношения между изменениями расстояния и угла конвергенции в соответствии с (122) запишем:

$$\Delta L = -b \Delta \gamma / \gamma^2 = -L^2 \Delta \gamma / b \quad (124)$$

Существует понятие гороптер. Это геометрическое место точек в пространстве, которые, при заданном положении точки фиксации, дают изображение на симметричных точках фиксации. Для всех остальных точек, в указанных выше пределах и возникает физиологический параллакс.

Наименьшее значение $\Delta \gamma$ (или физиологического параллакса p), при котором ещё ощущается разность расстояний ΔL , называют остротой или разрешающей способностью стереоскопического зрения.

Острота стереоскопического зрения первого рода – это минимальная разность параллактических углов двух точек, при которой ещё воспринимается разность отстояний. Она примерно равна 30".

Острота стереоскопического зрения второго рода – это минимальная разность параллактических углов для двух вертикальных прямых, при которой ещё замечается разность их отстояний. Она равна 10". Эти характеристики меняются в зависимости от индивидуальных особенностей наблюдателя, а так же от условий наблюдения – освещённости, контрастности объектов, их формы и т.п.

Используя понятие остроты стереоскопического зрения, по формуле (122) можно определить радиус R невооруженного бинокулярного зрения.

Так, приняв $\gamma_F = 30''$ и $b = 65$ мм, получим: $R = (65 \text{ мм} \cdot 200\,000) / 30'' = 430$ м. Если для наблюдения объектов использовать бинокли или стереотрубы, у которых искусственно увеличен глазной базис (обозначим его буквой B), и использованы оптические системы увеличения, возрастает и радиус стереоскопического зрения в $\Delta = (BV)/b$ раз, Величину Δ называют коэффициентом пластичности прибора.

Стереоскопический эффект, простейшие стереоприборы

Пространственное восприятие можно получить не только при непосредственном рассматривании объекта в натуре, но и при рассматривании стереопары снимков этого объекта.

Представим себе, что с точек S_1 и S_2 сделаны два снимка P_1 и P_2 рассматриваемого объекта (точки F и A , рис. 47) Поставим эти снимки перед глазами наблюдателя так, чтобы проектирующие лучи проходили через изображения соответственных точек на снимках (точки $a_{1,2}$ и $f_{1,2}$). При рассматривании каждого снимка (левого P_1 – левым глазом, а правого P_2 – правым) изображения точек объекта получаются в тех же точках сетчаток, что и при рассматривании самого объекта, и вследствие разностей физиологических параллаксов возникает впечатление объёмного изображения.

Пространственное восприятие объекта при бинокулярном рассматривании пары снимков, полученных с разных точек пространства, называется стереоскопическим эффектом, а воспринимаемая при этом мнимая картина – стереоскопической моделью.

Для получения стереоэффекта, кроме названных выше условий необходимо, чтобы:

1. Разность масштабов снимков стереопары не превышала 16 %.
2. Каждым глазом наблюдался только один из снимков.
3. Угол, под которым пересекаются соответственные лучи, не превышал 16° .
4. Положение снимков было согласовано с глазным базисом. В первом приближении это осуществляется расположением снимков на линии, параллельной главному базису.

При рассматривании пары снимков можно получить прямой, обратный или нулевой стереоэффекты (рис. 19). Стереоскопический эффект получается прямым (естественное восприятие пространства), если снимки расположить перекрытием внутрь; обратным (обратное восприятие выпуклых и вогнутых форм), если их расположить перекрытием в разные стороны.

f_1
 a_1
 b_2
 f_1
 a_1
 f_2
 a_2
 f_2
 a_2
a
b

Рис. 19. Схемы расположения снимков для получения а – прямого стереоэффекта,

P_1
 P_2
 P_1
 P_2

Если снимки повернуть на 90° в разные стороны, то возникает нулевой стереоэффект, при котором рассматриваемый объект воспринимается плоским.

Для обеспечения второго условия получения стереоэффекта используют: анаглифический, поляроидный, миганий, растровый, оптический и другие способы.

В способе анаглифов и левое изображение и правое проецируют на один экран через светофильтры красный и зеленый (синий). Полученная картина рассматривается через анаглифические (красно-зеленые) очки. В результате каждый глаз видит только одно изображение, а при их слиянии возникает стереоэффект в серо-белых тонах.

В способе поляроидов используют не цветные, а поляроидные светофильтры с углом поляризации между ними 90° . Через них рассматривают проецируемые на экран поляризованные с таким же углом изображения. В отличие от анаглифического способа, поляроидный может использоваться для наблюдения цветных снимков, поэтому используется в кинематографии.

В способе миганий снимки проектируются на экран поочередно с помощью, например, вращающихся перед объективами бленд. Такие же бленды установлены перед глазами наблюдателя. Частота вращения обеих пар бленд синхронизирована и составляет не менее 10 миганий в секунду. Таким образом, наблюдатель непрерывно видит левым глазом только левое изображение, а правым – только правое. Способ используется для получения объемной картины и на экране монитора.

При растровом способе два снимка проектируются на экран, составленный из линз цилиндрической формы. Оптические лучи, несущие изображения разных снимков, отражаясь противоположными гранями линз экрана, попадают в разные глаза наблюдателя.

Оптический способ основан на разделении зрения с помощью оптических систем. Этот способ имеет широкое применение в фотограмметрии. Простейшими оптическими приборами, позволяющими получить пространственное изображение сфотографированного объекта, являются стереоскопы.

3□

O_2

b_s

O_1

1

2

3

1□

2□

Рис. 20. Линзово-зеркальный стереоскоп

Имеются линзовые стереоскопы, которые предназначены для рассматривания малоформатных снимков (6х6 см). Для работы с аэрофотоснимками, как в полевых, так и в камеральных условиях,

используют зеркальные стереоскопы с бинокулярной насадкой или линзово-зеркальные стереоскопы.

Линзово-зеркальный стереоскоп ЛЗ (Рис. 20) имеет две пары зеркал 1, 2 и 1', 2', установленных под углом 45° к плоскости горизонтально расположенных снимков; и две линзы 3 и 3'. Пунктиром на рисунке показан ход центральных лучей, O_1 и O_2 – узловые точки глаз (центры хрусталиков). Расстояния от центров линз 3 и 3' до снимков по ходу центральных лучей называются главными расстояниями стереоскопа, а отрезок между центрами больших зеркал 2 и 2' – базисом стереоскопа d . Если считать, что расстояние наилучшего зрения равно 250 мм, то увеличение стереоскопа $V=250/d$. Для получения стереокартины снимки следует устанавливать так, чтобы расстояние между соответственными точками примерно равнялось длине базиса стереоскопа, а отрезки между парой соответственных точек располагались на одной прямой параллельной его направлению. В зависимости от расположения снимков стереоэффект будет прямой, обратный или нулевой.

Стереоскопическое измерение снимков можно выполнять способами действительной и мнимой марки. Первый из них – уже практически история. Он применялся при монокулярном измерении снимков, а также при измерении модели, построенной по паре снимков с помощью поляроидов и анаглифов в некоторых проекционных приборах (мультиплексе, двойном проекторе и т.д.).

Способ мнимой марки предложен в 1899 г. Пульфрихом и используется для измерения координат точек пары снимков и модели. Суть его состоит в следующем. В плоскости изображений (снимков) располагают две действительные марки m_1 и m_2 (на рис. 50 показаны крестиками). При их рассматривании под стереоскопом в одну объемную картину сливаются не только изображения снимков, но и марок, то есть наблюдатель видит одну пространственную мнимую марку M . Но это произойдет только в случае, когда каждая из марок m_1 и m_2 будет расположена вблизи соответственных точек (например, a_1 и a_2). Причем, небольшое взаимное перемещение действительных марок (или снимков относительно марок) вдоль оси x вызовет перемещение мнимой марки по глубине. В результате она будет казаться либо «висящей в воздухе», либо «утопленной в землю». В последнем случае мнимая марка раздваивается, что дает возможность оценить поперечный параллакс. Когда действительные марки точно совмещены с соответственными точками (например, a_1 и a_2), создается впечатление касания мнимой марки поверхности стереомодели в точке A . Для того, чтобы этого добиться, стереоприбор должен обеспечивать совместное движение снимков (действительных марок) вдоль осей x и y , а также независимое движение одного из снимков (одной из марок), вдоль этих же осей. При наличии соответствующих шкал на таком приборе можно измерять параллаксы.

m_1

m_2

1
2
3
 p
 P_1
 P_2
 a_1
 a_2

Рис. 21. Параллаксометр

Наиболее простым прибором для измерения только продольных параллаксов p точек, является параллаксометр. Его принципиальная схема представлена на Рис. 21. На общем металлическом стержне 1 расположены две стеклянные пластинки с марками m_1 и m_2 и фиксатор 2. Марка m_2 при вращении барабанчика 3 перемещается вдоль стержня. Величину перемещения можно отсчитать: целые миллиметра - по шкале p на стержне, десятые и сотые доли - по барабанчику 3. Фиксатор 2 служит для накалывания наблюдаемых точек на основу (план).

Прибором для измерения фотокоординат, продольного и поперечного параллаксов является стереокомпаратор (Рис. 22). Их конструкции различны (например, СК-2, или стереокомпаратор 1818 фирмы «Цейсс»), но принципиальные схемы одинаковы. Основными частями любого стереокомпаратора являются:

1
2
3
 m_1
 m_2
 P
 Q
 X
 Y
4
5
6
7

Рис. 22. Схема стереокомпаратора

$\square_1$
 $\square_2$

Станина 1 с двумя взаимно перпендикулярными направляющими X и Y (при измерении наземных снимков – Z);

- Основная каретка 2, перемещается вдоль направляющей X при вращении штурвала X . Величину перемещения можно определить по шкале X ;
- Бинокулярная система 3 с марками m_1 и m_2 , перемещается вдоль направляющей Y при вращении штурвала Y . Отсчет можно взять по шкале Y ;

- Каретка продольных параллаксов 4 с винтом P , при вращении которого она перемещается вдоль оси X и который имеет шкалу для определения величины перемещения;
- Каретка поперечных параллаксов 5. При вращении винта Q она перемещается вдоль оси Y , и по его шкале можно оценить величину перемещения;
- Снимкодержатели 6 и 7. Их можно вращать в своей плоскости винтами Π_1 и Π_2

У стереокомпаратора есть осветительная система, и регулировки, обеспечивающие настройку бинокулярной системы по главному базису, по глазу и по предмету. Формы измерительных марок различны, но при увеличении они достаточно большие, и на рис. 23 стрелочками показано, какую их часть целесообразно использовать для точного наведения на измеряемую точку.

Рис. 23. Формы некоторых измерительных марок

Отметим, что марки бывают светящиеся (в основном круглые) и несветящиеся. Несветящиеся марки имеют чёрный цвет, и на тёмных участках снимков измерения затрудняются. В большинстве приборов устанавливаются светящиеся марки. Цвет марки задаётся с помощью сменных фильтров – зелёный, красный, белый и т.д.

Процесс обработки снимков на стереокомпараторе включает: установку снимков в снимкодержателях, их ориентирование, определение мест нулей шкал прибора и непосредственно измерения. Следует помнить, что негативы устанавливаются эмульсией вниз, а диапозитивы – эмульсией вверх.

Снимок считается сориентированным, если его оси координат параллельны соответствующим направляющим стереокомпаратора (Рис. 24 правый снимок). В зависимости от способа введения системы координат на снимках, ориентирование выполняют по координатным меткам (основной вариант), тогда этот процесс независим для левого и правого снимков или по начальным направлениям. В первом случае действуют в такой последовательности:

x
 y
 x
 y
 X
 Y
 1
 2
 3
 4

Рис. 24 Ориентирование снимков по координатным меткам

Штурвалами X и Y , измерительную марку совмещают с координатной меткой 1;

1. Штурвалом X марку перемещают по направлению к координатной метке 2.

Если она точно проходит через метку, значит снимок (правый на рис. 54) сориентирован.

2. Если марка оказалась выше или ниже, ее устанавливают на координатную метку 2, при этом половину перемещения осуществляют винтом $\square$, а половину штурвалом Y .
3. Операцию ориентирования выполняют методом последовательных приближений.

При ориентировании правого снимка диапазон перемещения каретки по оси X может оказаться недостаточным, в таком случае действуют и винтом продольных параллаксов P . Допустимо также использовать винт поперечных параллаксов вместо штурвала Y . И, наконец, заметим, что иногда снимок ориентируют и по вертикальным меткам, если, например, качество их изображений выше, чем качество изображений меток 1 и 2.

После ориентирования приступают к процессу измерения снимков. Он состоит в том, что штурвалами X и Y совмещают измерительную марку с выбранной на левом снимке точкой a_1 , а винтами P и Q , правую марку, совмещают с соответственной ей точкой a_2 . Указанные операции являются монокулярными и в принципе, после их выполнения, можно брать отсчеты по шкалам стереокомпаратора. Но если рассматривать снимки двумя глазами возникнет стереоэффект, будет наблюдаться одна пространственная марка и точность наведения можно повысить, для чего:

1. Вращением винта P пространственную марку «утапливают» и она раздваивается. В результате в плоскости изображения наблюдается одна из картин (рис 25). На картинках a и b марки расположены на разной высоте (говорят, что наблюдается поперечный параллакс). Выполнять точные пространственные измерения в этом случае трудно и параллакс стараются устранить.

a

b

c

Рис. 25. Устранение поперечного параллакса

61

d

Вращением винта поперечных параллаксов устраняют поперечный параллакс (картинка c).

2. Винтом продольных параллаксов приподнимают марку над точкой, а затем, вращая его в противоположном направлении, совмещают марку с точкой (картинка d), после чего и берут отсчеты по шкалам стереокомпаратора.

Особенности измерения цифровых снимков

Средства измерений

Измерение цифровых снимков выполняется на экране монитора. Оно может быть как монокулярным, если отображается один снимок (растр) и

стереоскопическим, когда на экране присутствуют растры, составляющие стереопару, а технология требует именно такого варианта измерений.

В качестве измерительной марки используется курсор (или два курсора). Его (их) форма, размер и цвет зависят от того, какой технологический процесс выполняется, а также могут устанавливаться и пользователем. Перемещение курсора (курсоров) осуществляется мышкой, соответствующими кнопками клавиатуры, а на фотограмметрической станции ЦФС, кроме того, ножным и ручными штурвалами. Методы стереонаблюдения: оптический, миганий и анаглифический.

Первый используется на ЦФС, для чего перед экраном дисплея устанавливается стереоскоп. В методе миганий используются затворные (жидкокристаллические) очки, в которых попеременно открывается изображение, то для левого, то для правого глаза. Синхронно с работой очков чередуются изображения снимков на экране монитора. При этом возможен интерлейсный режим при котором кадр делится на два полукадра, первый из которых содержится в четных строчках, а второй – в нечетных (при этом происходит снижение разрешения и возникают некоторые неудобства при работе с меню). Возможно и покадровое стерео (режим page-flipping). Оно обеспечивает более качественный стереоэффект, в связи с использованием полных кадров. Для того, чтобы оператор не уставал, нужна высокая частота вертикальной развертки. Как отмечалось выше, она должна быть не менее 120 Гц.

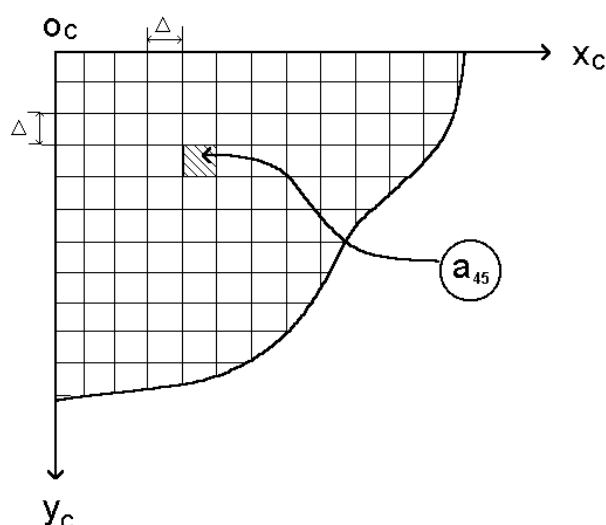
При анаглифическом методе на экране отображаются в разных цветах два наложенных друг на друга растра (например, красный и синий), а оператор должен использовать анаглифические очки. Как правило, есть возможность варьировать цветами растров и подобрать наилучший вариант (исходя из цветов стекол очков и пристрастий оператора).

Обычно в программных продуктах реализовано несколько вариантов стереонаблюдений, и можно переходить от одного к другому, но, по отзывам производителей, анаглифический метод измерений наименее точен, и его следует использовать как вспомогательный вариант. Кроме того, всеми разработчиками предусматривается переключение от прямого стереоэффекта к обратному, что очень полезно при работе со снимками залесенных и застроенных территорий. Возможна и коррекция самих растровых изображений (изменение плотности, контрастности и т.д.).

Большим достоинством измерения цифровых снимков является то, что после позиционирования одного из курсоров, второй можно навести на соответствующую точку автоматически, используя механизм корреляции. Он же позволяет автоматически сгущать число соответственных точек или набирать их в виде сетки квадратов, что важно для взаимного ориентирования снимков и построения цифровой модели рельефа. Но результат работы коррелятора нужно все время контролировать, особенно на однотонных участках снимков.

Принципы измерений

Рис.56



Цифровое изображение хранится в памяти компьютера, в общем случае, в виде прямоугольной матрицы, элементы которой несут информацию об оптических плотностях или цвете элементарных участков изображения, а номера i строки и j столбца элемента определяют его положение в матрице. Нумерация строк и столбцов матрицы цифрового изображения начинается с нуля.

Координаты центров пикселей в левой прямоугольной системе координат цифрового изображения $O_c x_c y_c$ (рис. 56), началом которой является левый верхний угол цифрового изображения, определяются в, так называемых, пиксельных координатах (единицей измерения в этом случае является пиксел) по формулам:

$$x_p = j + 0.5, \quad y_p = i + 0.5 \quad (125)$$

Для измерения координат точек цифрового изображения его визуализируют на экране дисплея. Если пиксел изображения на экране дисплея соответствует пикселу исходного цифрового изображения, то с помощью “мыши” или клавиатуры компьютера можно навести измерительную марку, формируемую в виде цифрового изображения на экране дисплея, на точку изображения с точностью до одного пиксела.

Для получения подпиксельной (субпиксельной) точности можно увеличить матрицу изображения на экране монитора относительно исходного цифрового изображения. В этом случае каждый пиксел исходного изображения будет изображаться матрицей $n \times n$ пикселей, численное значение всех элементов a'_{ij} которой будут равны численному значению элемента матрицы исходного изображения.

Пиксельные координаты точек увеличенного изображения можно измерить с точностью до $1/n$ пиксела исходного изображения (рис.57).

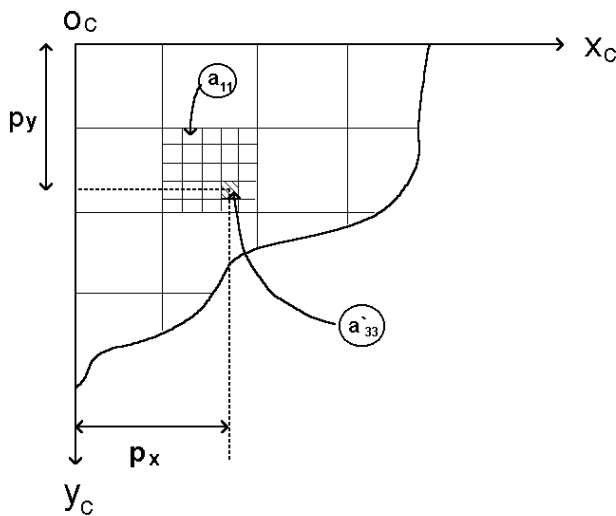


Рис. 57

Пиксельные координаты (в пикселах исходного изображения) элемента a'_{ij} увеличенного изображения определяют по формулам:

$$x_p = j + (j' + 0.5)/n, \quad y_p = i + (i' + 0.5)/n \quad (126)$$

Причем i, j - номера строки и столбца элемента матрицы исходного изображения, в котором находится элемент a'_{ij} увеличенного изображения, а i', j' - номера строки и столбца элемента a'_{ij} подматрицы $n \times n$; n - коэффициент увеличения изображения.

Например, для элемента a'_{33} (рис.57) пиксельные координаты:

$$x_p = 1 + (3 + 0.5)/5 = 1.7, \quad y_p = 1 + (3 + 0.5)/5 = 1.7$$

Значения координат центров пикселей цифрового изображения в метрической системе можно определить по значениям их пиксельных координат, используя соотношение:

$$x_c = \Delta \cdot x_p \quad \text{и} \quad y_c = \Delta \cdot y_p, \quad (127)$$

если известны физические размеры Δ стороны пиксела изображения (предполагается, что пиксел имеет форму квадрата). Например, координаты центра пиксела, соответствующего элементу a'_{33} (рис. 56) при величине $\Delta=20$ мкм будут равны $x_c = 34$ мкм и $y_c = 34$ мкм.

В некоторых цифровых системах начало системы координат цифрового изображения $O_C \ x_C \ y_C$ выбирают в центре пиксела, расположенного в верхнем левом углу цифрового изображения. В этом случае значения пиксельных координат вычисляют по формулам:

$$x_p = j \quad \text{и} \quad y_p = i \quad (128)$$

при измерениях с точностью до пиксела и по формулам:

$$x_p = j - 0.5 + (j' + 0.5)/n, \quad y_p = i - 0.5 + (i' + 0.5)/n \quad (129)$$

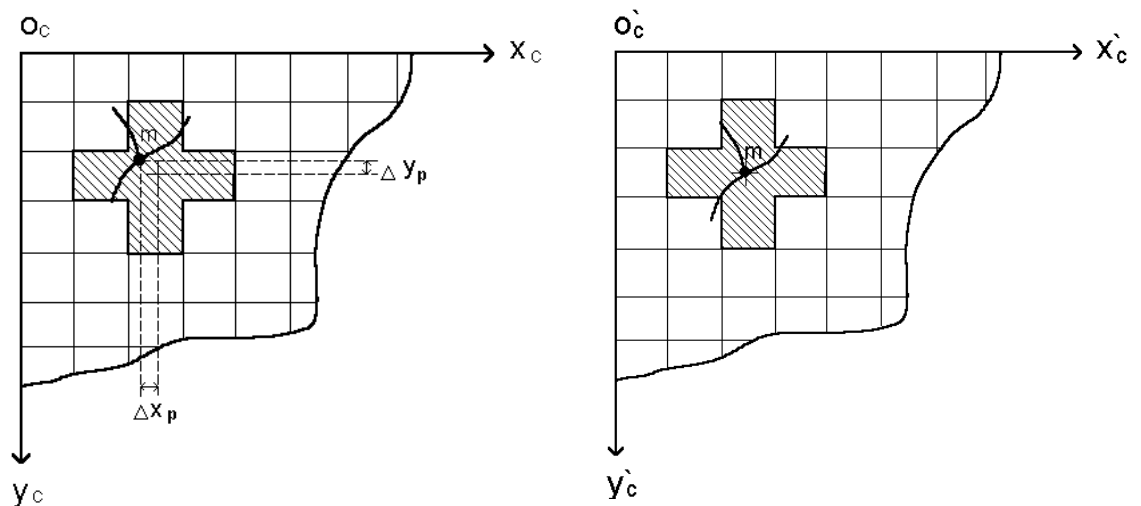
при измерениях с субпиксельной точностью.

Метод измерения цифрового изображения с субпиксельной точностью требует его увеличения на экране дисплея компьютера. Однако, даже при увеличении только в два раза, исходный аналоговый снимок может оказаться увеличенным на экране дисплея в 40 раз. Это приводит к значительному ухудшению изобразительных свойств наблюдаемого изображения и, как следствие, к снижению точности наведения измерительной марки на измеряемые объекты на изображении.

Для его реализации без увеличения исходного изображения, разработан метод, в котором цифровое изображение снимка может смещаться относительно неподвижной измерительной марки с шагом в n – раз меньшим размера пиксела.

Рис. 58

Рис. 59



Принцип такого метода измерения координат точек иллюстрируется на рис. 58 и 59.

На рис.58 представлен фрагмент исходного цифрового изображения с измерительной маркой и точкой m , координаты которой необходимо измерить. Из рисунка следует, что центр изображения марки не совпадает с изображением точки m , причем разности значений их пиксельных координат составляют величины Δx_p и Δy_p . Для совмещения центра изображения марки с точкой m можно создать фрагмент цифрового

изображения снимка, в котором координаты начала системы координат $o_c' x_c'$
 $x_{oc}' = \Delta x_p$ $y_{oc}' = \Delta y_p$
 y_c будут иметь значения , а .

Создается такой фрагмент следующим образом. По координатам центра каждого пиксела фрагмента изображения x'_{pi} , y'_{pi} определяют значения координат его проекции x_{pi} , y_{pi} в системе координат $ox_c y_c$ исходного изображения. Для этого используют формулы: $x_{pi} = x'_{pi} + \Delta x_{pi}$, $y_{pi} = y'_{pi} + \Delta y_{pi}$. Затем по значениям координат x_{pi} , y_{pi} находят ближайшие к изображению точки i , соответствующей центру пиксела создаваемого фрагмента цифрового изображения, четыре пиксела исходного цифрового изображения, например, М, К, L, N (рис. 60).

Далее методом билинейного интерполирования определяют значения оптической плотности i -го пиксела создаваемого фрагмента изображения. При этом:

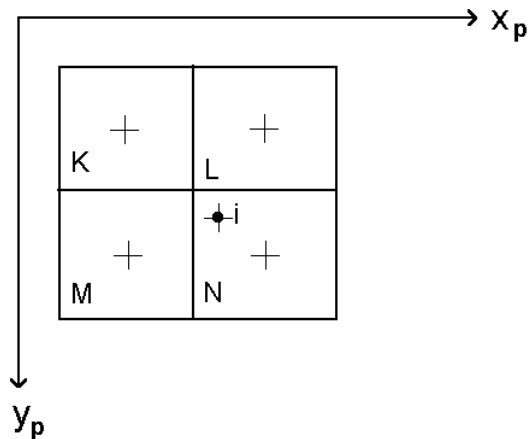
$$D_i = D_1 + (D_2 - D_1) \square X_p, \quad (130)$$

причем

$$D_1 = D_K + (D_M - D_K) \square Y_p,$$

$$D_2 = D_L + (D_N - D_L) \square Y_p,$$

Рис. 60



Таким же образом формируются все элементы создаваемого фрагмента цифрового изображения.

На экране дисплея, на визуализированном фрагменте созданного цифрового изображения центр измерительной марки будет совмещен с изображением точки m . Ее пиксельные координаты в системе координат исходного изображения определяются по формулам 129.

Необходимо отметить, что создание фрагмента цифрового изображения требует значительных вычислительных процедур. Поэтому для достижения эффекта перемещения изображения на экране дисплея относительно марки в “реальном масштабе” времени фрагмент изображения не должен иметь большие размеры.

В случае если для измерений используются цветные цифровые изображения при формировании элементов создаваемого изображения методом билинейного трансформирования по формулам 130. определяются интенсивности красного (R), зеленого (G) и синего (B) компонентов цветного изображения.

Механизм корреляции изображений

Одной из важнейших частей программ по цифровой обработке является корреляционный алгоритм, позволяющий автоматически определять соответственные точки снимков с высокой точностью, многократно увеличивая производительность труда оператора при проведении ориентирования в процессе измерений и построении ЦМР.

Отметим, что попытки автоматизировать процесс поиска соответственных точек (заменить при стереоизмерениях человека машиной) предпринимались еще в первой трети 20 века [12]. После второй мировой войны появилась реальная возможность решения этой задачи, и вскоре были созданы первые автоматические стереосистемы для измерения параллаксов электронными методами. При электронном определении параллаксов имеют место следующие два основных процесса: преобразование фотографических плотностей в электрические сигналы (то есть сканирование) и сравнение этих сигналов в корреляторе. Основная задача коррелятора оценить степень подобия между сигналами, идущими от снимков стереопары.

Величина продольного параллакса определялась как произведение скорости синхронно движущихся вдоль снимков сканирующих элементов на величину задержки времени между появлением подобных сигналов на левом и правом снимках стереопары. Определялось это время путем анализа выходного сигнала коррелятора, который должен быть равен максимуму при максимальном соответствии точек на левом и правом снимках.

При обработке цифровых снимков используется статистический метод, при котором участок на одном снимке сравнивается с различными участками на другом снимке. Причем речь идет о дискретных величинах, так как изображение – это множество пикселей, каждому из которых соответствует число (x , например, на левом снимке, а y – на правом) являющееся функцией оптической плотности. Поэтому коэффициент корреляции K можно оценивать по известной формуле:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{(n-1)\sigma'(X)\sigma'(Y)} \quad (13)$$

$\bar{x}, \bar{y}$

где $\bar{x}, \bar{y}$ – средние арифметические значения $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$ стандарты множеств X и Y тех числовых значений, которые принимают пиксели в сравниваемых окнах. Понятно, что решением является максимальное значение коэффициента корреляции. На этом принципе и основаны алгоритмы поиска соответственных точек в

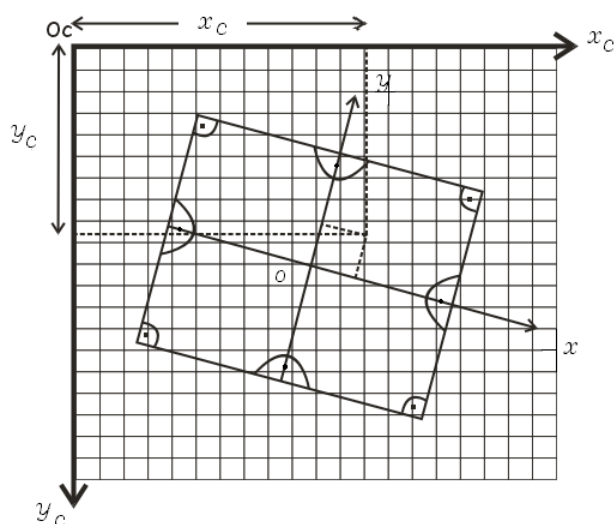
большинстве программных продуктов цифровых фотограмметрических систем. Для того, чтобы уменьшить зону поиска, как правило, предлагается две-три соответственные точки (иногда и больше) зафиксировать в ручную. Кроме того, следует отметить, что механизм работает тем лучше, чем менее монотонно изображение объекта на снимках пары. Поэтому оператору целесообразно контролировать качество работы коррелятора и вовремя вводить коррективы.

В некоторых алгоритмах (PHOTOMOD) используются локально-нормированные значения, плотности, что делает его нечувствительным к различным уровням яркости и контрастности левого и правого снимков и позволяет легко различить соответственные точки даже при работе с изображениями плохого качества. Алгоритм также позволяет изменять размеры корреляционного окна для достижения нужного компромисса между надежностью и точностью определения соответственных точек и использовать ряд других параметров настройки коррелятора. Использование эпиполярных снимков значительно ускоряет работу коррелятора, так как предполагается, что соответственные точки расположены на одних и тех же строках растров левого и правого снимков.

Внутреннее ориентирование снимка в системе координат цифрового изображения

Процесс внутреннего ориентирования снимка производится для определения координат точек в системе координат снимка по значениям их координат в системе координат цифрового изображения. В результате определяются параметры, характеризующие положение и ориентацию системы координат снимка S_{xyz} в системе координат цифрового изображения $O_cX_cY_c$, а так же параметры, позволяющие исключить влияние систематической деформации фотоматериала, на котором был получен исходный аналоговый снимок (рис.61). Для определения параметров внутреннего ориентирования снимка измеряют координаты изображений координатных меток снимка в системе координат цифрового изображения.

Рис. 61



Выбор метода определения параметров внутреннего ориентирования снимка зависит от методики фотограмметрической калибровки съёмочной камеры. Если в процессе ее были определены координаты координатных меток в системе координат съёмочной камеры (снимка) S_{xyz} , то для определения координат точек в системе координат снимка по значениям их координат в системе цифрового изображения используют формулы аффинного преобразования координат:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_0 \\ b_0 \end{pmatrix} + P \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_0 \\ b_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_1 & a_2 \\ b_1 & b_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \end{pmatrix} \quad (132)$$

которые можно представить и в развернутом виде:

$$\begin{cases} x = a_0 + a_1 x_c + a_2 y_c \\ y = b_0 + b_1 x_c + b_2 y_c \end{cases} \quad (133)$$

Формулы (132) позволяют не только определить положение и ориентацию системы координат снимка в системе координат цифрового изображения, но и учесть систематические искажения снимка, возникающие из-за деформации фотопленки, на которой был получен снимок.

Параметры аффинного преобразования a_i, b_i можно определить по координатам x_c, y_c координатных меток снимка, измеренных на цифровом изображении, и значениям координат x, y этих меток в системе координат снимка, полученным при калибровке съёмочной камеры.

Для определения параметров a_i, b_i для каждой метки, измеренной на цифровом изображении, составляют уравнения:

$$\begin{cases} a_0 + a_1 x_c + a_2 y_c - x = v_x \\ b_0 + b_1 x_c + b_2 y_c - y = v_y \end{cases} \quad (134)$$

Полученную систему уравнений решают по методу наименьших квадратов. При этом необходимо иметь не менее 3 координатных меток, не лежащих на одной прямой.

В практике фотограмметрии возникает задача определения значений координат точек в системе координат цифрового изображения по координатам этих точек, полученным в системе координат снимка. Такое преобразование координат выполняется по формулам:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = P^{-1} \begin{pmatrix} x - a_0 \\ y - b_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 & A_2 \\ B_1 & B_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x - a_0 \\ y - b_0 \end{pmatrix} \quad (135)$$

Или

$$\begin{cases} x_c = A_1(x - a_0) + A_2(y - b_0) \\ y_c = B_1(x - a_0) + B_2(y - b_0) \end{cases} \quad (136)$$

В формулах (135) и (136) A_i, B_i – элементы обратной матрицы P^{-1} . Значение пиксельных координат точек x_p, y_p определяют по формулам:

$$x_p = x_c / \Delta, \quad y_p = y_c / \Delta \quad (137)$$

В случае, если при калибровке съемочной камеры определялись калиброванные расстояния между координатными метками l_x, l_y (рис.62), то для перехода от измеренных координат к координатам в системе координат снимка используют уравнения:

$$\begin{cases} x = k_x [\cos \varphi (x_c - a_0) + \sin \varphi (y_c - b_0)] \\ y = k_y [-\sin \varphi (x_c - a_0) + \cos \varphi (y_c - b_0)] \end{cases} \quad (138)$$

в которых:

a_0, b_0 – координаты начала системы координат снимка в системе координат цифрового изображения;

φ – угол разворота оси x системы координат снимка относительно оси x_c системы координат цифрового изображения;

k_x, k_y – коэффициенты деформации снимка по осям x и y .

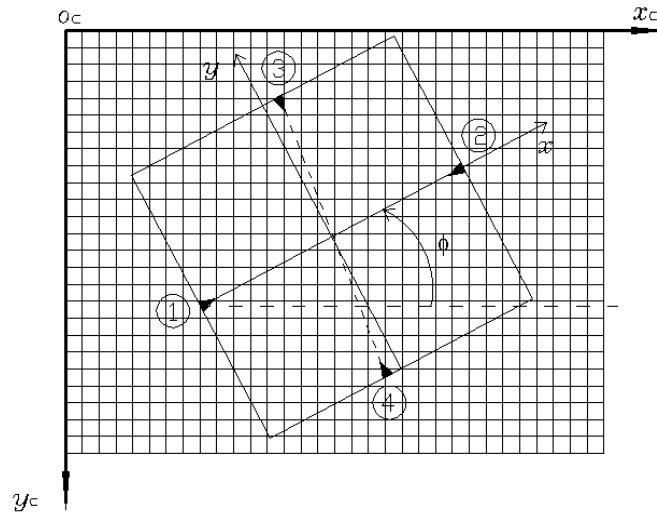
Если калиброванные расстояния между координатными метками не известны, то формулы принимают вид:

$$\begin{cases} x = \cos \varphi (x_c - a_0) + \sin \varphi (y_c - b_0) \\ y = -\sin \varphi (x_c - a_0) + \cos \varphi (y_c - b_0) \end{cases} \quad (139)$$

Значения параметров a_0 , b_0 , k_x , k_y определяют по измеренным значениям координат координатных меток в системе координат цифрового изображения системы, а для определения угла φ используют соотношение:

$$\varphi = \arctg \frac{y_{c2} - y_{c1}}{x_{c2} - x_{c1}} \quad (140)$$

в котором x_{c1} , y_{c1} и x_{c2} , y_{c2} – координаты 1 и 2 координатных меток в системе координат цифрового изображения.



Значения коэффициентов k_x , k_y определяют по формулам:

$$\left. \begin{aligned} k_x &= \frac{l_x}{l_{x\varphi}} = \frac{l_x}{\sqrt{(x_{c2} - x_{c1})^2 + (y_{c2} - y_{c1})^2}} \\ k_y &= \frac{l_y}{l_{y\varphi}} = \frac{l_y}{\sqrt{(x_{c3} - x_{c4})^2 + (y_{c3} - y_{c4})^2}} \end{aligned} \right\} \quad (141)$$

где x_{ci} , y_{ci} – координаты координатных меток в системе координат цифрового изображения.

Параметры a_0 , b_0 находят, как координаты x_c , y_c точки пересечения прямых линий, проведенных через координатные метки 1-2 и 3-4, при этом:

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{(y_{c4} - y_{c1}) + a_1 x_1 - a_2 x_4}{a_1 - a_2} \\ b_0 &= y_{c1} + a_1(a_0 - x_{c1}) = y_{c4} + a_2(a_0 - x_{c4}) \end{aligned} \right\} \quad (142)$$

В выше приведенных уравнениях:

$$a_1 = (y_{c2} - y_{c1}) / (x_{c2} - x_{c1}) \quad \text{и} \quad b_1 = (y_{c3} - y_{c4}) / (x_{c3} - x_{c4}).$$

Для определения координат точек снимка в системе координат цифрового изображения по координатам этих точек в системе координат снимка используют формулы:

$$\left. \begin{aligned} x_c &= a_0 + \frac{1}{k_x} (\cos \varphi x - \sin \varphi y) \\ y_c &= b_0 + \frac{1}{k_y} (\sin \varphi x + \cos \varphi y) \end{aligned} \right\} \quad (143)$$

в случае, если калиброванные расстояния l_x , l_y между координатными метками известны, и формулы:

$$\left. \begin{aligned} x_c &= a_0 + \cos \varphi x - \sin \varphi y \\ y_c &= b_0 + \sin \varphi x + \cos \varphi y \end{aligned} \right\} \quad (144)$$

если указанные расстояния не известны.

Необходимо заметить, что система координат цифрового изображения левая, поэтому в формулах 138 – 144 координата y_c берется с обратным знаком.

Определение пиксельных координат точек изображения производят по формулам (137).

Технологии фототопографических съемок

Основные технологические схемы

Прежде всего, заметим, что при топографическом обеспечении горных работ в основном имеют дело с планами (масштабы 1:500 – 1:5 000), поэтому о картографировании только в этих масштабах и пойдет далее речь. Существующие технологии составления планов по фотоснимкам можно представить в виде схемы (рис. 26).

Как ранее упоминалось, из представленных на рисунке технологий НФС применяется только в горной местности, когда объекты расположенные ближе к камере не перекрывают картографируемый участок местности. Ее имеет смысл применять при маркшейдерском обслуживании открытых горных работ, если экономически невыгодна или невозможна аэрофототопографическая съемка. Комбинированную АФС применяют, при возникновении проблем с отображением по фотоснимкам рельефа местности, например, в случаях, когда местность равнинная, или она закрыта (застроена, покрыта высокой и плотной растительностью), а также, если повышены требования к точности отображения рельефа. Комбинированную АФС по возможности пытаются избегать из-за большого объема полевых работ, а значит высокой их стоимости и низкой производительности.

Стереотопографический метод АФС является основным, и его не применяют только по причинам, которые были обозначены выше. Таким

образом, есть веские основания начать изучение АФС с рассмотрения технологии стереофототопографической съемки.

Стереотопографический метод АФС

Технологические схемы

Сущность метода заключается в том, что в камеральных условиях по фотоснимкам получают и контурную часть плана, и изображение рельефа. Полевые работы необходимы только для определения плановых координат (высот) опознаков и дешифрирования снимков.

Теоретической основой метода является решение двойной обратной пространственной фотограмметрической засечки. Но характер и последовательность выполнения основных процессов зависит в основном от двух факторов: применяемого для обработки снимков оборудования, и необходимости составления фотоплана (ортофотоплана).

Заметим, что в процессе развития стереофототопографического метода, было предложено 4 разных концепции использования пары снимков для составления по ним планов и карт. Первая связана с расчленением технологии на отдельные: процессы. Вторая предполагала физическое построение с помощью аэро или наземных снимков точных пространственных моделей (геометрически подобных уменьшенных копий того, что имело место в процессе фотографирования местности). Решение двойной обратной пространственной засечки обходилось в этом случае без значительных математических расчетов. В третьей было реализовано аналитическое решение основных процессов указанной выше засечки: восстановление связок проектирующих лучей (внутреннее ориентирование снимков), взаимное ориентирование (построение модели), внешнее ориентирование модели, определение координат точек местности. Четвертая основана на цифровой обработке информации современными средствами вычислительной техники.

На основе первых двух концепций появились в свое время (в рамках стереотопографической съемки местности) два метода картографирования по снимкам дифференцированный и универсальный.

В дифференцированном методе картографирования, каждый процесс выполнялся по своей технологии только для него предназначенными средствами. При этом элементы взаимного ориентирования снимков определялись по результатам измерений координат и параллаксов соответственных точек на стереокомпараторах. Изображение рельефа местности осуществлялось путем измерения пары плановых снимков на стереомере, который в 30^х годах сконструирован Ф.В. Дробышевым. Трансформирование снимков производилось на фототрансформаторах. Несмотря на то, что указанная технология имела выдающееся значение при картографировании территории СССР в масштабе 1:25 000 и 1:100 000, на

ней не стоит останавливаться, так как она теперь имеет только историческое значение. Приборы, предназначенные для реализации универсального метода стереотопографической съемки, и называли универсальными аналоговыми приборами. А поскольку оператор выполнял на них стереоизмерения, то полное их название – универсальные аналоговые стереофотограмметрические приборы. Следует отметить, что эра и этих приборов близка к закату. Их уже не производят и из производственного процесса постепенно исключают, так как возможности этих приборов значительно ограничены и по производительности и по параметрам обрабатываемых снимков, и по учету различных искажений снимков (кривизны Земли и рефракции, деформации эмульсионного слоя, дисторсии объектива и проч.).

На смену моделирующим приборам пришли аналитические стереоприборы, у которых таких ограничений нет. Их предшественники стереокомпаратор и вычислительная машина. И именно отсутствие соответствующих средств вычислений долгое время сдерживало развитие аналитической фотограмметрии. В настоящее время на производстве имеется парк универсальных аналитических стереофотограмметрических приборов. Но и их век весьма ограничен, так как выяснилось, что высокоточные измерения, причем с элементами автоматизации, можно выполнять и на экране монитора.

К цифровым методам обработки снимков привело бурное развитие вычислительной техники. За ними не только будущее, но, пожалуй, уже и настоящее. На первый взгляд цифровые и аналитические методы это одно и то же. Но это не так. В аналитических методах основным источником информации является фотоснимок, который и измеряется оператором для определения координат и параллаксов. Значит аналитический прибор, как обрабатывающая система обязательно имеет той или иной конструкции стереокомпаратор. Цифровые методы имеют дело с цифровым снимком на магнитном носителе, который получают как результат сканирования фотоизображений или путем фотографирования цифровыми камерами. Часть информации может быть получена в процессе дигитализации существующих картографических материалов. Все это обрабатывается синтетически на компьютере. Результат обработки контролируется на экране дисплея, в том числе и в трехмерном виде.

Фотопланы (ортофотопланы) как основу топографического плана есть смысл составлять, если снимаемая территория (незастроенная, с рассредоточенной и малоэтажной застройкой) характеризуется большим количеством контуров. В соответствии с рекомендациями инструкции [9], при съемке в масштабе 1:5 000 фотопланы используют как основу при любом характере застройки. Но при съемке участков с многоэтажной застройкой земной поверхности в масштабах 1:2 000 и крупнее фотопланы не составляют.

С учетом всего сказанного, последовательность выполнения технологических процессов в стереотопографическом методе съемки можно представить так, как это сделано на рис. 27.

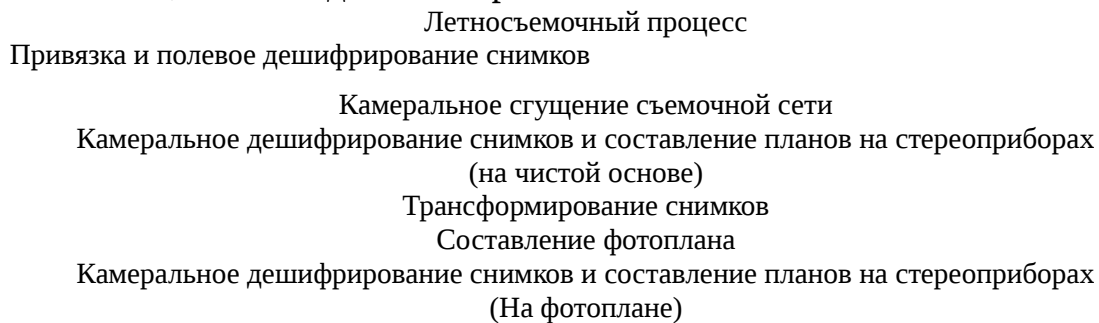
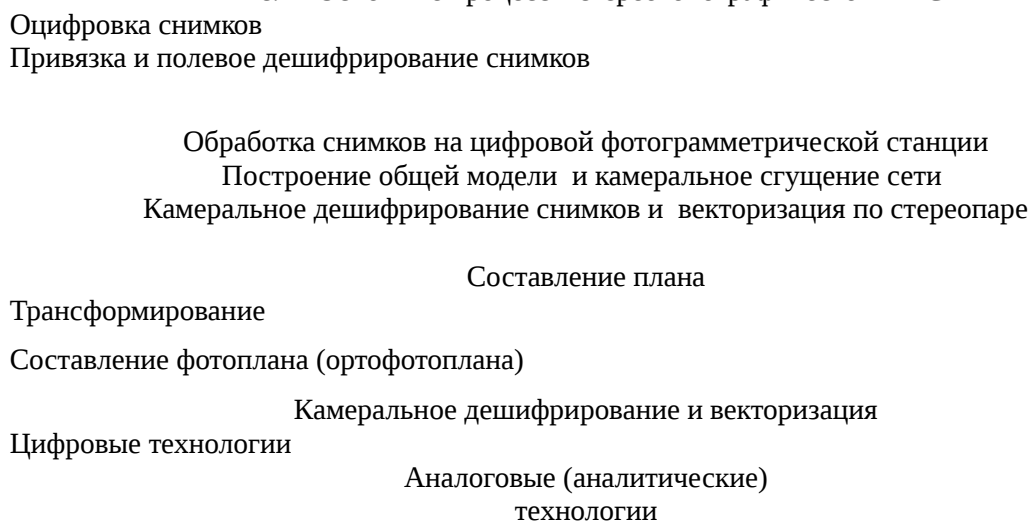


Рис.27 Основные процессы стереотопографической АФС



Летносъёмочный процесс

Как указывалось выше, целью лётно-съёмочных работ является получение аэрофотоснимков местности определенного качества. Аэрофотосъёмка для картографических целей производится АФА, как правило, с пилотируемых самолётов, пролетающих над местностью по заранее намеченным на карте маршрутам (маршрут - ряд перекрывающихся снимков одного направления). Прокладывают их так, чтобы снимки без разрывов покрывали всю картографируемую территорию. Для этого планируют и поперечные перекрытия Q между снимками смежных маршрутов. Для того чтобы получить снимки заданного качества, перед фотографированием местности выполняют расчет параметров аэрофотосъемки и составляют полетную карту на топографической основе, как правило, более мелкого масштаба, чем масштаб аэрофотосъёмки.

Для расчета необходимо знать размеры съёмочного участка, масштаб составляемого плана, фокусное расстояние аэрофотоаппарата, масштаб фотографирования и характеристику местности (в частности, его рельефа).

Съёмочный участок наносят на полетную карту. Обычно его границами служат рамки трапеций. При съёмках с целью создания карт и планов в

масштабах 1:25 000, 1:10 000, 1:5 000, 1:2 000 минимальный размер съёмочного участка ограничивается рамками трапеций в масштабе на один ряд более мелком, чем масштаб фотографирования. Например, при съёмке с целью создания карты в масштабе 1:25 000 минимальный съёмочный участок ограничивается рамками трапеции масштаба 1:50 000. Если создаются топографические планы в масштабах 1:1 000 и 1:500, площадь съёмочного участка не должна быть менее 1 км².

Для стереотопографического метода съёмки важно учитывать, что точность определения высот точек по результатам измерения продольных параллаксов обратно пропорциональна высоте фотографирования. Значит, при заданном масштабе фотографирования, чтобы лететь ниже, необходимо использовать короткофокусные АФА ($f = 70 - 100$ мм). Если технологией предусмотрено составление фотоплана, то возникает противоречие, так как для уменьшения смещения точек за рельеф следует лететь выше (Это не относится к цифровой технологии, если предполагается процесс ортофототрансформирования снимков). В такой ситуации фотографирование местности выполняют двумя коротко и длиннофокусными АФА, при соотношении масштабов фотографирования 1:2. При этом фотографирование в одном направлении осуществляют двумя камерами, в обратном – только длиннофокусным АФА. В процессе составления плана снимки с мелким масштабом используют для стереоскопической рисовки рельефа, крупномасштабные снимки – для составления фотопланов и дешифрирования.

Масштаб фотографирования зависит от масштаба составляемого плана, высоты сечения рельефа, а также от возможного соотношения между масштабами снимка и составляемого плана (то есть от характеристик используемого фотограмметрического оборудования). В инструкции [9, табл. 16 и 17] приведены соответствующие рекомендации. В цифровой фотограмметрии, где пределов на увеличение практически нет, указанное выше соотношение не следует выбирать более 10 (имея в виду, предельную графическая точность, равную 0.1 мм, и точность измерения снимков на мониторе компьютера не выше 0.01 мм).

После выбора m и f рассчитывают высоту фотографирования H над средней плоскостью съёмочного участка $H = mf$.

Величины продольного P и поперечного Q перекрытий регламентированы основными положениями [7], но в любом случае для обработки стереопар P не должно быть меньше 50 %. Поперечные перекрытия Q ограничивают 20-40 %.

Значения P (заданное) и Q (расчетное) регламентируют длину базиса фотографирования B и расстояние между осями смежных маршрутов D . Они вычисляются по формулам:

$$B = \frac{100 - P}{100} l_x m \quad D = \frac{100 - Q}{100} l_y m \quad (145)$$

где l_x и l_y – длины сторон снимка, расположенные соответственно вдоль и поперёк маршрута.

Протяжённости съёмочного участка по направлению полёта L_x и в поперечном направлении L_y измеряются по карте. Имея значения L_x и L_y , можно установить число маршрутов N и число снимков n в каждом маршруте.

$$N = \frac{L_y}{D} + 1 \quad n = \frac{L_x}{B} + 2 \quad (146)$$

Два снимка и один маршрут добавляют для обеспечения границ съёмочного участка, а каждую из дробей при вычислении округляют в сторону большего целого числа. Общее число снимков $k = Nn$.

Чтобы выполнить съёмку с заданным продольным перекрытием, рассчитывается интервал τ между экспозициями в секундах, по формуле:

$$\tau = 3600 \frac{B}{W} \quad (147)$$

где B – базис фотографирования в км, а W – путевая скорость самолета в км/час.

Поскольку самолет в момент экспозиции летит, точки на снимке изображаются отрезками (изображение смазывается). В соответствии с основными положениями [7] допустимая величина δ «смаза» равна 0.05 мм. Добиваются удовлетворения этого требования либо применением в АФА компенсатора сдвига изображения, либо расчетом предельно допустимой экспозиции t по формуле:

$$t = \frac{\delta H}{fW} \quad (148)$$

Используя результаты выше приведенных расчетов, для каждого съёмочного участка на полетную карту наносят оси маршрутов. На каждом маршруте выбирают ориентиры и указывают их магнитные путевые углы.

Фотографирование каждого съёмочного участка выполняется непрерывными маршрутами одним и тем же аэрофотоаппаратом, при одних и тех же перекрытиях и неизменной высоте полета по отношению к его средней плоскости. Аэрофотосъёмка может выполняться с использованием гиросtabilизирующей системы и специальных приборов. Производится она в основном в безоблачную погоду при высоте Солнца над горизонтом не менее 20° .

В процессе производства аэрофотосъёмки одновременно с получением фотоснимков фиксируются превышения и высоты точек фотографирования. В процессе съёмки могут быть определены также и их координаты.

Аэрокамера ориентируется в аэрофотоустановке так, чтобы сторона снимка была параллельна направлению полёта носителя. Если это условие не выполняется, то снимки перекрывающимися частями накладываются друг на друга уступом (образуется «ёлочка») и, как следствие, уменьшается площадь перекрытий.

Если картографируемый участок беден контурами, фотографированию может предшествовать маркировка точек местности. Это, как правило, знак на местности в форме креста, со свободным пространством в центре. Длина и ширина каждого луча должна быть не менее 0.15 и 0.05мм соответственно в масштабе снимка, а расстояние луча от центра знака – 0.05мм. Цвет знаков должен быть контрастным по отношению к окружающему фону.

После производства лётно-съёмочных работ, фотографической обработки экспонированных плёнок, нумерации негативов местности, плёнок статоскопа и радиовысотомера, на фотобумаге изготавливают контактные отпечатки (снимки) и составляют из них накидной монтаж – фотографическое изображение местности, полученное путём совмещения контактных отпечатков перекрывающимися частями.

Качество материалов аэрофотосъёмки оценивается по фотографическим и фотограмметрическим показателям. Фотографическое качество проверяется сличением аэрофильма с эталоном или посредством фотометрических определений плотностей. Проверяется также качество изображения координатных меток, часов и уровня, отсутствие механических повреждений эмульсии и т.д.

Фотограмметрическое качество оценивается с целью определения соответствия параметров полученных снимков заданным параметрам фотографирования. По измерениям на накидном монтаже проверяют: соответствие перекрытий снимков; прямолинейности маршрутов аэрофотосъёмки и параллельности базисов фотографирования сторонам снимка («ёлочки») допустимым значениям. По измерениям снимков устанавливают также соответствие фактической высоты фотографирования заданному значению; оценивают предельные углы наклона снимков и выравнивание фильма в плоскость.

Методика оценки, а также качественные и количественные характеристики допустимых показателей излагаются в нормативных документах или в специальных технических условиях, например в основных положениях [7].

В результате выполнения лётно-съёмочных работ для последующей фотограмметрической обработки получают аэронегативы, контактные отпечатки, репродукции накидного монтажа и их негативы, негативы показаний спецприборов, паспорт аэрофотосъёмки. В паспорте аэрофотосъёмки указываются: тип самолёта, на котором установлена аппаратура; фокусное расстояние аэрофотоаппарата и постоянные статоскопа; расстояние между координатными метками прикладной рамки или координаты оптических меток; величина фотограмметрической дисторсии по осям и зонам; координаты главной точки.

В заключение этого параграфа отметим, что выбор технологии обработки снимков (аналоговый она или цифровой) мало влияет на характер летносъёмочных работ. Дальше этот фактор становится принципиальным. Но ряд процессов являются общими для любой технологии. К ним можно отнести трансформирование снимков, сгущение сети (фототриангуляцию) и дешифрирование. Поэтому на них и остановим пока свое внимание.

Особенности цифрового трансформирования и составления фотоплана

Общие положения

Из рис. 52 следует, что некоторые технологические варианты стереотопографической АФС предусматривают составление фотопланов или ортофотопланов. Фотоплан (ортофотоплан) это фотографическое изображение местности составленное из трансформированных снимков (ортофотоснимков) одного масштаба. Как правило, их составляют на полную трапецию, и выполняют зарамочное оформление, как у плана. По точности они должны соответствовать плану. Фотографическое изображение местности, составленное из плановых снимков, называется фотосхемой. Их точность ниже точности фотопланов, поэтому они используются для приближенных количественных оценок в лесоустройстве, землеустройстве и т.д. Фотосхемы бывают одномаршрутные и многомаршрутные.

Трансформирование снимка в широком смысле это целенаправленное изменение его геометрических свойств с целью преобразования в заданную проекцию. Каждое преобразование изменяет одни геометрические свойства исходного изображения и сохраняет другие. Те свойства, которые не изменяются, называются инвариантами относительно данного геометрического преобразования.

В фотограмметрии чаще всего используются перспективное и аффинное преобразования, ортофототрансформирование и масштабирование.

Трансформированным называется снимок, полученный путем перспективного преобразования наклонного снимка и имеющий допустимые величины смещений точек от их горизонтальной проекции. Отметим, что оно не меняет проекции. Трансформированный снимок тоже построен по законам центральной проекции. Поэтому искажения за рельеф остаются. Доводят их до допустимых значений путем соответствующего выбора плоскости трансформирования, относительно которой превышения точек местности не превосходят установленных значений. Если же местность холмистая, снимок трансформируют по частям (зонам), выбирая для каждой зоны свою плоскость трансформирования. При числе зон больше 3 возникают трудности в процессе составления фотоплана, поэтому вместо перспективного трансформирования применяют ортофототрансформирование.

Ортофотоснимок построен в ортогональной проекции, то есть при ортофототрансформировании происходит переход от центральной проекции исходного снимка к ортогональной проекции снимка, полученного после трансформирования. Искажений за рельеф у таких снимков нет. Но выполнить ортофототрансформирование можно только после построения геометрической модели местности по паре снимков. Поэтому оно будет рассмотрено позже.

Перспективное трансформирование

Перспективное трансформирование может быть выполнено различными способами: графическим, оптико-графическим, фотомеханическим, аналитическим и т.д. В фотограмметрии наибольшее применение получили два последних.

Теоретическим обоснованием *аналитического способа* являются формулы трансформирования (40). Для вычисления по ним необходимо выполнить измерения координат x и y точек, трансформированные координаты которых требуется получить, и знать элементы внешнего ориентирования наклонного снимка. Точное их значение обычно неизвестно, поэтому трансформируют по опорным точкам (опознакам). Для определения минимального числа опознаков, воспользуемся уравнениями коллинеарности (30). При этом примем координаты центра проекции равными нулю и разделим числители и знаменатели правых частей на $-c_3f$, в результате получим:

$$X = \frac{A_1(x - x_0) + A_2(y - y_0) + A_3f}{C_1(x - x_0) - C_2(y - y_0) + 1},$$

$$Y = \frac{B_1(x - x_0) - B_2(y - y_0) + B_3f}{C_1(x - x_0) - C_2(y - y_0) + 1},$$

где, например, $A_1 = Ha_1/c_3f$, $B_1 = Hb_1/c_3f$, и т.д.

Если координаты опознаков, координаты их изображений на снимке и элементы внутреннего ориентирования снимка известны, то неизвестными в уравнениях являются восемь коэффициентов. Они однозначно определяют перспективную зависимость между наклонным и горизонтальным снимками. Эти коэффициенты называют элементами трансформирования. Поскольку один опознак позволяет составить два уравнения, то для определения коэффициентов их нужно как минимум 4. Зная их можно выполнять трансформирование, используя уравнения (40), но для приведения трансформированного снимка к заданному масштабу все полученные координаты x^0 и y^0 умножают на коэффициент трансформирования k , то есть трансформированные координаты $x_m = kx^0$, и $y_m = ky^0$.

Для того, чтобы понять суть фотомеханического трансформирования (его еще называют оптико-механическим), предположим, что элементы внутреннего и внешнего ориентирования снимка известны. Восстановим связку проектирующих лучей и поместим ее в положение, которое она

занимала в момент фотографирования, затем пересечем связку горизонтальной плоскостью E (рис. 65).

В результате на экране получим трансформированное изображение наклонного снимка. В соответствии с рис.65 его масштаб можно вычислить по формуле:

$$1/t = kf/H_0, \quad (14,9)$$

S
 A
 B
 P
 E
 a
 a'
 b
 b'
 A_0
 B_0
 n
 N
 n_0
 a'_0
 a_0
 b'_0
 b_0
 H_0
 kf
 h_a
 h_b
 r
 r^0

Рис.65 Перспективное трансформирование

где k – коэффициент трансформирования, H_0 – высота фотографирования над средней плоскостью участка (плоскостью трансформирования).

На практике, по уже известным причинам, установку связки относительно экрана выполняют по опознакам. Для этого на экран укладывают основу с, опознаками (их должно быть не менее четырех), выполненную в масштабе, который равен заданному масштабу трансформированного изображения. На снимке делают отверстия (диаметром 0.2 – 0.3 мм) в точках, где изобразились опознаки, и с помощью проектора проецируют его на экран. Затем взаимным перемещением основы и проектора добиваются, чтобы изображения

спроектированных на экран отверстий совпали с соответствующими трансформационными точками на основе, после чего последнюю убирают. В результате изображение на экране будет соответствовать трансформированному снимку. Его нужно только зафиксировать, например, сфотографировать.

Отметим, что рассмотренная выше технология работает идеально при трансформировании наклонного снимка равнинной местности. Если местность холмистая, то необходимо учитывать смещения точек за рельеф. Например, в соответствии с рис. 65, при установке связки нужно добиваться, либо совмещения точек a' и a_0 , либо точек a и a'_0 , так как именно эти пары находятся в перспективном соответствии (расположены на одних и тех же проектирующих лучах). Значит перед процессом совмещения необходимо ввести поправки в положение всех опознаков, либо на снимке r_c , либо на основе r_o . Вычисляются они по формулам:

$$r_c = -rh/H_0 \quad \text{и} \quad r_o = hr_o/(H_0 - h) \quad (150)$$

Как правил, поправки вводят на основе, при условии, что они больше 0.3 мм. Полученные в результате точки для совмещения называют ориентирующими.

Нельзя, кроме того, забывать, что на трансформированном снимке будут смещены все точки, расположенные выше или ниже плоскости трансформирования. И если эти искажения больше допустимых, снимок следует трансформировать по частям (по зонам).

Прибор, с помощью которого реализуется, выше рассмотренная, технология перспективного трансформирования называется фототрансформатор. По существу это усовершенствованный высокоточный фотоувеличитель. Основными частями фототрансформатора являются: направляющие, экран, кассета, объектив и источник света с параболическим отражателем. Имеется, кроме того, система винтов и устройств, обеспечивающих путем взаимного перемещения кассеты, объектива и экрана построение на экране трансформированного изображения в заданном масштабе.

$\square$
 S
 A
 a
 o
 i
 F
 $H_0/t = kf$
 d_2
 F_e
 F_p
 f
 d_1

φ_0
 φ_p
 K
 T
 P
 N
 Y
 Y
 φ

Рис. 66 Разрез в плоскости главного вертикала

E

Различают фототрансформаторы I и II рода. В фототрансформаторах I рода трансформирование выполняется при сохранении той связки проектирующих лучей, которая существовала в момент фотографирования. Рассмотрим, используя рис. 66, как в этом случае подбирается фокусное расстояние его объектива.

Предположим, что через отрезок Aa на рисунке проходит главная оптическая ось объектива S , а через точку схода i его главная фокальная плоскость. Известными при выборе фокусного расстояния F объектива считаются: фокусное расстояние снимка, f , его угол наклона φ и коэффициент трансформирования k . В соответствии с рис. 66 можно записать:

$$F = F_p \sin \varphi_0 \quad (151)$$

Выразим функцию синуса в формуле (151) через тангенс:

$$\sin \varphi_\varepsilon = \frac{\operatorname{tg} \varphi_\varepsilon}{(1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_\varepsilon)^{\frac{1}{2}}} \quad (152)$$

Из треугольника SNT имеем:

$$\operatorname{tg} \varphi_\varepsilon = \frac{kf}{F_p + F_\varepsilon \cos \varphi} \quad (153)$$

А из треугольников Soi и SNK следует:

$$F_p = f / \sin \varphi \text{ и } F_\varepsilon = kf / \sin \varphi \quad (154)$$

Поэтому:

$$\operatorname{tg} \varphi_\varepsilon = \frac{kf}{\frac{f}{\sin \varepsilon} + \frac{kf}{\sin \varepsilon} \cos \varphi} = \frac{k \sin \varepsilon}{1 + k \cos \varphi}$$

С учетом полученного равенства и соотношения (152):

$$\sin\varphi_\varepsilon = \frac{k \sin\varepsilon}{(1+k\cos\varepsilon) \left[1 + \left(\frac{k \sin\varepsilon}{1+k\cos\varepsilon} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} = \frac{k \sin\varepsilon}{(1+2k\cos\varepsilon+k^2)^{\frac{1}{2}}}$$

И, наконец, с учетом выражения для $\sin\varphi_\varepsilon$ и первой формулы соотношения (154) окончательно получим:

$$F = \frac{kf}{(1+2k\cos\varepsilon+k^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (155)$$

Мы теперь не просто знаем, как подбирать объектив, но видим существенный недостаток трансформатора I рода: необходимость иметь бесконечно большой набор объективов с различными фокусными расстояниями, если требуется трансформировать снимки при различных параметрах f , φ и k . Рассмотрим, как этот недостаток преодолеть.

Предположим, что началом координат на снимке является точка i , а на экране точка K . Пусть оси ординат направлены вдоль линий главного вертикала и направления съемки. Тогда из подобия треугольников ASK и Sai имеем: $Y=F_p F_0/y$. Так же легко доказать, что $X=x F_0/y$. Полученные равенства показывают, что перспективное соответствие между наклонным и горизонтальным снимками не нарушается при изменении f , φ и k , если не изменяются отрезки F_p и F_0 . То есть, можно подбирать не объектив к исходным параметрам, а наоборот изменять эти параметры так, чтобы они подходили к объективу фототрансформатора, но не изменяли выше указанных отрезков F_p и F_0 , которые в связи с этим назвали инвариантами трансформирования. Ясно, что при этом изменится положение точки S , но только в пределах плоскости главного вертикала. Такая технология реализована в фототрансформаторах II рода, которые и используется на производстве. Теперь можно сформулировать условия (геометрические и оптические), при которых на экране будет построено изображение трансформированного снимка высокого качества. Геометрические условия:

1. Центр проекции S должен располагаться в плоскости главного вертикала на окружности с центром в точке i и радиуса $F_p=f/\sin\varphi$.
2. Плоскость экрана должна быть параллельна отрезку Si , а отрезок $F_0=kf/\sin\varphi$.

Оптические условия:

1. Расстояния вдоль оптической оси объектива от центра проекции до снимка и экрана должны удовлетворять формуле оптического сопряжения.
2. Для достижения хорошей резкости в пределах всего трансформированного изображения необходимо, чтобы плоскости снимка, объектива и экраны пересекались по одной прямой (условие Шейпфлуга).

Заметим, что выполнение оптических условий в фототрансформаторах выполняется автоматически, с помощью специальных устройств –

инверсоров. Так, выполнение первого из условий обеспечивает масштабный инверсор, а второго – перспективный.

Кроме того, нельзя не отметить, что установка снимков в кассету фототрансформатора осуществляется по координатным меткам с помощью рисок, нанесенных на стекле. Поэтому оптическая ось объектива проходит практически через главную точку. Но в соответствии с рис. 66 главная точка должна быть смещена на величину Δ (отрезок oa). Технологией такая операция предусмотрена и называется децентрацией снимка. Таким образом, элементами трансформирования снимков следует считать угловые величины $\Delta_p, \Delta_0, \Delta$ и линейные - d_1, d_2, Δ .

На производстве использовалось большое число самых разнообразных по конструкции фототрансформаторов, как отечественных, так и зарубежных. Наиболее популярными были: фототрансформатор большой (ФТБ), фототрансформатор малый (ФТМ), и фототрансформаторы фирмы Карл Цейсс (ГДР).

Составление фотоплана

В зависимости от целевого назначения различают фотопланы топографические и специальные. Первые составляют в общегосударственной разграфке с соблюдением инструкций и наставлений по топографическим съемкам (например, инструкции [9]). Специальные фотопланы составляют, как правило, в произвольной разграфке, и они должны удовлетворять требованиям ведомственных инструкций. В отличие от графического плана, фотопланы обладают большей наглядностью, поэтому многими специалистами и используются. На них могут быть нанесены горизонталы. В результате получается фотокарта.

Фотопланы составляют из трансформированных снимков путем монтажа их на основе по опорным точкам. Иногда их составляют из плановых снимков, если при фотографировании местности применялись АФА с гиросtabilизирующей установкой. Действительно, в соответствии с формулой (51) и с учетом коэффициента трансформирования можно записать:

$$\delta r_\varepsilon = -k \frac{r^2}{f} \varepsilon$$

Пусть $f=200$ мм, $r=70$ мм, $\Delta=10^\circ$ и $k=2$, тогда смещение за наклон $\Delta r_0=0.14$ мм, что вполне удовлетворительно. Значит, снимки можно просто увеличить до масштаба составляемого фотоплана, после чего и выполнять монтаж.

Фотоплан составляют на жесткой основе (бумаге, наклеенной на алюминий, авиационной фанере или пластике), на которой по координатам в заданном масштабе нанесены опознаки, пункты геодезической сети и

трансформационные точки. Выполняют это либо путем монтажа отдельных фотоснимков либо путем оптического монтажа с одновременным трансформированием по зонам. Основными процессами составления первым из названных способов являются: подготовительный, монтаж снимков, контроль качества фотоплана и его оформление.

Подготовительные работы включают: подбор фотоснимков по трапециям и по маршрутам в пределах трапеции; контроль их качества и точности трансформирования; пробивку пуансоном отверстий диаметром около 1 мм на всех опорных, трансформационных точках, и пунктах геодезической сети. Контроль точности трансформирования выполняют путем совмещения отверстий на снимке с соответствующими точками на основе так, чтобы отклонение центров отверстий от точек были одинаковыми. Снимки, для которых эти отклонения превышают 0.4 мм, а также снимки с резкими изменениями фототона трансформируют заново.

Монтаж начинают с левого снимка северного маршрута. Его укладывают на основу, усредняют погрешности совмещения центров отверстий с точками на основе и закрепляют грузиками. Затем на основу укладывают второй снимок, так же совмещают отверстия с опорными точками и, закрепив его, проверяют сходимость контуров в зоне перекрытия. Для этого накалывают четкий контур на верхнем снимке и проверяют, где он оказался на нижнем снимке. Отклонение накала от контура не должно превышать 0.7 мм. После этого разрезают оба снимка одновременно примерно посередине продольного перекрытия. Линия пореза не должна проходить через ответственные контуры и вдоль линейных объектов. Обрезки от каждого снимка сохраняют для последующего контроля, а соответствующие части первого и второго снимков наклеивают на основу. Аналогичные операции выполняют при соединении второго и последующих снимков маршрута, а также при монтаже снимков смежных маршрутов. Но в последнем случае контроль сходимости контуров, а также порез, осуществляют и по поперечным перекрытиям.

У снимков трансформированных по зонам пуансоном пробивают отверстие не в трансформационных точках, а в точках, которые получаются после введения поправок за рельеф. А после их совмещения с точками на основе и проверки сходимости контуров разрезают снимки вдоль границ зон.

После окончания монтажа всех снимков, получившееся изображение обрезают параллельно рамке трапеции, отступая от границ на 1 см.

Оптический способ составления фотопланов выполняют на основе с наклеенной фотобумагой, путем трансформирования снимков по зонам. Основу укладывают на экране фототрансформатора и сверху покрывают рубашкой (светонепроницаемым листом бумаги), на которую наносят сетку координат, пункты геодезической сети, опорные точки опознаки, углы рамки трапеции и границы зон. В положение точек на снимке (перед установкой его в кассете) вводят поправки за рельеф. Совмещают точки на рубашке с изображениями отверстий. Ланцетом вырезают часть рубашки, соответствующую первой зоне, производят экспонирование и эту часть вновь

заклеивают. Также экспонируют вторую зону и т.д. После экспонирования всех зон производят фотохимическую обработку.

Контроль качества монтажа выполняют по точкам, порезам и сводкам. Отклонение центров отверстий, пробитых пуансоном, от точек на основе не должны быть более 0.5 мм для равнинных и всхолмленных и 0.7 мм для горных районов. При контроле по порезам используют обрезки снимков, которые укладывают на фотоплан по линиям пореза, после чего иглой накалывают характерные контуры. Отклонения наколов на фотоплане от соответствующих контуров не должны превышать соответственно 0.7 и 1.0 мм. Аналогичен контроль по сводкам смежных фотопланов с допусками 1.0 и 1.5 мм.

После контроля на фотоплане вычерчивают рамку трапеции, километровую сетку, пункты сети и выполняют зарамочное оформление. Для практического использования с него изготавливают копии на матовой фотобумаге, наклеенной на жесткую основу.

При составлении фотосхем контактные отпечатки монтируют на картон или фанеру с предварительно наклеенной на них бумагой. Монтаж выполняют по начальным направлениям или по контурам.

В первом случае на фотоснимках выбирают центральные точки (контурные точки вблизи их центров, хорошо опознающиеся на смежных снимках) и через них на каждом нечетном снимке проводят начальные направления. На каждом четном снимке посередине продольных перекрытий (вблизи начальных направлений) выбирают контрольные точки и в них, а также в центральных точках пуансоном пробивают отверстия. Затем укладывают на доску первый и второй снимки, совмещают их по контрольной точке и ориентируют второй снимок так, чтобы его центральные точки оказались на начальном направлении. В этом положении снимки разрезают, обрезки убирают, а оставшиеся их части наклеивают на основу. Так же монтируют и остальные снимки.

Во втором случае поступают практически также, но снимки совмещают по одноименным контурам способом «мигания», проверяя качество совмещения с помощью наколов.

При составлении многомаршрутных фотосхем монтаж начинают со средних снимков среднего маршрута и развивают его к границам сфотографированного участка.

Контроль качества монтажа осуществляют по порезам. Масштаб фотосхемы можно определить по карте или по координатам изобразившихся пунктов геодезической сети.

Понятие о привязке снимков

Ранее было показано, что для выполнения тех или иных фотограмметрических процессов, нужны точки с известными координатами и высотами, положение которых можно точно указать на снимке. Такие точки были названы опознаками. Например, для трансформирования фотоснимка

требуется не менее четырех опознаков, для внешнего ориентирования модели – не менее трех.

Получить опознаки можно в процессе выполнения полевых работ. Для этого нужно взять контактные отпечатки (снимки), выехать на местность, которая на них изображена, найти характерные точки местности, точно опознающиеся на снимках (в требуемых в соответствии с технологией местах) и наколоть их. Затем провести линейно-угловые измерения, вычислить координаты и высоты точек, а на обратной стороне сделать абрис, точно указав, координаты какой точки были определены. Такая работа называется привязкой снимков, причем ее называют планово-высотной, если у опознаков определяют все три координаты; плановой – при определении только плановых координат и высотной, если требуются только высоты точек.

Можно задаться целью и получить в поле все опознаки, необходимые в процессе обработки снимков. Такая привязка снимков называется сплошной. Но она чаще всего экономически невыгодна. Существуют и камеральные способы определения опознаков, а они, как известно, почти всегда дешевле и производительнее полевых измерений. Поэтому на производстве предпочитают выполнять, так называемую, разряженную привязку снимков. Все же не достающиеся опознаки получают в процессе фотограмметрического сгущения (по-другому этот процесс называется фототриангуляцией).

Перед выполнением работ по привязке снимков составляют проект, используя для этого карты или схемы, масштаб которых в 2-5 раз, мельче масштаба картографирования. При разряженной подготовке учитывают, что ошибки последующего фотограмметрического сгущения во многом зависят от расстояний между смежными опознаками. Поэтому эти расстояния регламентируются инструкциями или рассчитываются с учетом ошибок фототриангуляционных построений. При составлении проекта учитываются требования инструкции [9], пункты 12.5-12.10. Следует отметить, что успехи в спутниковых методах определения точек фотографирования, позволят, в конце концов, полностью исключить привязку снимков из технологического процесса.

Фототриангуляция

Основные понятия

Из предыдущего параграфа следует, что фототриангуляция это камеральное сгущение сети опознаков, полученных в процессе полевых работ. Сущность фототриангуляции в построении по снимкам модели, ее ориентировании и определении координат точек сгущения. Если определяют только плановые координаты точек, то фототриангуляцию называют плоскостной, а если все три координаты – пространственной. В настоящее время на производстве используют в основном пространственную

фототриангуляцию. Классифицируют ее также по количеству маршрутов, участвующих в построении модели и применяемым техническим средствам.

Пространственная фототриангуляция может быть одномоментной (маршрутной) или многомоментной (блочной). Поскольку минимальное число точек, необходимых для внешнего ориентирования модели, не зависит от числа маршрутов, участвующих в ее построении, то особенно выгодна блочная фототриангуляция, так как значительно сокращается объем полевых работ.

В зависимости от применяемых технических средств различают аналитическую, аналоговую и аналого-аналитическую фототриангуляцию. В аналитической пространственной фототриангуляции построение модели и определение координат точек сгущения выполняется на ЭВМ по результатам измерения снимков на стереокомпараторе (аналитическом стереоприборе) или непосредственно на ЭВМ. Этот вариант не накладывает ограничений на формат и элементы ориентирования снимков. Он отличается наивысшей производительностью труда и точностью, так как в процессе машинной обработки результатов измерений учитываются все систематические погрешности, влияние которых можно выразить в математической форме.

В аналоговой фототриангуляции построение модели осуществляется на универсальных аналоговых стереофотограмметрических приборах. При этом можно строить как отдельные модели, так и общую модель для маршрута. Однако, поскольку эра таких приборов практически завершена, рассматривать аналоговую (и аналого-цифровую) фототриангуляцию смысла нет.

Заметим, что фототриангуляцию вначале выполняют по каркасным маршрутам, если при аэрофотосъемке они были проложены. В результате обеспечиваются необходимым числом точек заполняющие маршруты, и можно строить заполняющие сети.

Аналитическая маршрутная фототриангуляция

Следует сказать, что технологий ее выполнения довольно много. Рассмотрим те, что были предложены в свое время Советскими фотограмметристами и хорошо раскрывают суть дела. Речь идет о способах частично зависимых моделей, независимых моделей и связей.

Сущность способа частично зависимых моделей в том, что вначале строится модель по первой стереопаре. За начало фотограмметрической системы координат принимается центр проекции левого снимка. Его угловые элементы внешнего ориентирования и базис фотографирования устанавливаются произвольно. Затем строится модель по второй стереопаре. Но за угловые элементы внешнего ориентирования ее левого снимка принимаются величины, которые характеризуют его положение относительно фотограмметрической системы координат используемой для построения первой модели. Так поступают с третьей и всеми последующими моделями.

Зависимость в результате состоит в том, что оси фотограмметрических координат всех моделей оказываются взаимно параллельными.

Алгоритм решения задачи может быть сконструирован следующим образом. Предположим, что построение любой модели в маршруте осуществляется поворотом, как левого, так и правого снимков. Тогда при решении задачи задействованы следующие величины:

-угловые элементы внешнего ориентирования левого снимка $\varphi_l, \omega_l, \kappa_l$, они известны;

-элементы взаимного ориентирования $\varphi_{l\pi}$ и $\varphi_{\pi l}$, характеризующие поворот левого снимка при построении модели, но с другой стороны, тоже являющиеся угловыми элементами внешнего ориентирования левого снимка, но относительно базисной системы координат. Они вычисляются в процессе взаимного ориентирования.

-элементы взаимного ориентирования $\varphi_{l\pi}$ и $\varphi_{\pi l}$ характеризующие поворот правого снимка, но являющиеся и его угловыми элементами внешнего ориентирования в базисной системе координат;

-элементы внешнего ориентирования правого снимка $\varphi_\pi, \omega_\pi, \kappa_\pi$ относительно той же системы фотограмметрических координат, что и $\varphi_l, \omega_l, \kappa_l$. Их и нужно вычислить, для построения следующей модели.

Обозначим матрицы направляющих косинусов, соответствующие указанным выше системам угловых элементов внешнего ориентирования через $A_l, A_\pi, A_{l\pi}$ и $A_{\pi l}$. Таким образом матрица $A_{l\pi}$ – искомая. Очевидно, что каждой системе угловых элементов внешнего ориентирования отвечает система уравнений связывающих фотокоординаты точек на снимке с их пространственными координатами. Эти уравнения известны. Они имеют вид:

$$\begin{pmatrix} x_l \\ y_l \\ -f \end{pmatrix} = A_l^T \begin{pmatrix} X'_l \\ Y'_l \\ Z'_l \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} x_l \\ y_l \\ -f \end{pmatrix} = A_{l\pi}^T \begin{pmatrix} X''_l \\ Y''_l \\ Z''_l \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} x_\pi \\ y_\pi \\ -f \end{pmatrix} = A_\pi^T \begin{pmatrix} X'_\pi \\ Y'_\pi \\ Z'_\pi \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} x_\pi \\ y_\pi \\ -f \end{pmatrix} = A_{\pi l}^T \begin{pmatrix} X''_\pi \\ Y''_\pi \\ Z''_\pi \end{pmatrix}$$

Из этих соотношений сразу же следует, что

$$\begin{pmatrix} X'_l \\ Y'_l \\ Z'_l \end{pmatrix} = A_l A_{l\pi}^T \begin{pmatrix} X''_l \\ Y''_l \\ Z''_l \end{pmatrix} \quad \text{и} \quad \begin{pmatrix} X'_\pi \\ Y'_\pi \\ Z'_\pi \end{pmatrix} = A_\pi A_{\pi l}^T \begin{pmatrix} X''_\pi \\ Y''_\pi \\ Z''_\pi \end{pmatrix}$$

Координаты пары соответственных точек (X_l, Y_l, Z_l) и (X_π, Y_π, Z_π) , а также (X'_l, Y'_l, Z'_l) и (X'_π, Y'_π, Z'_π) определяются в разных системах, но их оси параллельны, то есть преобразование происходит из параллельных систем в

$$A_l A_{l\pi}^T = A_\pi A_{\pi l}^T, \quad \text{или} \quad A_{\pi l} = A_l A_{l\pi}^T A_\pi$$

Возможно, формула будет понятнее, если поменять нижние индексы

$$A_{\alpha_{\Pi}\omega_{\Pi}\kappa_{\Pi}} = A_{\alpha_{\Pi}\omega_{\Pi}\kappa_{\Pi}} A_{\alpha'_{\Pi}\kappa'_{\Pi}}^T A_{\alpha'_{\Pi}\omega'_{\Pi}\kappa'_{\Pi}}$$

Для вычисления нужны, кроме того, углы наклона базиса α и ω . Поскольку это углы, характеризующие поворот базисной системы координат относительно системы, используемой в дальнейшем для определения координат точек модели (т.е. которой соответствуют угловые элементы $\alpha_l \omega_l \kappa_l$), можно сразу же написать:

$$A_{\Pi} = A_{\alpha_{\Pi}\omega_{\Pi}\kappa_{\Pi}} A_{\alpha'_{\Pi}\kappa'_{\Pi}}^T$$

Используя эти углы и произвольно выбранное значение базиса фотографирования, можно вычислить его составляющие и координаты центра проекции правого снимка (формулы известны).

Итак, алгоритм рассматриваемого способа можно представить следующим образом:

- Измерение стереопары;
- Определение элементов взаимного ориентирования;
- Вычисление углов α и ω , базисных составляющих и координат центра проекции правого снимка;
- Аналитическое трансформирование снимков стереопары относительно плоскости $X_l Y_l$;
- Вычисление координат точек модели. При этом заметим, что $X_0=B_z$, $Z_0=B_z$, и после трансформирования снимков $X_l=x^0$, $Y_l=y^0$, $Z_l=-f$, поэтому, скаляр N , используемый при решении прямой пространственной фотограмметрической засечки (при определении приращений координат точек модели) можно вычислять по формуле:

$$N = \frac{B_x + x_n^0 B_z / f}{x_n^0 - x_l^0}$$

- Все выше указанное выполняют с каждой стереопарой маршрута. Масштаб последующей модели приводят к масштабу предыдущей с помощью масштабного коэффициента, который определяют по расстояниям от центров проекций S_{Π} предыдущей стереопары и S_l - последующей до связующих точек (точек выбранных в процессе построения и измерения модели в зоне тройного перекрытия снимков). Обычно используют несколько расстояний, и коэффициент вычисляют, как среднее весовое.

- Внешнее ориентирование построенной общей для всего маршрута модели.

В способе независимых моделей модели независимы между собой. Для их построения выбирают базисы произвольной длины, измеряют координаты соответственных точек, включенных в сеть, вычисляют элементы

взаимного ориентирования в базисной системе координат и трансформируют снимки относительно плоскости, перпендикулярной к главной базисной плоскости левого снимка. В результате координаты точек модели можно вычислять по формулам нормального случая съемки. Как видим, данный вариант не требует вычисления элементов внешнего ориентирования снимков. Для построения общей для всего маршрута модели выполняют операцию внешнего ориентирования второй модели по отношению к первой, третьей по отношению к первым двум и т.д. Затем выполняют внешнее ориентирование общей модели.

В способе связок для каждой точки, включенной в фотограмметрическую сеть, составляются два уравнения коллинеарности (35), связывающие ее фотокоординаты x и y с пространственными координатами X, Y, Z соответствующей точки местности. Каждое из уравнений содержит 6 неизвестных, если они составлены для опознака (неизвестными являются элементы внешнего ориентирования снимка), и 9 неизвестных для точки, пространственные координаты которой подлежат определению. Фотокоординаты точек измеряют на всех снимках маршрута, после чего приступают к вычислению искомых координат, действуя в последовательности (которая уже неоднократно обсуждалась):

- Выбирают приближенные значения элементов внешнего ориентирования и искомых координат; Их находят, используя материалы аэрофотосъемки, старые карты, фотопланы и другие источники.

- Подставляют выбранные величины в уравнения коллинеарности. В результате получают фотокоординаты x_0, y_0 , которые не будут равны измеренным и из-за погрешностей измерений и из-за неточности принятых приближенных величин.

- Составляют уравнения поправок, коэффициенты которых будут частными производными фотокоординат по соответствующим неизвестным. Разности между вычисленными и измеренными фотокоординатами – их свободные члены. Перед вычислением свободных членов в измеренные координаты вводят поправки за влияние различных факторов. Если m – число точек в сети, n – число снимков и k – число определяемых точек, то получим $2m$ уравнений, с $6n+k$ неизвестными.

- Составляют и решают нормальные уравнения, и полученные в результате поправки вводят в принятые значения неизвестных величин, то есть получают второе приближение.

- Используя исправленные значения, опять составляют уравнения поправок, затем нормальные уравнения и решают их. Таким образом, задача определения координат точек сгущения решается методом итераций, которые прерываются, либо в случае, когда очередные поправки окажутся пренебрежимо малы, либо по установленному максимальному числу итераций, если решение оказывается некорректным и нужно искать ошибки в исходных данных.

Этот способ дает возможность при построении сети использовать зафиксированные в полете элементы внешнего ориентирования (GPS

определения, показания статоскопа, радиовысотомера и т.д.). Уравнивание, в этом случае, выполняют с учетом весов всех измеренных величин. Следует заметить, что он в настоящее время и наиболее популярен, так как практически нет ограничений на использование памяти ЭВМ, что ранее было серьезной проблемой.

Понятие о блочной фототриангуляции

Так же как и в маршрутной в блочной фототриангуляции, также могут использоваться три варианта ее построения.

Наиболее популярный из них является развитием способа связок для маршрутной фототриангуляции. Важно только выбирать связующие точки не только в зоне тройного перекрытия, но и в зоне поперечного перекрытия снимков.

Второй вариант основан на построении независимых моделей соединении их в общую для всего блока модель, для которой затем выполняется операция внешнего ориентирования. То есть это эквивалент способа независимых моделей маршрутной фототриангуляции.

В третьем варианте вначале создаются свободные маршрутные сети. Затем по точкам, расположенным в зоне поперечного перекрытия они соединяются в общую модель для блока, внешнее ориентирование которой осуществляется с помощью опознаков.

В заключении параграфа заметим, что перед выполнением фототриангуляции должен быть составлен проект ее выполнения, согласованный с проектом привязки снимков. В фототриангуляционную сеть должны включаться не только точки необходимые для внешнего ориентирования модели или трансформирования снимков, но и связующие точки (в зоне тройного перекрытия), характерные точки рельефа и урезы воды, если рельеф предполагается наносить путем измерения стереопар.

Деформация модели и точность построения фотограмметрической сети

Построить идеальную модель по паре снимков нельзя, так как в процессе летносъёмочных, геодезических и фотограмметрических работ на положении ее точек влияет большое число различных факторов. Основными причинами, вызывающими деформацию модели, являются:

- Отступление изображений на реальных снимках от центральной проекции;
- Погрешности измерения снимков;
- Методические ошибки, связанные с отступлениями от строгой теории в технологии построения модели.

Возникающие искажения могут быть случайными и систематическими, причем последние особенно нежелательны, так как приводят к накоплению ошибок в фотограмметрических сетях.

Из перечисленных факторов влияние многих можно существенно ослабить путем применения более совершенной съёмочной аппаратуры,

малодеформирующихся и высокочувствительных пленок, аналитических методов обработки и т.д. Поэтому основной причиной деформации модели становятся погрешности измерений снимков, в частности ошибки их взаимного ориентирования, которые особенно искажают высоты точек.

Попробуем обсудить путь к оценке деформации модели, хотя бы приближенной. Известно, что при нормальном случае съемки

$$\begin{matrix} X = Bx^0 / p^0 & Y = By^0 / p^0 & Z = -H = Bf / p^0 \\ , & & \text{и} \end{matrix}$$

Продифференцируем, например, Z по p^0 , в результате получим:

$$dZ = \frac{B}{(p^0)^2} dp^0$$

Выразим параллакс через высоту фотографирования и перейдем к изображению в масштабе снимка, тогда:

$$dz = f dp^0 / p^0$$

Ранее было получено, что $b \approx x_1^0 - x_2^0 = p^0$. Значит, $dp^0 = dx_1^0 - dx_2^0$. И, кроме того:

$$x^0 = x - \left(f + \frac{x^2}{f} \right) \alpha + \frac{xy}{f} \omega - y\kappa$$

Если теперь продифференцировать трансформированные абсциссы по α , ω и κ , полагая их элементами взаимного ориентирования, легко вычислить ошибки трансформированных абсцисс, как функций погрешностей m_α , m_ω и m_κ (смотри формулы 115), а значит и трансформированного продольного параллакса. Это позволяет, в конечном итоге, оценить и ошибки координат любой точки модели.

Всю эту работу проделал А. Н. Лобанов [4]. Для точки 4 (из стандартно расположенных) он, например, получил: $m_x \approx 2.5 M m_q$, и $m_z \approx 2.3 f M m_q / b$, где M – знаменатель масштаба снимка. Им же была выполнена оценка накопления погрешности в маршрутной сети из n стереопар. Рекомендуемые им формулы не приводятся, так как подобные исследования других фотограмметристов дают несколько иные результаты. Но важно, что, используя их, можно предрасчитать такое расстояние (в числе базисов) между исходными опознаками, при котором ошибки в определении координат точек не будут превосходить допусков.

Кроме того, отметим, что на практике деформацию пытаются уменьшить на этапе внешнего ориентирования модели. Для этого используют полиномы различной степени, например второй.

$$\begin{aligned}dX &= A_0 + A_1X + A_2Y + A_3XY + A_4X^2 \\dY &= B_0 + B_1X + B_2Y + B_3XY + B_4Y^2 \\dZ &= C_0 + C_1X + C_2Y + C_3XY + C_4Z^2\end{aligned}$$

В представленной системе уравнений 15 коэффициентов. Имея не менее 5 планово-высотных опознаков, по невязкам на них можно коэффициенты вычислить, и затем использовать для введения поправок в координаты определяемых точек.

Понятие о топографическом дешифрировании снимков

Под дешифрированием понимается выявление, распознавание и определение характеристик объектов местности, изобразившихся на фотоснимках. В зависимости от назначения и задач, решаемых в ходе дешифрирования, различают два его вида: топографическое и специальное.

Топографическое дешифрирование выполняют с целью выявления, распознавание и определение характеристик объектов местности, которые должны наноситься на план в соответствии с требованиями действующих условных знаков. Дешифрирование снимков в процессе обследования местности в натуре называется полевым. Распознавание на фотоизображениях объектов и контуров без обследования их в натуре называется камеральным дешифрированием. В зависимости от топографической изученности картографируемого района и принятой технологии работ полевое дешифрирование проводится до камерального или после него.

Полевое дешифрирование ведут, как правило, по маршрутам, которые намечают там, где расположены объекты, подлежащие обязательному обследованию в натуре (поселки, мосты, ЛЭП, трубопроводы и проч.). При этом устанавливают и подписывают названия объектов и другие их характеристики. В процессе полевого дешифрирования следует руководствоваться требованиями и рекомендациями инструкции [9] (пункты 12.16). Дешифрирование на местности населенных пунктов и объектов с высокой контурной нагрузкой может производиться на увеличенных фотоснимках, фотосхемах, фотопланах или на аэрофотоснимках в комплекте с графическим оригиналом. Материал, на котором фиксируются результаты дешифрирования, должен быть в масштабе составляемого плана или близкий к нему. Данные промеров для нанесения объектов неуверенно распознающихся на аэрофотоснимке или появившихся после залета фиксируют на его обратной стороне или на отдельном абрисе.

Камеральное дешифрирование значительно дешевле полевого, но для успешного его выполнения необходимо изучать дешифровочные, или, как их еще называют, демаскирующие признаки объектов. Делятся эти признаки на прямые и косвенные. К прямым признакам относятся: форма, размеры, тень и цвет объекта, структура его изображения. Косвенными признаками

являются: относительное расположение объектов, следы деятельности, приуроченность, взаимосвязь и взаимообусловленность. Основными демаскирующими признаками являются форма и размеры изображения объектов. Плановые фотоснимки равнинной местности почти сохраняют сходство формы изображения с натурой. Строения изображаются в виде прямоугольников, дороги – вытянутыми линиями, извилистые линии соответствуют ручьям или небольшим речкам. Представление о форме высокого объекта можно получить по изображению его тени. По результатам простейших измерений и зная параметры фотографирования (масштаб, высоту) можно определить размеры объектов в натуре и дать соответствующую характеристику. Важными демаскирующими признаками служат спектральная отражательная способность объекта структура его изображения зернистая для лесов, мелкозернистая для кустарников, пятнистая для болот, гладкая для водоемов и т.д. Косвенные признаки помогают дешифровать отдельные объекты, по их взаимной связи с другими объектами, изобразившимися на фотоснимке. Типичный пример это изображение дороги, обрывающейся на одном берегу и продолжающейся на другом (признак брода или паромной переправы). Дорожки или тропинки, сходящиеся в одной точке, указывают на наличие колодца или водного источника. Очень помогают при камеральном дешифрировании снимки эталоны, которые для наиболее трудных и характерных участков получают в процессе полевого дешифрирования.

Технологии, основанные на стереообработке фотоснимков

Классификация универсальных аналоговых стереоприборов

Эти приборы предназначены для составления планов и карт по паре фотоснимков, а также для сгущения сети съемочного обоснования. Они реализуют решение двойной обратной пространственной фотограмметрической засечки.

Не смотря на то, что их век заканчивается, приборы заслуживают внимания, так как изучение процессов обработки снимков на них позволяет понять алгоритмы, используемые в аналитической и цифровой фотограмметрии.

Считается, что в процессе развития средств измерения стереопар создано два поколения универсальных аналоговых стереофотограмметрических приборов. При конструировании приборов первого поколения опирались в основном на достижения оптики и механики. Основными их частями являлись моделирующая, измерительная, наблюдательная системы и координатограф. Иногда они компоновались на одной станине. Но чаще координатограф выпускался в качестве самостоятельного прибора, который связывался с измерительным блоком редуктором (механического или электрического типов). Это обеспечивало более богатый выбор соотношений между масштабами снимков (модели) и составляемой карты.

Появление приборов второго поколения это результат развития вычислительной техники. На направляющие устанавливались регистраторы перемещений, что позволяло автоматизировать процесс передачи результатов измерений в ЭВМ, а значит организовать процесс обработки пары в режиме реального времени (в том числе и процесс построения цифровой модели объекта). Вместо координатографов стали применять графопостроители, использовались различного вида накопители информации и сервисные устройства. Было создано программное обеспечение, облегчающее процесс ориентирования модели и ее измерения. Многие комплекты обеспечивались ортофотоприставками.

По способу построения пространственной засечки, рассматриваемые приборы можно разделить на оптические, оптико-механические и механические. В двух последних вариантах роль проектирующих лучей частично или полностью играют металлические стержни или линейки (ленкеры). Причем может быть только одна их пара, и торец одного из них моделирует положение точки местности. В этом случае 3 взаимно перпендикулярных направляющих образуют в приборе пространственную систему координат XYZ. Иногда используются две пары ленкеров: одна для определения только плановых координат, вторая – для определения высот. Таким образом, пространственная система координат образуется двумя плоскостными системами.

По точности аналоговые приборы подразделяются на 3 класса. Если класс точности 1, то ошибки измерения координат в плоскости снимка не превосходят 0.01мм, а пространственной координаты Z - 1/10 000 от высоты проектирования. У приборов 3 класса точности указанные показатели соответственно равны 0.05мм и 1/2 000.

Существуют приборы, у которых плановые снимки устанавливаются на каретки снимкодержателей горизонтально (как на стереокомпараторе). Тогда они снабжены коррекционными приспособлениями, позволяющие автоматически вводить поправки за наклон (выполнять трансформирование). У большинства Западных приборов проектирующие камеры наклоняются на углы α и β .

Засечка в приборах осуществляется по принципу треугольника, параллелограмма или треугольник плюс параллелограмм. Что это означает, рассмотрено ниже.

Приборы отличаются по способу наблюдения и измерения модели. Основным является оптический способ наблюдения с помощью бинокулярной системы. Для измерения используется мнимая марка. Реже применяются способы анаглифов и поляроидов, а для измерения – действительная марка.

Есть приборы, на которых снимки обрабатываются с преобразованием связок проектирующих лучей (то есть фокусные расстояния проектирующих камер не равны фокусным расстояниям установленных на каретках снимков).

Оптические универсальные аналоговые стереоприборы

В таких приборах, различного класса точности и разной конструкции, связка лучей восстанавливается, и пространственная модель строится оптическим способом (Рис. 67). В нашей стране широкое распространение на производстве получили двойной проектор и мультиплекс. Рассмотрим устройство двойного проектора, так как это позволит уяснить принцип работы всех остальных приборов.

A
 S_1
 S_2
 S_2^0
 K
 E_0
 E
 E_1
 E_2
 a_1
 a_2
1
2

Рис. 67

Основными частями проектора являются штанга 1, кронштейны 2, на которых крепятся проектирующие камеры, и планшет, где устанавливается действительная марка с экраном E . Точки S_1 и S_2 (задние узловые точки объективов камер) являются центрами проекций. Через них проходят проектирующие лучи Aa_1 и Aa_2 . Камеры можно перемещать вдоль трех взаимно перпендикулярных направляющих, наклонять на углы α , β и γ и поворачивать в своей плоскости на угол φ . Указанные движения обеспечивают построение модели. Штангу можно перемещать относительно планшета и наклонять в трех направлениях, при этом построенная модель не разрушается, что позволяет выполнить ее внешнее ориентирование. При проектировании используются не аэрофотоснимки, а их уменьшенные в 3 – 4 раза копии. При этом во столько же раз уменьшаются фокусные расстояния проектирующих камер относительно фокусного расстояния АФА, которым производилось фотографирование. Значит, модель строится подобными связками проектирующих лучей. Снимки через красный и синий светофильтры проецируются на один планшет, и полученное изображение рассматривается через анаглифические очки. В результате появляется объемное изображение, при условии, конечно, что модель построена, а помещение затемнено. Измерение модели осуществляется

действительной маркой, расположенной на экране E . Ее можно установить в любой точке планшета. Причем сам экран может подниматься и опускаться относительно планшета с помощью микрометрического винта со шкалой для измерения высот точек. Это и позволяет совместить марку с любой точкой модели и нанести ее на планшет.

Мультиплекс - это многокамерный проектор (до 24 камер на одной штанге), что обеспечивает построение общей модели для маршрута.

Предположим теперь, что в приборе используется не общий экран E , а для каждого снимка свой E_1 и E_2 , и что положение точки модели в пространстве характеризуется не пересечением проектирующих лучей, а точкой пересечения левого проектирующего луча с экраном E_1 . С помощью наблюдательной системы, например, оптического типа обеспечим рассматривание экрана E_1 с маркой только левым глазом, а экрана E_2 с маркой - только правым. Следствия таких конструктивных изменений:

1. Будет наблюдаться объемное изображение с одной мнимой маркой, стереоскопически совмещенной с точкой A модели.
2. Масштаб этой модели будет определяться не отрезком S_1S_2 , а отрезком $S_1S_2 \parallel$.
3. Расстояние K между точками S_1 и S_2 может быть произвольным. Оно названо постоянной прибора, и устанавливается из конструктивных соображений. Понятно, что засечка в этом случае осуществляется по принципу треугольник $(S_1S_2 \parallel E_1)$ плюс параллелограмм $(S_2 \parallel S_2E_2E_1)$.
4. Базис проектирования можно устанавливать изменением положения точки E_2 относительно точки E_o (точка пересечения отрезка, проходящего через правый центр проекции S_2 параллельно левому проектирующему лучу, с прямой E_1E_2). Два последних следствия оказались столь конструктивными, что именно по этому принципу и стали строить большинство универсальных аналоговых стереоприборов.
5. Точку S_2 можно поместить и в любое другое положение, например, переместив ее в поперечном относительно штанги направлении, тогда образуется засечка, построенная по принципу двух треугольников.
6. Совместное перемещение экранов E_1 и E_2 вдоль главного луча (вдоль оси Z) без изменения расстояния между ними, будет увеличивать или уменьшать угол засечки, а значит и взаимно перемещать снимки (при этом, конечно, предполагается жесткая связь проектирующих лучей с экранами и снимкодержателями). Такое движение равносильно действию винта продольных параллакса стереокомпаратора.

Прибор оптического типа с двумя экранами, выпускался в Иене (ГДР) и назывался Топофлекс. Измерялись на нем не копии, а непосредственно снимки, использовался оптический способ рассматривания стереопары, а для измерения применялись две светящиеся марки, которые в процессе измерений модели сливались в одно мнимое изображение. К высокоточным приборам оптического типа относится стереопланиграф Цейса. Он был

достаточно распространен в нашей стране. Важное преимущество прибора – возможность переключения осей визирования относительно глаз наблюдателя (то есть правым глазом можно было рассматривать левый снимок, и наоборот), что облегчало построение на приборе сетей фототриангуляции. Из отечественных приборов оптического типа следует упомянуть стереоскопический рисовальный прибор М.Д. Коншина, в котором благодаря конструкции оптической системы обеспечивалось наложение мнимой модели на план или карту.

Универсальные приборы механического типа

Приборам механического типа конструкторы явно отдавали предпочтение. В них засечка осуществляется с помощью одной, а иногда двух пар рычагов или линеек. В нашей стране выпускались и были широко распространены на производстве стереопроектор Романовского (СПР), стереограф Дробышева (СД) и его модификация стереограф ЦНИИГАиК (СЦ). Далее будет рассмотрен только СПР, потому, что он составляет инструментальную базу лаборатории фотограмметрии института, да и принципиально другие приборы от него мало чем отличаются.

S_1
 S_2

Z

X
 Y
 b_x
 b_y
 b_z
 X
 Z

Y

a_1
 a_2

A

x
 y
 Рис. 68

СПР (Рис. 68) это прибор 1 класса точности, предназначенный для составления топографических карт и планов по плановым снимкам формата 18×18см и с фокусным расстоянием 35 –350мм. Он применяется и для построения пространственных фотограмметрических сетей. Засечка в приборе осуществляется по принципу треугольник плюс параллелограмм. Снимки могут обрабатываться, как с преобразованием, так и без преобразования связок проектирующих лучей, роль которых выполняют пара металлических стержней. Они проходят через средние карданные центры S_1 и

S_2 (центры проекций), вокруг которых могут вращаться, и которые жестко закреплены на каретке фокусных расстояний. Стержни верхними карданными центрами жестко связаны с горизонтально расположенными каретками снимкодержателей. Их нижние концы шарнирно прикреплены к мостику отстояний.

Мостик, а значит и нижний торец левого проектирующего рычага, моделирующий положение точки A местности, при вращении штурвалов X и Y перемещается в горизонтальной плоскости. В результате поворачиваются сами проектирующие рычаги вокруг центров проекций, и по своим направляющим перемещаются снимкодержатели относительно объективов. Вращение ножного штурвала Z вызывает взаимное перемещение снимкодержателей (при условии, что проектирующие рычаги между собой не параллельны). В поле зрения окуляров введены светящиеся измерительные марки, которые в процессе указанных выше движений, можно совместить с любой парой соответственных точек (то есть стереоскопически совместить одну мнимую пространственную марку с любой точкой модели).

На каретке отстояний, которая перемещается ножным штурвалом вдоль оси Z , расположено базисное устройство моделирующей системы с тремя суппортами для установки базисных составляющих b_x , b_y и b_z . Перемещением каретки фокусных расстояний можно сдвигать центры проекций S_1 и S_2 и, тем самым, менять фокусные расстояния проектирующих камер в пределах 150 – 300мм.

Поскольку снимки в снимкодержателях устанавливаются горизонтально, прибор снабжен коррекционными механизмами, обеспечивающими автоматическое введение поправок за наклон (выполняют процесс трансформирования снимков). Каждое коррекционное

$r = r^0 - \delta r$
 приспособление решает уравнение . Причем, r^0 это расстояние от точки нулевых искажений c до проекции a^0 точки A местности на горизонтальном снимке; r – тоже на плановом снимке; δr – поправка за наклон. На СПР указанная поправка вводится путем смещения на требуемую величину объектива, через который рассматривается снимок (смотри рисунок 69) Величина смещения зависит от положений точки на снимке и опорного пальца, который перемещается в плоскости тарелки коррекционного механизма винтами Δ и ∇ .

a
 A
 Δr
 S
 c
 a^0

Рис. 69 Схема действия коррекционного механизма

В соответствии с теорией, если проектирующий рычаг занимает отвесное положение, то измерительная марка должна быть совмещена с

точкой надира. Данное условие не выполняется, так как при установке снимков их координатные метки совмещают с рисками на стекле снимкодержателя и марка в этом случае совмещена с центром снимка. Для устранения указанного несоответствия методикой предусмотрено дифференциальные смещения снимков по осям x и y . Их величины вычисляют по формулам, которые приводятся в руководстве по эксплуатации прибора

Под направляющей X прибора расположен планшет, на который, с помощью пишущего элемента, прикрепленного к каретке X , можно наносить ситуацию и вычерчивать горизонтالي. Величины перемещения всех кареток определяются по соответствующим счетчикам. Причем, у каретки Z их два. Один позволяет определять превышение между точками в миллиметрах в масштабе модели. Второй с помощью специальных шкал и редуктора – в метрах. В принципе к СПР может быть подключен и координатограф.

Прибор обеспечивает выбор формы и размеров марок их цвета, а также, с помощью реостатов, степени яркости марок и освещенности снимков.

Составление планов на СПР

В начале отметим, что нельзя вращать штурвалы и винты прибора, если он не включен в сеть, так как в этом случае не работает предупредительная сигнализация и возможна поломка тех или иных его узлов.

Исходными данными для составления плана являются:

- стереопара, у которой должны быть известны масштаб $1/m$ и фокусное расстояние снимков f ;

- не менее трех опознаков (урезы воды, если в зоне перекрытия есть водоемы);

- масштаб $1/M$ составляемого плана и высота сечения рельефа h ;

- снимки эталоны с результатами полевого дешифрирования.

Основные процессы при обработке снимков на приборе включают: подготовительные работы; взаимное ориентирование снимков (построение модели); внешнее ориентирование модели; измерение модели, камеральное дешифрирование и составление плана.

В процессе подготовительных работ на листе высококачественной бумаге (пластика) изготавливается основа в масштабе составляемого плана, на которую наносятся все точки геодезической сети (опознаки), хорошо опознающиеся на снимках. На шкалах $\square_l$, $\square_n$ и $\square_n$ коррекционных приспособлений, dx_l , dy_l , dx_n и dy_n децентраций снимков b_z и b_y базисных составляющих устанавливаются отсчеты, равные их местам нулей, которые определяются в процессе проверок и юстировок прибора, а на шкале базисной - начальный отсчет b_x^0 . При работе на СПР, с координатографом совмещенным с измерительным блоком прибора, масштаб построенной модели, в конечном итоге, должен быть равен масштабу составляемого плана. Поэтому формула для расчета имеет вид:

$$b'_x = bm/M$$

,

где b – базис фотографирования в масштабе снимков, который легко измерить линейкой, используя продольное перекрытие.

При установке снимков в снимкодержателях необходимо тщательно совмещать их координатные метки с рисками на стекле, и помнить, что диапозитивы укладываются эмульсией вверх, а негативы – вниз.

Каретку фокусных расстояний на СПР устанавливают так, чтобы обеспечить оптимальное перемещение каретки высот (диапазона ее перемещений должно хватать при наведении измерительной марки, как на высоко, так и низко расположенные точки земной поверхности).

Взаимное ориентирование снимков сводится к устранению поперечных параллаксов на шести стандартно расположенных точках.

Пусть на рис. 70 S_1 и S_2 – центры проекций камер, в которые установлены снимки P_1 и P_2 , составляющие стереопару. С помощью объективов S_1 и S_2 соответственные точки a_1 и a_2 снимков проецируются на экран E .

Допустим, что соответственные лучи S_1a_1 и S_2a_2 пересекаются. В этом случае, опуская или поднимая экран E , можно установить его в такое положение, при котором точки a_1 и a_2 на нем сольются в одну (рис. 70,а). Если соответственные лучи не пересекаются, то при любой установке экрана по высоте на нем будут наблюдаться отдельно две точки. (рис. 70,б), и можно добиться лишь такого положения, при котором расстояние между точками a_1 и a_2 окажутся наименьшим из всех возможных. Это наименьшее расстояние между соответственными точками на экране называется поперечным параллаксом в пространстве модели и обозначается через Q . Поперечный параллакс точки модели направлен перпендикулярно к базису проектирования S_1S_2 . Для плановых снимков видимый параллакс Q определяется из выражения:

$$Q = \frac{Z}{f} q. \quad (15.6)$$

а)



S_1

S_2

P_1

P_2

a_1

a_2

a'_2

a'_1

S_1
 S_2
 P_1
 P_2
 E
 a_1
 a_2
б)
 Z
 E
 Q
 Z

Рис.70.

Высота проектирования Z зависит от длины базиса S_1S_2 . Примем, что он равен продольному параллаксу $b=p$ точек a_1 и a_2 , а высота проектирования Z равна фокусному расстоянию f . Тогда поперечный параллакс Q , наблюдаемый на какой-либо точке модели, будет равен соответствующему поперечному параллаксу q на стереопаре.

Для построения модель местности по паре снимков добиваются устранения поперечных параллаксов q в точках ориентирования (стандартно расположенных точках, рис. 37). Делать это можно, как в базисной системе координат, движениями обеих проектирующих камер (первый способ), так и в системе координат одного из снимков (чаще левого), движениями только одной камеры (второй способ).

В начале рассмотрим *первый способ*. Согласно уравнению (100), можно записать:

$$q = -\frac{xy}{f}\alpha'_1 + \frac{(x-b)y}{f}\alpha'_2 + \left(f + \frac{y^2}{f}\right)\omega'_2 - x\chi'_1 - (x-b)\chi'_2, \quad (157)$$

где x, y – координаты точки на левом снимке стереопары.

Для установления порядка действий при устранении поперечных параллаксов рассмотрим, как влияет каждое из движений $\chi'_1, \chi'_2, \alpha'_1, \alpha'_2, \omega'_2$ на поперечный параллакс в каждой из стандартно расположенных точек.

Движение χ'_1 левой камеры вызывает вращение снимка, а значит и его изображения на экране вокруг главного луча. Возникающие при этом поперечные параллаксы численно равны четвертому слагаемому уравнения (158):

$$q_{\chi'_1} = -x\chi'_1.$$

Значит они появятся на точках 4, 2 и 6, причем будут равны друг другу; а на точках 1, 3 и 5 параллаксы будут отсутствовать.

Поворот правой камеры на угол χ'_2 действует аналогично. Но формула для оценки возникающего параллакса будет иметь вид:

$$q_{\chi'_2} = -(x-b)\chi'_2,$$

Теперь на точках 4, 2, 6 он будет равен нулю, а на точках 1, 3 и 5 некоторому значению.

Движение камеры по направлению α'_1 преобразует изображение квадрата в трапецию. Возникающие при этом параллаксы в точках модели можно оценить по формуле:

$$q_{\alpha'_1} = -\frac{xy}{f}\alpha'_1.$$

И видно, то в точках 1, 2, 3 и 5 они нулевые, а 4 и 6 - равны по величине и противоположны по знаку.

Аналогичным будет результат наклона и правой камеры на угол α'_2 , но формула для вычисления параллакса примет вид:

$$q_{\alpha'_2} = \frac{(x-b)y}{f}\alpha'_2.$$

Поворот правой камеры на угол ω'_2 вокруг линии базиса также преобразует квадрат в трапецию, но возникающие поперечные параллаксы на стандартных точках определяются соотношениями:

$$q_{\omega'_2} = q'_{\omega'_2} + q''_{\omega'_2},$$

причем:

$$q'_{\omega'_2} = f\omega'_2, \quad q''_{\omega'_2} = \frac{y^2}{f}\omega'_2.$$

Очевидно, что составляющая $q'_{\omega'_2}$ постоянна для всех точек, а величина $q''_{\omega'_2}$ зависит от y .

При взаимном ориентировании снимков устранение поперечных параллаксов на стандартных точках выполняют в такой последовательности, чтобы последующие действия, по возможности, не нарушали предыдущих. Поэтому, вначале поперечный параллакс устраняют на точке 1 (рис. 71), поворотом правой камеры на угол $\square_2$. Затем это делают на точке 2, вращением левой камеры на угол $\square_1$. Далее на точке

3 – наклоном α_2 и, наконец, на точке 4



$$2/\chi_1$$

$$1/\chi_2$$

$$3/\alpha_2$$

$$y_1$$

$$y_2$$

$$x_1, x_2$$

$$P_1$$

$$P_2$$

$$3$$

$$4$$

$$1$$

$$2$$

$$a$$

$$b$$

$$5$$

$$6$$

$$4/\alpha_1$$

Рис.71.

– наклоном α_1 . Нетрудно заметить, что при этом на всех точках модели будет компенсирована и составляющая q'_{ω_2} , правда, не поворотом второй камеры на угол ω'_2 , а разворотом обеих камер вокруг главных лучей, что несущественно. Но поскольку наклоны на углы α'_1 и α'_2 , как в отдельности, так и совместно, действуют иначе, чем ω'_2 , на точках 5 и 6 возникает новый поперечный параллакс, равный $2q''_{\omega'_2}$. Отношение поперечного параллакса в точках 5 (6) к поперечному параллаксу $2q''_{\omega'_2}$, наблюдаемому после устранения параллаксов на точках 1-4, называется коэффициентом взаимного ориентирования. Этот коэффициент может быть получен и по формуле:

$$k_{\omega} = \frac{f^2 + a^2}{2a^2}. \quad (15 \quad 8)$$

Используют его для введения на точке 5 нового параллакса $k_{\omega} q'_{\omega'_2}$, равного существующему значению $q'_{\omega'_2}$, умноженному на коэффициент k_{ω} (но с противоположным знаком).

Второй способ. Согласно (101) уравнение взаимного ориентирования в этом случае имеет вид:

$$q = -\frac{(x-b)y}{f}\Delta\alpha - \left(f + \frac{y^2}{f}\right)\Delta\omega - (x-b)\Delta\chi - \frac{y}{f}bz - by, \quad (159)$$

где $bz = bv$, $by = b\tau$.

$\Delta\chi$, $\Delta\alpha$ и $\Delta\omega$

Поэтому влияния поворотов на поперечные параллаксы точек модели аналогичны влияниям рассмотренных выше поворотов на углы χ , α и ω .

. Согласно уравнению (153) смещение камеры вдоль составляющей базиса by вызывает появление параллаксов на всех точках модели, равных величине смещения. Передвижение камеры вдоль составляющей bz влечёт за собой равномерное изменение масштаба изображения второго снимка.

При взаимном ориентировании (рис. 72) поперечные параллаксы устраняют сначала на точке 2 – движением by , затем на точке 1 –

движением χ_2 , далее на точке 4 – движением bz , и, наконец, на точке 3 – движением α_2 .

На точке 5, вращением правой камеры на угол ω_2 , вводят новый параллакс, величину которого рассчитывают, как и в предыдущем способе.



1/ b_y

2/ χ_2

4/ α_2

y_1

y_2

x_1, x_2

3

4

1

2

a

b

5

6

3/ b_z

Рис.72.

Отметим, что как в первом, так и во втором способах действовать можно и в несколько иной последовательности. Главное – устранить поперечные параллаксы.

Ориентирование выполняют методом последовательных приближений до тех пор, пока остаточный поперечный параллакс на контрольной точке не окажется меньше 0.015мм (1/4 диаметра марки наименьшего размера). Если такого результата не достичь, вычисляют децентрации dx и dy и на эти величины смещают снимкодержатели. Формулы для определения децентраций приведены в паспорте прибора. После этого взаимное ориентирование повторяют. Если при взаимном ориентировании используется второй вариант, децентрацию нужно вводить только в один снимок, в этом его преимущество по сравнению с первым вариантом.

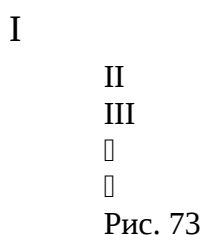
Иногда при взаимном ориентировании вычисляют и используют вспомогательный коэффициент, позволяющий уменьшить число приближений.

Внешнее ориентирование построенной модели начинают с выбора и установки таких шестеренок в редукторе счетчика высот и таких шкал, чтобы отсчеты можно было брать в метрах. При этом необходимо учесть, что связки проектирующих лучей преобразованы, то есть фокусные расстояния $F^{\square}$ проектирующих камер не равны фокусным расстояниям f снимков. Поэтому вначале вычисляют знаменатель вертикального масштаба модели $M_{\square}$ (из-за преобразования связок он не равен знаменателю горизонтального масштаба M). Очевидно $M_{\square} = Mf/F^{\square}$. Полученная величина является входом в таблицу установок шкал и шестерен, которая имеется в инструкции по эксплуатации прибора. Из этой таблицы выбирают окончательное значение $M_{\square}$ вертикального масштаба (наиболее близкое к вычисленному), а также ему соответствующие шкалу и пару шестерен, которые и устанавливают на каретке высот. В заключении следует пересчитать фокусное расстояние проектирующих камер и установить его на шкале каретки фокусных расстояний.

Сам процесс внешнего ориентирования делится на два этапа. Первый этап называется масштабированием модели. Его осуществляют изменением базисной составляющей b_x во столько раз, во сколько отрезок l_o между парой опознаков на основе отличается от соответствующего ему отрезка l_m на бумаге, нанесенного по результатам измерения модели, т.е. новое значение $b_x = l_o \cdot b_x^{\square} / l_m$. Возникший при этом поперечный параллакс в центре модели и на одном из верхних ее краев устраняется соответственно винтами b_y и b_z . После операции ориентирования полезно установить на планшет (координатограф) основу, отцентрировать ее и сориентировать. Для центрирования измерительная марка стереоскопически совмещается с одним из опознаков, а острие пишущего элемента (карандаша) с соответствующей точкой на основе. Затем марку совмещают с другим опознаком и основу вращают вокруг первого до тех пор, пока острие карандаша не окажется над второй точкой. Операции центрирования и ориентирования выполняют

методом последовательных приближений, а результат контролируют по невязкам на опознаках, которые в них не участвовали.

Второй этап внешнего ориентирования называется горизонтированием. Его цель поворотом модели добиться того, чтобы при стереоскопическом совмещении измерительной марки с любым опознаком отсчет на счетчике высот был равен их высотам. Поворот вначале осуществляют в поперечном направлении одновременным вращением винтов $\square$ коррекционных механизмов левого и правого снимков. Делается это, например, так (Рис. 73). Измерительная марка стереоскопически совмещается с опознаком I, а на счетчике высот устанавливается отсчет, равный высоте этого опознака. Затем измерительная марка совмещается с опознаком II, берется отсчет по счетчику высот и на счетчике ножным диском устанавливается среднее между высотой второго опознака и полученным отсчетом. И, наконец, измерительную марку вновь совмещают с опознаком, совместным вращением винтов $\square$ коррекционных механизмов левого и правого снимков. При этом следят, чтобы не возникал поперечный параллакс. Указанные действия на первых двух опознаках выполняют последовательными приближениями до тех пор, пока разности между отсчетами по счетчику высот, полученными при стереоскопическом наведении марки и исходными высотами не окажутся меньше инструктивных допусков (например, одной трети от принятой высоты сечения рельефа).



Закончив горизонтирование в поперечном направлении, ножным диском на счетчике высот устанавливают отсчет, равный исходной высоте опознака III. К нему штурвалами X и Y перемещают и измерительную марку. Стереоскопически ее совмещают с опознаком вращением винта $\square_n$, а возникающий поперечный параллакс устраняют винтом b_z . После этого следует вернуться к одному из первых опознаков и устранить возникший там поперечный параллакс винтом $\square_n$. При необходимости указанные операции на всех опознаках повторяют. Если же допуск выдерживается, вновь вычисляют и вводят децентрации, теперь уже и левого и правого снимков, уточняют взаимное ориентирование и горизонтирование. Так действуют до тех пор, пока, вычисленные после очередного горизонтирования, децентрации не станут меньше погрешностей их установки на приборе.

Измерение модели и составление плана осуществляется после центрирования, ориентирования и закрепления основы на столе координатографа. При нанесении ситуации пишущий элемент с помощью ножного пульта опущен и касается основы, а движение измерительной марки по контуру осуществляется штурвалами X, Y и ножным диском. Штурвалы

имеют переключатели для регулирования скорости движения. Некоторые контура (например, дороги, строения, столбы линий связи и т.д.) целесообразнее отображать на планшете нанесением отдельных пикетов. Распознавание объектов производится путем анализа прямых и косвенных признаков и снимков эталонов.

Для вычерчивания горизонтали, на счетчике ножным штурвалом устанавливают ее высоту, вращением штурвалов X и Y находят точку, где измерительная марка касается поверхности модели, опускают пишущий элемент и этими же штурвалами ведут марку по поверхности модели. Следует отметить, что чем ярче выражен рельеф, тем легче его отображать на планшете (наносить горизонтали).

Y

X
 Z
 (X)
 S_1
 S_2
 A
 $A^\square$
 b_x
 b_y
 E_o
 E_1
 E_2
 Y
 X
 P
 x_2
 x_1
 f
 x_1
 z_1
 L_1
 L_2
 OK
 f
 z_1
 $L_1^\square$

Рис. 74

Другие приборы механического типа

Стереоавтограф (Рис. 74) был создан специально для обработки наземных фотоснимков формата 13x18 см, полученных при нормальном и равноотклоненном случаях съемки. На нем следует немного остановиться потому, что прибор широко использовался в нашей стране при составлении маркшейдерских планов открытых горных выработок (карьеров). Его особенность в том, что используются две пары линкером: нижняя L_1 и L_2

решает задачу определения только плановых координат X и Y точек модели, верхняя (на рисунке показана только левая высотная линейка $L_1^{\square}$) - их высоты Z . Таким образом, пространственная система координат образуется двумя плоскостными системами.

Мостик отстояний прибора может перемещаться вдоль направляющей Y на расстояния от 50 до 400 мм.

То, что моделирующая система решает уравнения прямой пространственной фотограмметрической засечки именно для равноотклоненного случая съемки, легко получить из схемы прибора, которая приведена на рисунке. Действительно, пространственное положение точки местности моделируется в приборе точками A в плане и $A^{\square}$ по высоте. Из подобия двух правых треугольников:

$$Y = f(E_2 E_0) / p = f(E_1 E_2 + E_1 E_0) / p$$

Но, как видно из схемы, $E_1 E_2 = b_y x_2 / f$ и $E_1 E_0 = b_x$, поэтому:

$$Y = f(b_x + x_2 b_y / f) / p = B f (\cos \varphi + (x_2 \sin \varphi) / f) / p$$

Из рисунка, кроме того, следует, что $X = Y x_1 / f$ и $Z = Y z_1 / f$. Формула для аппликаты получена из подобия треугольников, образованных левой высотной линейкой $L^{\square}$, изогнутой в точке S_1 под прямым углом. Полученные соотношения, таким образом, действительно соответствуют уравнениям (131-132).

Точно такие же уравнения решает аналоговое устройство другого прибора для составления планов по наземным снимкам - технокарта.

Следует отметить, что при обработке фототеодолитных снимков взаимное ориентирование не выполняется совсем, так как считается, что элементы внешнего ориентирования в процессе фотографирования устанавливаются с достаточной точностью, и поперечный параллакс отсутствует. Кроме того, несколько иначе осуществляется и внешнее ориентирование модели. Практически оно сводится к процессу центрирования и ориентирования основы на столе координатографа и устранения затем невязок на корректурных точках. В приборах предусмотрен учет угла конвергенции, если этот угол невелик (первые градусы).

Фирма Оптон выпускала серию приборов **Планимат** механического типа 1 класса точности. Модель D2 предназначалась для обработки как аэро, так и наземных снимков. Ее особенность – возможность установки карданных центров, вокруг которых вращаются проектирующие рычаги, как над снимкодержателями, так и под ними, что существенно расширяет диапазон отстояний.

В Швейцарии наиболее известными производителями стереофотограмметрических приборов являются фирм Kern и Wild. Первая из

них производила серию приборов PG. Вторая модель, например, предназначалась для составления карт в средних и мелких масштабах и имела ортофотоприставку. Третья модель использовалась в крупномасштабном картографировании. Фирма Wild известна своими автографами: А7 – А10 и В8S. Все это приборы 1 класса точности механического типа. В комплект автографа А8 входила ортофотоприставка, А7 – позволял обрабатывать и фототеодолитные снимки, А9 – сконструирован специально для составления карт по аэрофотоснимкам, полученным широкоугольными АФА. Для картографирования в мелких масштабах фирмой выпускался Aviograph. Кроме того, известны приборы Aviomar (АМ, АММ и АМУ).

В Италии разработкой и изготовлением фотограмметрических приборов в основном занималась фирма GALILEO. Известны Stereosimpleks – прибор механического типа 2 класса точности (он выпускался в различных модификациях), и Stereomesometr – для составления карт среднего масштаба. Фирмой Нистри выпускался Стереокартограф, неплохой прибор 1 класса точности, предназначенный для обработки аэро и наземных снимков, в том числе и широкоформатных.

Достаточно хорошо известны: Стереотопограф Пуавулье (Франция) и прибор Томпсона (Англия).

Ортофототрансформирование

A

B

1

2

n

b

a

S

1

n

E

1

n

E_1

E_n

Рис.75. Схема ортофототрансформирования

a^0

b^0

T

P

Как ранее отмечалось, трансформирование снимков холмистой и горной местности следует выполнять по зонам для того, чтобы смещение

точек за рельеф довести до приемлемых величин. Однако при большом числе зон этот путь снижает точность создаваемых карт и увеличивает их стоимость. Более эффективный вариант – ортофототрансформирование, в результате которого получают фотографическое изображение местности в ортогональной проекции. Называют такое изображение ортофотоснимком.

Идея метода в том, что если взять не весь фотоснимок, а только небольшую его часть, то в ее пределах смещения и за наклон и за рельеф для всех точек будут примерно одинаковыми. Иначе, искажениями можно пренебречь и считать, что там и масштаб постоянный и изображение подобно плану. Конечно, у каждого такого элементарного участка на снимке будет свой масштаб. Значит суть ортофототрансформирования в том, чтобы снимок разбить на элементарные участки, привести их к одному масштабу и составить из них единое изображение. Для того, чтобы это осуществить нужны углы наклона главного луча и информация о рельефе местности, которая изображена на фотоснимке. Все это есть после построения модели, например, на аналоговом приборе, поэтому для них были сконструированы ортопроекторы (ортоприставки).

На рис. 75 приведена схема ортофототрансформирования с помощью аналогового прибора. На нем изображены: построенная по паре снимков модель рельефа (точки A и B принадлежат этой модели); один из снимков пары P ; плоскость T трансформирования, куда спроектированы точки модели; экран E , на котором строится ортофотоизображение.

Из рисунка следует, что для того чтобы на экране изобразилась ортогональная проекция окрестности точки A (ограничена вертикальными штришками) в заданном масштабе, его нужно опустить в положение E_1 , а для изображения указанной проекции точки B наоборот поднять в положение E_n . Обеспечить такое перемещение экрана (или что все равно проектирующей камеры ортопроектора, где расположена копия трансформируемого снимка) можно связав его каретку (электрически или механически) с кареткой мостика отстояний стереоприбора. Тогда совмещение оператором измерительной марки с точкой модели автоматически приведет к установке экрана (или проектирующей камеры ортопроектора) в нужное положение. Для того чтобы зафиксировать ортогональную проекцию окрестности точки построенную на экране, изображение снимка в ортопроекторе проектируется через щель на светочувствительный слой фотопленки. Размер щели подбирается так, чтобы искажения на ее краях вызванные наклоном трансформируемого снимка и рельефом местности не превышали установленных допусков.

Общее изображение на экране получается путем сканирования установленного в ортопроекторе снимка (положения 1, 2 ... n на рис 75) параллельными маршрутами, расстояние между осями которых равны длине щели. Направление движения может быть принято по оси X или Y в зависимости от направления скатов на местности. Оператор при движении марки совмещает ее с поверхностью модели, устанавливая тем самым экран

ортопроектора. в нужное положение. Во время сканирования изображение снимка проектируется через щель на светочувствительный материал, в результате чего фиксируется изображение в виде полосы. Затем фиксируется следующая полоска и т.д.

Сканирование одной модели позволяет получать ортофотоизображение только части снимка, расположенной в зоне продольного перекрытия. Чтобы трансформировать снимок полностью следует построить следующую модель.

Автоматизация обработки снимков на фотограмметрическом оборудовании

Уже в семидесятых годах двадцатого столетия стало очевидным, что от графических продуктов (планов и карт), которые получают в процессе съемок нужно переходить к их цифровым аналогам. Связано это было с бурным развитием вычислительной техники, увеличением ее мощности и быстродействия. В результате появилась реальная возможность заменить в качестве носителей информации картографические материалы на цифровые модели объектов. На основе таких моделей автоматизация решения различных прикладных задач, в том числе и проектирования, а также составления необходимых графических документов становилась делом техники.

Получить цифровые модели можно, например, путем цифрования карт и планов. Но гораздо производительнее совместить их построение с процессом съемки (с процессами выполнения линейно-угловых измерений в тахеометрии или обработки снимков в фотограмметрии). В тахеометрической съемке это привело к появлению полевых регистраторов информации, а затем и электронных тахеометров, исключивших ручной ввод данных из журналов в компьютер. В фотограмметрии было создано второе поколение универсальных аналоговых стереофотограмметрических приборов. Они были обеспечены аналого-цифровыми преобразователями, пакетами прикладных программ, обеспечившими автоматизацию процессов внешнего ориентирования модели, построенной на приборе, регистрацию результатов измерения снимков и построения цифровых моделей. Иногда такое сочетание аналоговых приборов со средствами автоматизации называют гибридными системами

Когда речь идет об автоматизации обработки снимков, то предполагается, что автоматизированными должны быть следующие процессы решения двойной обратной пространственной засеки:

1. Внутреннее ориентирование снимков;
2. Построение фотограмметрической модели (взаимное ориентирование снимков);
3. Внешнее ориентирование модели по опознакам;
4. Съемка ситуации и рельефа.

При этом на всех этапах должна быть обеспечена автоматическая регистрация измерений снимков и программная поддержка построения цифровой модели на ПЭВМ. Для реализации процесса автоматизированной

обработки необходимы аппаратные и программные средства. Аппаратные средства, как правило, включают:

- Компьютер типа IBM PC или совместимый с ним. Требования к его техническим характеристикам во многом зависят от объема обрабатываемых данных. Но лучше, если это Pentium современной конфигурации.
- Мониторы цветные лучше SVGA от 800X600 пикселей с размером экрана по диагонали 17 дюймов или больше, (но допустимо и меньше).
- Графопостроитель рулонный перьевой формата А0, с количеством перьев не менее 4.
- Принтер, лучше лазерный.
- Дискеты и расходные материалы в необходимом количестве.

Автоматическая регистрация измерений обеспечивается сопряжением стереоприборов для обработки снимков с ПЭВМ. При использовании аналогового фотограмметрического прибора механического типа на его ходовые винты устанавливаются инкрементальные (дифференциальные) датчики типа «угол-код». Они преобразуют механические перемещения кареток прибора в электрические импульсы (т.е. при вращении винтов вырабатываются электрические импульсы). Чтение импульсов, их суммирование, контроль и регистрацию в ПЭВМ выполняются с помощью интерфейсного устройства (координметр, блок Marcgraf, ZIF и др.). В результате и получается так называемая гибридная система. Для того, чтобы регистрация осуществлялась не в импульсах, а в миллиметрах, перед началом измерений необходимо определить цену импульса, используя для этого, например, результаты измерения сетки Готье.

Что касается программного обеспечения, то в нашей стране разработано несколько пакетов, обеспечивающих и решение двойной обратной пространственной засечки, и построение цифровой модели объекта, при чем как по результатам аэрофотосъемки, так и по результатам наземной стереофотограмметрической съемки. Из них заслуживает внимание, например, программный комплекс «Карьер», разработанный в фотограмметрической лаборатории ВНИМИ. Это специализированный пакет для обработки материалов фотограмметрической и тахеометрической съемок карьеров. Но его можно использовать и при решении ряда задач инженерной фотограмметрии.

Достоинство пакета в том, что в процесс обработки наземных снимков включен этап корректирования фотограмметрической модели, позволяющий существенно ее улучшить, уменьшить невязки на опознаках и в итоге повысить точность конечного продукта. Для этого геодезические координаты опознаков преобразуются в фотограмметрическую систему координат. Разности между перевычисленными координатами опознаков и координатами полученными в процессе измерения не откорректированной модели (невязки в фотограмметрической системе координат), позволяют понять природу их возникновения и принять обоснованные решения по их устранению.

В основу автоматизированного корректирования фотограмметрической модели положен хорошо известный приближенный метод основанный на раздельном устранении невязок вначале по оси Y_{ϕ} , а затем X_{ϕ} и Z_{ϕ} . Программа предусматривает два метода выполнения этой операции: автоматический и ручной. Первый вариант является основным. Для его выполнения необходимо обеспечить стереопару как минимум тремя опознаками. Максимальное их число – 20, но три из них должны иметь, так называемое, стандартное расположение: все на дальнем плане, точка 1 вблизи главного луча правого снимка, точки 2 и 3 – соответственно у левой и правой границы стереопары. Ручное корректирование всегда выполняется по трем стандартно расположенным точкам, в случае если в процессе обработки предполагается рисовка горизонталей, а также для устранения больших невязок (более 10 м) перед автоматической корректурой.

В целом автоматизированная обработка снимков при наземной стереофотограмметрической съемке включает в себя следующие этапы:

1. Подготовительные работы;
2. Корректирование фотограмметрической модели;
3. Геодезическое ориентирование фотограмметрической модели (ее внешнее ориентирование);
4. Сгущение съемочного обоснования и фотограмметрическую съемку объекта.

Подготовительные работы заключаются в создании каталогов координат опознаков и базисов фотографирования, а также предварительном построении фотограмметрической модели на приборе. На экране монитора указывают имя стереопары, и заполняют таблицу с параметрами фотографирования. На отсчетных устройствах обрабатывающего прибора устанавливают значения данных из таблицы и согласовывают начальные отсчеты интерфейсного устройства с началом фотограмметрических координат прибора.

Геодезическое ориентирование осуществляется после корректирования модели простым переходом в соответствующий режим. После завершения ориентирования, на экране монитора можно получить протокол обработки стереопары. В нем будут отражены параметрами фотографирования и невязками в фотограмметрической и геодезической системах координат. Если они удовлетворяют требованиям технической инструкции, работа продолжается либо в режиме фотограмметрического сгущения сети либо в режиме фотограмметрической съемки.

В процессе съемки на экран монитора выдаются: положение измерительной марки прибора и ее геодезические координаты, редактируемая линия в белом цвете, нанесенные уже контура и элементы местности в розовом цвете, изображение цифровой модели, если она существует, в голубом цвете. Указанное изображение можно перемещать, выполнять его центровку и масштабировать. Регистрацию пикетов можно осуществлять в ручном и автоматическом режимах. Можно задавать тип регистрируемых линий, и если необходимо, их направление и т.д.

В программе предусмотрены операции склеивания и фильтрации информации. Склеивание это логическая операция, в результате которой два элемента имеющие одинаковую часть заменяются одним элементом. Она обеспечивает объединение одноименных структурных элементов объекта, расположенных в зоне перекрытия съемки соседних стереопар; съемки, выполненной с различных базисов, а также при пополнении цифровой модели объекта. Эта операция осуществляется автоматически, если расхождение в положении точек перекрывающихся объектов не превосходит допусков.

Фильтрация это операция автоматического удаления избыточной информации. Параметрами фильтрации являются: минимальное и максимальное расстояние между пикетами и допустимое расстояние между исключаемой точкой и прямой проходящей через два смежных с ним пикетов. Следует заметить, что на производстве стремятся экспортировать результаты автоматизированной обработки в более развитые программные продукты, оперирующие с векторными данными, например в Автокад.

Понятие об универсальных стереоприборах аналитического типа

Как уже отмечалось, создание аналитических универсальных стереоприборов связано, прежде всего, с успехами в развитии электронно-вычислительной техники. Это фактически фотограмметрический комплекс, основными частями которого являются: высокоточный прибор для измерения снимков (то есть той или иной конструкции стереокомпаратор), быстродействующая управляющая ПЭВМ, графопостроитель, программное обеспечение и различные сервисные устройства.

Измерительный прибор связан с ПЭВМ с помощью датчиков и аналого-цифровых преобразователей. Важная особенность – существование между ними обратной связи, необходимой для дифференциальных перемещений снимков с целью устранения поперечных параллаксов. Осуществляются эти перемещения приводными двигателями, которые и управляются ПЭВМ. Программное обеспечение должно включать фотограмметрические модули для внутреннего и взаимного ориентирования снимков, внешнего ориентирования модели, а также пакеты, обеспечивающие регистрацию координат в процессе измерений модели, поддержку файлов данных (например, каталога координат, цифровой модели местности и рельефа и т.д.), пакет прикладных программ. Хорошо, когда программное обеспечение открыто для программ пользователя. Следует отметить, что приборы аналитического типа обеспечивают наивысшую точность картографирования по снимкам, так как для измерений используются высокоточные стереокомпараторы, и нет ограничений на учет факторов, которые приводят к искажениям изображений. Важно, чтобы их влияние было записано аналитически.

Основные процессы при обработке снимков:

- Загрузка исходных данных в ПЭВМ и установка снимков на каретках снимкодержателей;

- Внутреннее ориентирование, которое сводится к выполнению измерений на координатных метках или на крестах, если впечатана сетка. Результат – параметры, позволяющие пересчитывать фиксируемые в процессе измерений отсчеты в фотокоординаты;

- Взаимное ориентирование снимков. Оно заключается в измерении координат не менее чем на 5 соответственных точках. На самом деле точек берут больше, и их расположение не обязательно должно быть стандартным. Результат – элементы взаимного ориентирования, используемые для вычисления смещений снимков, осуществляемых приводными двигателями. Если ориентирование выполнено корректно, то поперечный параллакс будет отсутствовать при наведении на любую пару соответственных точек (то есть будет построена модель);

- Внешнее ориентирование модели состоит в измерении координат опознаков и вычислении матрицы преобразования. Важной характеристикой качества построенной модели и результатов внешнего ориентирования являются остаточный поперечный параллакс и невязки на опознаках.

- Измерение модели и составление плана начинают после согласования систем координат модели и основы распложенной на столе графопостроителя.

Перед выполнением того или иного процесса с помощью меню в оперативную память ПЭВМ загружается соответствующий пакет. На современных ПЭВМ возможна и параллельная обработка результатов измерений (например, составление плана и создание цифровой модели).

Изготовителей аналитических приборов рассматриваемого типа много. Отмечается тенденция к производству недорогих систем по возможности полностью интегрированных в Географическую информационную систему (ГИС). Почти в каждой модели реализовано оптическое наложение данных, то есть, возможно совмещение стереомодели с твердой копией.

Из аналитических приборов особенно хорошо известны Планикомпы фирмы Оптон (Германия). Существуют две их серии: С100, С110, С120, С130 и С140, а также Р1, Р2 и Р3. Вторая серия имеет комплексное математическое обеспечение PHOCUS. Оно обеспечивает фототриангулирование по способу связей, построение ЦМР при различных вариантах выбора точек, выполнение операций картосоставления в режимах on line и off line, формирование базы данных ГИС с объектно-ориентированной структурой, позволяющей осуществлять анализ данных по тематическим критериям, выполнять обработку наземных и спутниковых снимков.

Известны серия приборов DSR Фирма Kern (Швейцария), приборы: Wild BC3, APY, S9-AP, RAP (Wild Швейцария), SD2000 (Leica Швейцария), Дигикарт 40 (Италия) и т.д.

В приборе TRASTER фирмы MATRA (Франция) снимки проецируются на один экран в поляризованном свете, что позволяет через очки наблюдать модель сразу несколькими специалистами.

Класс малогабаритных приборов упрощенной конструкции производился Австралийской фирмой ADAM Technologi, это G2, G3 – стереокорды, G3/PC? ASP – 2000.

В нашей стране был сконструирован и используется на производстве прибор аналитического типа Анаграф.

Понятие о топографическом дешифрировании снимков

Под дешифрированием понимается выявление, распознавание и определение характеристик объектов местности, изобразившихся на фотоснимках. В зависимости от назначения и задач, решаемых в ходе дешифрирования, различают два его вида: топографическое и специальное.

Топографическое дешифрирование выполняют с целью выявления, распознавание и определение характеристик объектов местности, которые должны наноситься на план в соответствии с требованиями действующих условных знаков. Дешифрирование снимков в процессе обследования местности в натуре называется полевым. Распознавание на фотоизображениях объектов и контуров без обследования их в натуре называется камеральным дешифрированием. В зависимости от топографической изученности картографируемого района и принятой технологии работ полевое дешифрирование проводится до камерального или после него.

Полевое дешифрирование ведут, как правило, по маршрутам, которые намечают там, где расположены объекты, подлежащие обязательному обследованию в натуре (поселки, мосты, ЛЭП, трубопроводы и проч.). При этом устанавливают и подписывают названия объектов и другие их характеристики. В процессе полевого дешифрирования следует руководствоваться требованиями и рекомендациями инструкции [9] (пункты 12.16). Дешифрирование на местности населенных пунктов и объектов с высокой контурной нагрузкой может производиться на увеличенных фотоснимках, фотосхемах, фотопланах или на аэрофотоснимках в комплекте с графическим оригиналом. Материал, на котором фиксируются результаты дешифрирования, должен быть в масштабе составляемого плана или близкий к нему. Данные промеров для нанесения объектов неуверенно распознающихся на аэрофотоснимке или появившихся после залета фиксируют на его обратной стороне или на отдельном абрисе.

Камеральное дешифрирование значительно дешевле полевого, но для успешного его выполнения необходимо изучать дешифровочные, или, как их еще называют, демаскирующие признаки объектов. Делятся эти признаки на прямые и косвенные. К прямым признакам относятся: форма, размеры, тень и цвет объекта, структура его изображения. Косвенными признаками

являются: относительное расположение объектов, следы деятельности, приуроченность, взаимосвязь и взаимообусловленность. Основными демаскирующими признаками являются форма и размеры изображения объектов. Плановые фотоснимки равнинной местности почти сохраняют сходство формы изображения с натурой. Строения изображаются в виде прямоугольников, дороги – вытянутыми линиями, извилистые линии соответствуют ручьям или небольшим речкам. Представление о форме высокого объекта можно получить по изображению его тени. По результатам простейших измерений и зная параметры фотографирования (масштаб, высоту) можно определить размеры объектов в натуре и дать соответствующую характеристику. Важными демаскирующими признаками служат спектральная отражательная способность объекта структура его изображения зернистая для лесов, мелкозернистая для кустарников, пятнистая для болот, гладкая для водоемов и т.д. Косвенные признаки помогают дешифровать отдельные объекты, по их взаимной связи с другими объектами, изобразившимися на фотоснимке. Типичный пример это изображение дороги, обрывающейся на одном берегу и продолжающейся на другом (признак брода или паромной переправы). Дорожки или тропинки, сходящиеся в одной точке, указывают на наличие колодца или водного источника. Очень помогают при камеральном дешифрировании снимки эталоны, которые для наиболее трудных и характерных участков получают в процессе полевого дешифрирования.

Для получения студентами практических умений и навыков по данному разделу предусмотрено проведение четырех практических заданий и четырех лабораторных работ:

Практическое занятие 1. Измерения цифровых снимков, источники ошибок. Целью работы является изучение особенностей измерения цифровых снимков, основных принципов измерений, механизмов корреляции изображений, внутреннего ориентирования снимка в системе координат цифрового изображения и физических источников ошибок снимка.

Практическое занятие 2. Трансформирование снимков и составление фотопланов. Целью работы является изучение общих положений трансформирования снимков и составления фотоплана, получение практических навыков составления фотоплана.

Практическое занятие 3. Топографическое дешифрирование снимков. Целью работы является изучение понятий о топографическом дешифрировании снимков, технологий, основанных на стереообработке фотоснимков, автоматизации обработки снимков на фотограмметрическом оборудовании.

Практическое занятие 4. Технические средства аэро и наземной фотосъемки. Целью работы является изучение летательных аппаратов, аэрофотоаппаратов, вспомогательного аэрофотосъёмочного оборудования, оборудования для фотографирования с земли.

Лабораторная работа 1: «Использование масок в PhotoScan». Целью работы является ознакомление способами и средствами обработки информации программными средствами, получение навыков использования масок для выравнивания фотографий, построения геометрии и текстуры 3D модели, редактирования масок, изучение инструментов выделения областей.

Лабораторная работа 2: «Редактирование геометрии модели в PhotoScan». Целью работы является ознакомление способами и средствами обработки информации программными средствами, получение навыков редактирования геометрии модели, ее оптимизация, фильтрация связанности компонент, ручное удаление полигонов.

Лабораторная работа 3: «Задание системы координат в PhotoScan». Целью работы является ознакомление способами и средствами обработки информации программными средствами, получение навыков задания системы координат, размещение опорных точек в ручном и автоматическом режиме, задания относительных координат для выполнения геопривязки модели, изучение форматов файлов с опорными координатами, изучение методов повышения точности геопривязки с помощью оптимизации облака точек.

Лабораторная работа 4: «Проведение измерений в PhotoScan». Целью работы является ознакомление способами и средствами обработки информации программными средствами, получение навыков работы с набором измерительных инструментов, позволяющих вычислять расстояния между точками, площадь поверхности и объем реконструированной трехмерной модели.