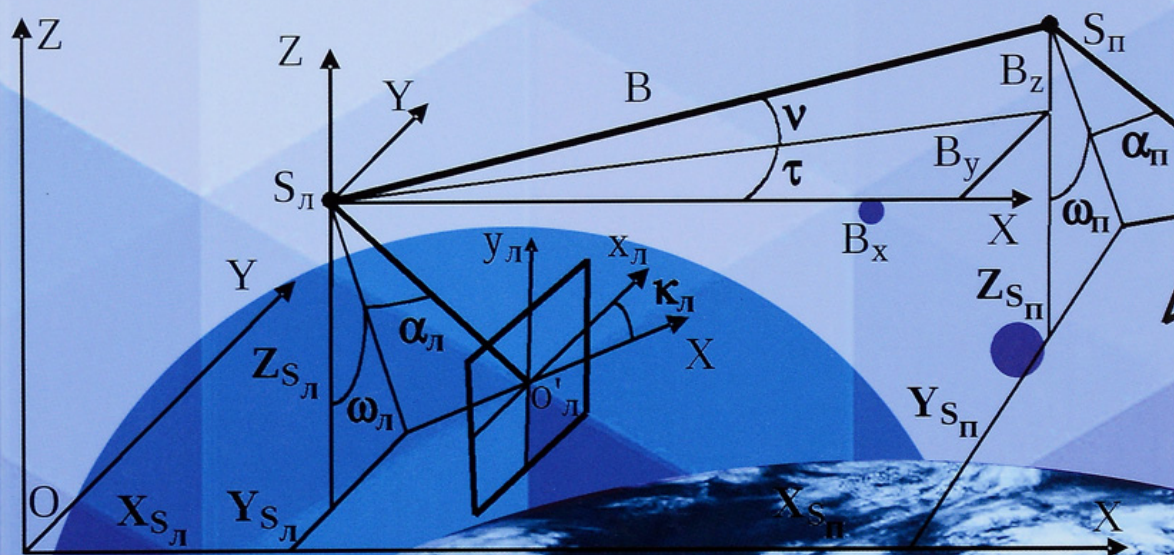


А.Н. Лимонов

Л.А. Гаврилова

Прикладная фотограмметрия



gaudeamus

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
ФГБОУ высшего образования
«Государственный университет по землеустройству»

Учебник для вузов

А.Н. Лимонов
Л.А. Гаврилова

ПРИКЛАДНАЯ ФОТОГРАММЕТРИЯ

*Допущено Учебно-методическим объединением вузов
Российской Федерации по образованию в области
землеустройства и кадастров в качестве учебника для студентов
высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки
21.04.02 — Землеустройство и кадастры*

«Академический проект»
Москва, 2010

УДК 528.7 (075.8)
ББК 26.1я73
Л 58

Л 58 **Лимонов А.Н., Гаврилова Л.А.**
Прикладная фотограмметрия: Учебник для вузов. — М.:
Академический проект, 2016. — 255 с. — (Gaudeamus: Библиотека геодезиста и картографа).

ISBN 978-5-8291-1919-5

В учебнике изложены научные основы и практические рекомендации применения фотограмметрии для получения информации о пространственном положении объектов земной поверхности. Даны аналитический анализ геометрических свойств аэро- и космических снимков и представление о теории и инновационных технологиях обработки аэро- и космических снимков на современных цифровых фотограмметрических станциях для создания цифровых моделей местности, ортофотопланов — основы размещения топографической, кадастровой и иной информации. Представлены решения прикладных задач фотограмметрическим методом по аэро-, космическим и наземным снимкам.

Материал в учебнике подготовлен для углубленного изучения фотограмметрии магистрами по направлению подготовки «Землеустройство и кадастры», а также специалистами по специальности «Прикладная геодезия» и аспирантами по профилю «Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия».

УДК 528.7 (075.8)
ББК 26.1я73

ISBN 978-5-8291-1919-5

© Лимонов А.Н., Гаврилова Л.А.,
2016
© Оригинал-макет, оформление.
«Академический проект», 2016

Учебник «Прикладная фотограмметрия» предназначен для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Прикладная геодезия», и для углубленного изучения фотограмметрии бакалаврами по направлению подготовки «Землеустройство и кадастры». Производственная деятельность этих специалистов связана с созданием и использованием планов и карт, определением формы, размеров Земли, определением пространственного положения расположенных на ней природных и антропогенных объектов.

Одним из методов получения данной информации является *фотограмметрия*.

Фотограмметрия — научное и производственное направление, изучающее методы определения метрических характеристик и пространственного положения объектов земной поверхности по их изображению на снимках. Термин «фотограмметрия» происходит от греческих слов *photos* — «свет», *gramma* — «запись» и *metreo* — «измеряю», что означает измерение изображения объекта, полученного фиксированием поступающих от него световых лучей.

Основное применение фотограмметрии связано с созданием по аэро- или космическим снимкам планово-картографического материала различных масштабов и тематической направленности, например, кадастровых планов, почвенных карт. Это направление называют *фототопографией*.

Второе направление связано с определением метрических характеристик объектов по наземным снимкам для решения инженерных задач:

- вычисление объемов земляных работ при рекультивации оврагов и карьеров;
- создание фасадных планов зданий и сооружений сложной архитектуры, предназначенных для реконструкции, реставрации;
- проведение наблюдений за деформациями участков земной поверхности, зданий и сооружений, оползневыми процессами;
- паспортизация объектов технического назначения.

Третье направление связано с решением прикладных задач в различных областях науки и техники: строительстве, медицине, криминалистике, автомобилестроении и т. д. Это направление называют *ближней фотограмметрией*.

Главным отличием фотограмметрического метода от наземных геодезических измерений является то, что для получения информации о пространственном положении изучаемых объектов исполь-

зуют наземные, аэро- и космические снимки, представляющие собой модель местности. Измеряют не объект, а его модель. Точность получения метрических параметров зависит от изобразительных свойств модели (снимка), ее деформации и корректности математического описания связей координат точек снимка и местности (объекта). В связи с этим понятие «фотограмметрическая съемка» подразумевает не только фотограмметрическую обработку снимков, но и грамотное выполнение наземной, аэро- и космической фотосъемки.

Преимущество фотограмметрического метода состоит в том, что по изображениям объекта можно получить цифровую метрическую информацию такой густоты, которую сложно достичь при непосредственном измерении местности или объекта. Для больших территорий, труднодоступных районов и опасных для человека зон фотограмметрические измерения являются безальтернативными. Высокая объективность, надежность, документальность (снимок территории — это отображение реальной информации на определенный момент времени) позволяют считать фотограмметрический метод наиболее продуктивным и экономичным при сборе метрических данных о земной поверхности.

Фотограмметрия как научно-прикладное направление сформировалась после открытия в 1839 г. фотографии. В настоящее время фотограмметрические методы применяют для измерения изображений объектов, полученных не только в оптическом диапазоне электромагнитного спектра, но также в радио- и рентгеновском диапазонах.

В развитии фотограмметрии выделяют три важных этапа¹. Далее изложены основные, главным образом, отечественные разработки в области фотограмметрии.

В течение *первого этапа*, назовем его графическим, происходило освоение фотограмметрической съемки применительно к различным областям деятельности человека.

С учетом этого разрабатывались конструкции съемочной аппаратуры и обрабатывающих приборов, методики их использования, а также теоретические основы фотограмметрии.

В 1852 г. Э. Лосседа произвел фотографирование местности с целью создания топографического плана по наземным фотоснимкам. На плане из каждой точки стояния прочерчивались направления оптической оси. На них от точки стояния откладывался отрезок, длина которого равнялась фокусному расстоянию фотокамеры. На конце отрезка под прямым углом прочерчивалась линия, которая соответствовала фотоснимку. На этой линии откладывались измеренные на снимке абсциссы, через концы которых из точек стояния проводили направления. Пересечение направлений давало положение точки

¹ В обзоре истории развития фотограмметрии использованы материалы из работы Б.В. Краснопецева «Основные события в истории фотограмметрии в XIX и XX вв.».

на плане. Высоту точки рассчитывали по измеренным на снимке ординатам. Э. Лосседа назвал свой способ «метрофотографией», что означало «измерительная фотография». Если Лосседа первым в мире применил для создания планов местности наземную фотосъемку, то парижский фотограф Ф. Турнашон (F. Tournaillon), известный под псевдонимом Надар (Nadar), первым в мире предложил использовать для этих же целей воздушное фотографирование. Началом аэрофотосъемки поверхности Земли можно считать фотографирование Парижа с воздушного шара, выполненное им в 1858 г.

В 1855 г. Ф. Турнашон-Надар взял привилегию на воздушное фотографирование, указывая, что по воздушным фотоснимкам он сможет точно указывать границы земельных участков и тем самым заменит землемерную съемку. Он предлагал с высоты 1000 м фотографировать земельные площади до 100 га.

В 1858 г. немецкий районный инспектор строительства А. Мейденбауэр (A. Meidenbauer) первым в мире решил использовать фотокамеру для съемки фасадов зданий и сформулировал принципы применения наземной фотосъемки для составления планов архитектурных сооружений, тем самым положив начало прикладному применению фотограмметрии в разных областях деятельности человека. Мейденбауэр впервые использовал термин «фотограмметрия», который предполагает более широкое применение фотограмметрических методов, чем появившийся ранее термин «фототопография». Данный термин охватывал только те виды работ, которые были связаны с составлением планов местности.

18 мая 1886 г. А.М. Кованько получил первые в России воздушные фотоснимки во время полета над Санкт-Петербургом на воздушном шаре РТО. Фотосъемка была выполнена обыкновенным фотоаппаратом с простым моментальным затвором и форматом кадра 12×16 см. Снимки были сделаны с высот 800, 1200 и 1350 м. Первые два снимка были получены при наклонном положении оптической оси фотоаппарата, а третий — при примерно отвесном положении.

6 июля 1886 г. во время полета от Санкт-Петербурга до Кронштадта на управляемом А.М. Кованько воздушном шаре РТО Л.Н. Зверинцев выполнил съемку фотокамерой, созданной им специально для воздушной фотосъемки. В ходе полета над морем ими была отмечена возможность изучения по воздушным фотоснимкам рельефа дна. В опубликованном в 1887 г. отчете о полете Зверинцев пишет, что, находясь на высоте 2500 м над морем, они наблюдали «прекрасную карту мелей, глубокой воды и фарватера. Все это очерчивалось отчетливо; в одних местах контуры шли резко, в других сглаживались переливами. Мели выделялись в виде желтых, бурых участков. Очевидно, что яркость тона указывала на меньшую воду, и наоборот. Казалось, перед нами внизу была раскинута гигантская карта мелей, иллюминированная искусным чертежником сепией».

12 февраля 1894 г. служивший в Варшавском воздухоплавательном батальоне инженер-поручик В.Ф. Найденов (впоследствии профессор Военно-инженерной академии) прочитал доклад «Фотографирование с шара» в Варшавском собрании военных инженеров. Найденов был первым, кто с начала 90-х гг. XIX в. стал проводить в России работы по построению планов с использованием воздушных фотоснимков. Весной 1894 г. он сделал ряд сообщений в Варшавском военном фотографическом обществе и в штабе войск Варшавского округа о фотографировании с воздушного шара и построении плана местности по полученным фотоснимкам. В.Ф. Найденов обратил внимание на то, что вибрация шара из-за напряженности всей его конструкции вызывает нерезкость снимков и предложил не прикреплять фотоаппарат к корзине шара, а выполнять съемку «с руки». Он сконструировал прикрепляемый к фотокамере прибор, который позволял определять угол наклона фотоснимка и азимут главной вертикальной плоскости.

В 1898 г. В.Ф. Найденов построил персептометр (фототрансформатор) для преобразования наклонных снимков в горизонтальное положение.

В 1902 г. Найденов начал читать курс фотограмметрии в Военно-инженерной академии, расположенной в то время в Санкт-Петербурге, офицерам Воздухоплавательного парка. В основу курса были положены законы перспективной геометрии.

В 1902 — 1903 гг. Р.Ю. Тиле произвел первую маршрутную фотосъемку, перемещая воздушный шар с панорамографом вдоль русла р. Припять в районе г. Мозырь. Положение фотоаппарата в момент съемки определялось геодезическими измерениями угла наклона фотоснимков по линии горизонта, изобразившейся на перспективных фотоснимках. Полученные снимки он продемонстрировал на Виленском съезде инженеров водных путей весной 1904 г. Осенью 1904 г. Тиле провел фотосъемку строительства Санкт-Петербургского порта и составил его план.

В 1908 — 1909 гг. Тиле издал трехтомную монографию «Фототопография в современном развитии», в которой впервые в России в единой связности была описана история развития фотограмметрии, ее теоретические основы, используемое съемочное и обрабатывающее оборудование. 21 августа 1916 г. приказом начальника штаба верховного главнокомандующего в русской армии были введены фотограмметрические части при разведывательных отделах штабов армий и фронтов.

В октябре 1912 г. во время Балканской войны болгарским летчиком П. Таракчиевым, окончившим в России Гатчинскую летную школу, была выполнена первая фотосъемка с самолета с целью разведки. Он произвел аэросъемку района г. Свиленград фотоаппаратом Ульянина. 21 декабря 1912 г. три его фотоснимка были опубликова-

ны в английской газете «The Illustrated London News». В этой войне участвовали русские летчики-добровольцы, которые использовали воздушное фотографирование в целях разведки. В начале 1914 г. их наградили орденами Болгарии.

Условным окончанием первого периода считают 1918 г.

Второй период характеризуется разработками в области фотограмметрического приборостроения, использованием аэрофотограмметрии для создания и обновления карт и планов на большие площади, населенные пункты, районы интенсивного строительства. Создавались автоматические аэрофотокамеры и оборудование, облегчающее стереофотограмметрическую обработку аэрофотоснимков. Создавались аэросъемочные самолеты, отработывалась методика самолетовождения с учетом фотограмметрических требований. В основу фотограмметрической обработки фотоснимков были положены преобразования на аналоговых (оптико-механических) стереофотограмметрических приборах. Совершенствовалась наземная фотограмметрическая съемка и расширялось ее использование в нетопографических целях. Во второй половине периода стала развиваться космическая фотограмметрическая съемка. В конце этого периода в фотограмметрии начали использовать электронно-вычислительную технику, персональные компьютеры, были созданы аналитические стереофотограмметрические приборы на замену аналоговым. Концом второго периода можно считать начало 90-х гг. XX в.

В 1926 г. на геодезическом отделении Московского межевого института (ММИ) начинается обучение студентов по специализации «фототопография»: при кафедре фототопографии создается аэрофотосъемочный кабинет. В 1927 г. на военно-геодезическом отделении ММИ была организована специализация по фотограмметрии.

Одновременно с этой работой были выполнены первые опытно-производственные работы по аэросъемке городов. Была проведена аэросъемка г. Чебоксары под руководством В.Ф. Дейнеко и г. Краснококшайска (ныне г. Йошкар-Ола) под руководством Н.Н. Веселовского. В 1927 г. Гостехбюро получило заказ на проведение аэросъемки в Ферганской долине для сельскохозяйственных нужд и с целью изыскания трассы Туркестано-Сибирской железной дороги (Турксиба). Аэросъемка в Ферганской долине была проведена под руководством В.Ф. Дейнеко на площади 1814 кв. км. По аэрофотоснимкам, впервые полученным с высоты 4600 м, были изготовлены фотопланы в масштабе 1:10 000. На фотопланы были нанесены границы землепользований и составлены экспликации по землепользованиям и районам. В 1929 г. Дейнеко разработал аналитический вариант фототриангуляции, который стал применяться при аэрофотогеодезических работах. Разработки отечественных ученых в области фототриангуляции привели к тому, что

в дальнейшем в нашей стране она заменила сплошную привязку аэрофотоснимков.

В 1931 г. в Московском институте землеустройства (в настоящее время ГУЗ) был организован кабинет аэрофотосъемки, который в 1937 г. был преобразован в кафедру аэрофотогеодезии. Первым заведующим кафедрой стал В.Ф. Дейнеко.

С 1931 по 1935 г. происходит широкое освоение аэрофотогеодезическим производством контурной и комбинированной съемок при создании карт масштабов 1:10 000 и 1:25 000. В этот же период были проведены аэрофотогеодезические работы с целью обеспечения картографическими материалами строительства Беломорканала, канала им. Москвы, Байкало-Амурской железнодорожной магистрали, «Большой Волги». Например, для составления проекта строительства канала Москва–Волга Госаэрофотосъемка выполнила в апреле 1932 г. аэросъемку зеркала Москвы-реки и ее бассейна в момент наивысшего разлива. Аэросъемку в масштабе 1:2500 фотокамерой К-1 с высоты около 500 м произвели летчик Арцеулов и аэросъемщик Саранцев на самолете «Юнкерс-21». Фотограмметрическая обработка аэроснимков была выполнена в Московском аэрофотогеодезическом предприятии под руководством его главного инженера В.Ф. Дейнеко.

В 1935 г. было создано Главное управление государственной съемки и картографии (ГУГСК), в структуре которого организуются аэрофотогеодезические предприятия, при которых создаются аэросъемочные летные отряды, выполняющие летно-съемочные работы по заказам различных ведомств и организаций

Во время Второй мировой войны аэросъемка обеспечивала войска фотоматериалами как на фронтовую полосу, так и на глубину обороны противника. Для гражданских целей аэросъемка производилась в основном для геологических изысканий.

В 1941 г. Н.А. Урмаев опубликовал «Элементы фотограмметрии», где изложил теорию фотограмметрии с использованием векторной алгебры. Эта работа стала основой для написания учебников и монографий по фотограмметрии.

На основе фототрансформаторов SEG-1 и SEG-4 немецкой фирмы «Цейсс» было налажено производство фототрансформаторов ФТБ (большой) и ФТМ (малый).

На основе теории обработки аэроснимков с преобразованными связками проектирующих лучей были разработаны отечественные универсальные стереофотограмметрические приборы. С 1954 г. начато серийное производство стереопроектора СПР-2, созданного под руководством Г.В. Романовского. В начале 1960-х гг. была выпущена модернизированная модель этого прибора СПР-3.

С 1956 г. начался выпуск стереографа Дробышева (СД-1), имевшего не координатограф, а плоскостной пантограф. Была выпущена

промежуточная модель СД-2 с координатографом, но самой массовой была следующая модель СД-3.

В 1957 г. на Первом международном фотограмметрическом съезде канадский фотограмметрист Ю.В. Хелава (U.V. Helava) сообщил об общих принципах конструкции аналитического стереофотограмметрического прибора. Первый в мире образец такого прибора был создан фирмами ОМІ (Италия) и Bendix (США) под названием AP-1 (analytical plotter) и продемонстрирован в 1960 г. Конструкция прибора состояла из измерительного блока, созданного на базе стереокомпаратора, электронной вычислительной машины (ЭВМ) и координатографа. Программное обеспечение работы прибора было разработано Хелавой. Это событие стало началом перехода фотограмметрии на использование компьютеров и замены ими существовавших до сих пор аналоговых фотограмметрических приборов.

21 сентября 1968 г. с КА «Зонд-5», совершившего облет Луны и возвращавшегося на Землю, с расстояния 90 000 км впервые в мире была произведена фотосъемка земного шара. За счет вращения Земли было получено ее первое стереоскопическое изображение. «Зонд-5» впервые в мире доставил на Землю экспонированную в дальнем космосе фотопленку, что до сих пор имело место только при пилотируемых полетах и только с орбит спутников Земли. Установка фотокамеры на КА, фотохимическая, фотограмметрическая и картографическая обработки полученных фотоснимков были произведены в МИИГАиК, где подобная работа выполнялась также при обработке фотоснимков, полученных с КА «Зонд-6, -7, -8». С КА «Зонд-6, -8» были сфотографированы экваториальные районы обратной стороны Луны и по этим снимкам были изготовлены карты в масштабе 1:1 000 000. С КА «Зонд-7» были сфотографированы участки лунной поверхности в районе северного полюса. Руководил разработкой съемочного аппарата Б.Н. Родионов, доктор технических наук, в настоящее время профессор кафедры аэрофотогеодезии ГУЗ.

В ноябре 1970 г. впервые в мире на поверхность Луны был доставлен автоматический самоходный аппарат «Луноход-1», у которого на левом и правом бортах были установлены по два телефотометра. Один вел съемку в вертикальной плоскости вперед-назад по ходу, а другой вбок с наклоном к лунной поверхности. В результате на месте стоянки «Лунохода» снимались четыре панорамы, по которым были составлены планы участков местности в масштабах от 1:15 до 1:1000. В общей сложности было получено более 200 панорам. Под телефотометрами, ведущими съемку в вертикальной плоскости, были подвешены оптические отвесы, которые позволяли определять угол наклона и азимут съемки.

К 1988 г. было завершено картографирование территории нашей страны в масштабе 1:25 000, чему способствовали достижения в области аэрофотосъемки и фотограмметрии.

Третий период, начавшийся в 90-е гг. XX в., ознаменовался полным переходом на цифровую обработку снимков, полученных различными съёмочными системами. Первым шагом в этом направлении явилось подключение к компьютеру существовавших стереофотограмметрических приборов.

На современном научно-техническом уровне фотограмметрия основывается на технологиях компьютерной обработки материалов аэро- и космических съёмок, получаемых в цифровом или аналоговом виде. На базе персональных компьютеров созданы цифровые фотограмметрические станции с программным пакетом полной обработки снимков. Применяют термин *цифровая фотограмметрия* и новый вид картографического документа — *цифровую карту*. Был создан высокоточный фотограмметрический сканер, преобразующий снимки, полученные с помощью аналоговых фотокамер, в цифровую форму с целью ввода их в память компьютера с сохранением их геометрических и фотометрических характеристик. Расширяется использование цифровых съёмочных камер, которые позволяют вводить снимки в компьютер без использования сканера.

Принципиальная схема создания картографического материала имеет следующий вид. Для компьютерной обработки аналогового изображение с помощью высокоточных фотограмметрических сканеров преобразуют в цифровой вид — растровое изображение. Далее в среде специализированного программного обеспечения производят фотограмметрическую обработку снимков. Полученные данные используют для создания картографической продукции — цифровых топографических и тематических (например, кадастровых) планов и карт. Хранение картографической и иной информации в цифровом виде позволяет иметь оперативный доступ, возможность своевременного обновления и обмена этой информацией.

Выходная картографическая продукция, создаваемая по данным фотограмметрической обработки снимков, представляется в виде моделей — цифровых моделей местности (ЦММ), цифровых моделей рельефа (ЦМР), цифровых моделей ситуации (ЦМС). Как самостоятельный вид выходной продукции создаются тематические информационные слои (приусадебных земель, дорожной сети, почвенных разновидностей и т. п.).

Учебник «Прикладная фотограмметрия» может быть использован при подготовке специалистов смежных направлений: геодезистов, кадастровых инженеров, почвоведов, экологов, мелиораторов и т. д.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Современное представление о фотограмметрии основано на классической постановке задачи — определение формы и размеров объекта по его изображению — и имеет более широкий смысл и значение этого понятия. Это связано с переходом от аналоговой фотограмметрической обработки снимка на цифровую компьютерную технологию. В этой технологии задача фотограмметрии заключается в вычислении по измеренным координатам элементарного элемента изображения координат соответственного участка местности (детали объекта) в какой-либо пространственной системе координат и в заданной проекции. С математической точки зрения — перевычисление координат элемента (точки) из одной системы в другую. При этом математический аппарат, позволяющий выполнить данную процедуру, должен основываться на аналитической связи координат элемента (точки) снимка и местности (объекта). Данная связь определяется прежде всего способом построения изображения, метрическими свойствами снимка, параметрами и условиями его получения при съемке.

Следовательно, применение фотограмметрического метода можно представить в следующей последовательности:

- производство съемки с помощью съёмочной системы, имеющей определенные технические характеристики, формирующей снимок (модель) местности по определенному закону построения изображения. При этом характеристики системы и условия съемки обуславливают также информационные свойства изображения;
- фотограмметрические преобразования с помощью программного обеспечения и набора технологических процедур, учитывающих способ построения и получения снимка;
- создание планово-картографической продукции заданного масштаба, определяемого погрешностью пространственных координат после фотограмметрической обработки снимка.

Представленная последовательность этапов носит технологический характер и показывает их взаимосвязь. Однако, и это имеет первостепенное значение, выбор (расчет) первых двух этапов определяется заданной допустимой погрешностью пространственных координат элементов местности (объектов).

Структурно учебно-методическое пособие сформировано в соответствии с изложенной схемой: производство наземных, аэро- и космических съемок с помощью аналоговых и оптико-электронных

съемочных систем; анализ метрических характеристик получаемых снимков; рассмотрение различных математических аппаратов фотограмметрической обработки снимков, технологии создания планово-картографической основы фотограмметрическим методом.

Глава 1. Аэро- и космические съемочные системы

Цели изучения:

- уметь классифицировать съемочные системы;
- знать основные критерии информационных свойств съемочных систем;
- владеть навыками оптимизации выбора съемочных систем.

1.1. Классификация съемочных систем

Научно-технические достижения в области радиоэлектроники, оптики, телекоммуникации явились основой для конструирования различных съемочных систем. При всем многообразии типов съемочных систем они решают одну задачу — получение снимка в качестве модели местности, обеспечивающей пользователя необходимой и достаточной информацией.

Классифицировать съемочные системы можно по различным критериям. Для пользователей материалами дистанционного зондирования современные съемочные системы разделяют по нескольким основным критериям:

- по типу летательного аппарата с установленной съемочной аппаратурой — на *воздушные* и *космические*;
- по виду регистрируемого излучения — на *пассивные* системы, регистрирующие отраженное солнечное или собственное излучение, и *активные*, фиксирующие отраженное объектом излучение после его облучения радаром или лазером;
- по спектральному диапазону регистрируемого излучения — на работающие в *оптическом диапазоне* и *радиодиапазоне*;
- по числу спектральных зон, в которых производят съемку — на *однозональные* и *многозональные*. Однозональные системы регистрируют излучение в одной, обычно в широкой зоне спектра. При многозональных съемках получают одновременно несколько изображений одной и той же территории в различных зонах спектра электромагнитного излучения;
- по типу сенсора — на *фотографические* и *нефотографические* съемочные системы. В фотографических системах в качестве приемника излучения (сенсора) используют фотографические черно-белые или цветные пленки. Изображения могут быть получены в натуральных или неестественных цветах. В нефотографических системах используют различные типы сенсоров: фотодиоды, термодатчики, приборы с зарядовой связью (ПЗС-матрицы и ПЗС-линейки) и т. п. Результаты съемки, полученные нефотографическими системами, представлены в цифровом формате;

— по способу и срокам доставки видеоинформации — на *оперативные* и *неоперативные*. Фотографические съемочные системы являются неоперативными, так как для доставки экспонированной пленки требуется посадка летательного аппарата. Нефотографические системы относят к оперативным. С их помощью видеоинформация в цифровом виде передается по радиоканалу в режиме реального времени. В случае нахождения летательного аппарата вне зоны радиовидимости видеоинформация предварительно записывается на магнитный носитель, а затем передается по радиоканалу на пункт приема;

— по *способу построения изображения* можно провести несколько классификаций съемочных систем, рассмотренных в § 1.2.

Классификация может быть продолжена исходя из многообразия конструкций и технических характеристик съемочных систем.

1.2. Способы построения изображения

При фотограмметрической обработке аэро- или космического снимка получение заданной точности пространственного положения любого элемента местности определяет соответствие закона математического преобразования изображения закономерностям его построения. При этом необходимо учитывать возможные отклонения закономерностей реального построения снимка от теоретического. Эти отклонения называют деформациями изображения (снимка). При формировании снимка следует выделить следующие параметры съемочной системы.

Форма и размер зоны одномоментного обзора зависят от ряда факторов. Зонай *одномоментного обзора* называют участок поверхности объекта, в пределах которого отраженная энергия, несущая изобразительную информацию, воспринимается съемочным устройством одновременно со всей площади участка.

Представим следующую упрощенную классификацию таких зон (по Б.Н. Родионову).

Точечная. Ее размер $\delta L_x \times \delta L_y$ и форма соответствуют пикселю сенсора.

Линейная. Совокупность пикселей, расположенных в линию, ее размер $L_x \times \delta L_y$, где L_x — длина зоны, δL_y — ширина зоны (или наоборот, $\delta L_x \times L_y$).

Щелевая. Вытянутый четырехугольник размером $\Delta L_x \times L_y$, причем $L_y \gg \Delta L_x$ (или $L_x \gg \Delta L_y$).

Площадная. Четырехугольник значительного размера $L_x \times L_y$.

Конфигурация связи проектирующих лучей, одномоментно строящих изображение, является основным фактором, определяющим вид зоны одномоментного обзора.

При точечной зоне это *один-единственный луч*, при линейной — *веер лучей*, при щелевой форма связи представляет собой *плоский рупор*, при площадной — *широкий рупор* прямоугольного сечения. Геометрической фигурой для описания таких конфигураций служит пирамида.

Форма поверхности, на которой строится изображение (картинная поверхность). По форме картинной поверхности различают системы с *плоской картинной поверхностью* и с *кривой картинной поверхностью*: цилиндрической и сферической.

Характер панорамирования или сканирования — последовательность и временной интервал регистрации сенсором зоны одномоментного обзора. Понятия панорамирования и сканирования условны и нередко подменяются одно другим.

В дальнейшем *панорамированием* будем называть движение системы обзора вдоль маршрута (направления движения летательного аппарата). Это относительно медленное движение.

Сканированием будем называть быстрое движение системы обзора поперек маршрута.

Перечисленные основные параметры съемочных систем, определяющие геометрические особенности построения снимка, могут иметь различные сочетания. Поэтому существует множество вариантов формирования изображения. На рис. 1.1 представлены основные схемы формирования изображения в съемочных системах: ТК — топографическая камера, ШК — шторно-щелевая камера; ПК — панорамная камера, ССК — сканер со строчно-кадровой разверткой, С — сканер с однострочной разверткой, ЩК — щелевая камера.

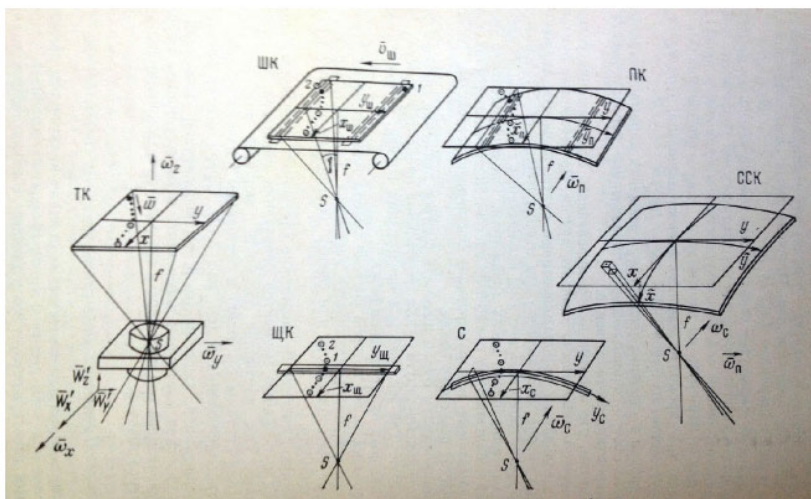


Рис. 1.1. Способы формирования изображения

1.3. Основные критерии съемочных систем

Различные типы съемочных систем создают изображения с неодинаковыми информационными свойствами.

Для оценки информационных возможностей съемочных систем применяют следующие критерии: линейная разрешающая способность, спектральная разрешающая способность, фотограмметрическая точность, фотометрическая точность.

Линейной разрешающей способностью съемочной системы называют ее возможность раздельно воспроизводить на снимке мелкие детали снимаемого объекта. Для фотографических систем разрешающая способность (R) определяется количеством раздельно воспроизводимых черных линий в 1 мм изображения при таком же белом интервале между ними.

Для числа воспроизводимых линий R и ширины линии ρ_c справедлива следующая зависимость:

$$\rho_c = 1/2R. \quad (1.1)$$

Величину ρ_c называют *разрешением на снимке*.

Используя формулу 1.1, можно определить минимальный размер различимого элемента изображения.

Например, если съемочная система имеет разрешающую способность $R = 50 \text{ мм}^{-1}$, то это означает, что в 1 мм изображения может быть зафиксировано 100 черных и белых линий и размер различного элемента изображения будет равен 0,01 мм.

Размер соответствующего элемента на поверхности снимаемого объекта называют *разрешением съемочной системы*.

Разрешающая способность съемочной системы определяется путем съемки *миры*. Мира — специальный тест-объект, представляющий собой основу, на которую нанесен рисунок в виде черных и белых полос. Вместо полос могут быть использованы черные и белые сектора круга. В первом случае миру называют *штриховой*, во втором — *радиальной* (рис. 1.2). Среди штриховых наиболее часто применяется пятишпальная мира. Она представляет собой тридцать решеток, каждая из которых содержит пять светлых полос на черном фоне. Длина полос в десять раз больше их ширины. В каждой последующей решетке ширина полос уменьшается на 0,1.

Съемку миры выполняют в лабораторных условиях или с летательного аппарата. Размер миры должен обеспечивать воспроизведение ее деталей на реальном снимке.

Разрешающая способность съемочных систем, в которых приемниками излучения служат ПЗС-линейки или ПЗС-матрицы (сканеры и цифровые кадровые системы), выражается количеством элементов или линий в одном дюйме изображения — dpi (dots per

inch — точек на дюйм) или lpi (lines per inch — линий на дюйм). Например, 600 или 1200 dpi означает, что минимальный размер элемента изображения соответственно равен 0,04 и 0,02 мм.

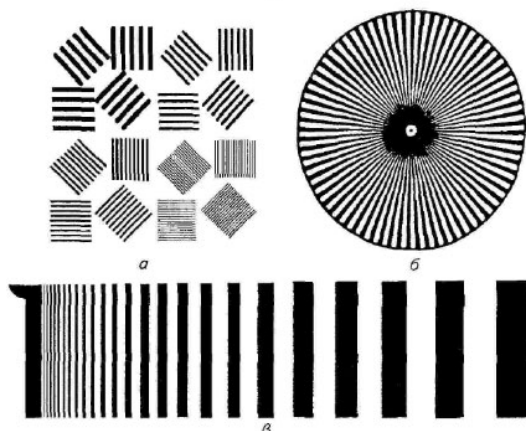


Рис. 1.2. Типы тест-объектов (мир):

а — штриховые; *б* — радиальные; *в* — П-образная мира с изменением частоты штрихов

Под термином *спектральная разрешающая способность* съемочной системы понимают минимальную ширину спектральной зоны, в которой производится съемка. Ширина спектральной зоны определяется возможностью используемого сенсора воспринимать интегральный сигнал (уровень излучения), создаваемый в данной зоне. Для фотографических систем она приблизительно равна 40 — 50 нм, для нефотографических систем — 10 — 20 нм и менее. Современные гиперспектральные съемочные системы регистрируют излучение в зоне шириной 1 — 2 нм.

Фотограмметрическая точность съемочных систем — критерий геометрического искажения получаемого снимка. Степень геометрического искажения определяется позиционной точностью построения оптического изображения и последующей деформацией данного оптического изображения приемником излучения. Существуют топографические и нетопографические съемочные системы. Под топографическими понимаются такие системы, геометрические искажения в которых минимальны и практически не влияют на точность фотограмметрических преобразований. К этому же классу можно отнести съемочные системы, имеющие значительные искажения геометрии построения изображения, но с постоянной и известной моделью деформации. Используя модель деформации, можно учесть геометрические искажения снимка при цифровой фотограмметрической обработке. Для нетопографических

съемочных систем фотограмметрическая точность — неосновной показатель, главным является получение изображения с высокими изобразительными свойствами.

Съемочные системы, обеспечивающие постоянство отношения яркости объекта к величине регистрируемого сигнала от этого объекта по полю изображения, относят к *фотометрическим*. Причинами, снижающими фотометрическую точность, могут быть оптический тракт съемочной системы, нестабильность работы ее электронной цепи, непропорциональность регистрации сигналов сенсором и др. В качестве одного из показателей фотометрической точности может быть использовано отношение сигнал/шум — критерий, определяющий отношение основного сигнала, несущего информацию, к величине сигнала-шума (помехи). Чем больше отношение сигнал/шум, тем выше фотометрическая точность системы.

Рассмотренные критерии можно считать основными и общими при оценке и сравнении различных съемочных систем. Для отдельных типов съемочных систем могут быть определены специфические критерии.

Контрольные вопросы

1. Какие критерии положены в основу классификации съемочных систем?
2. Что означает термин «фотограмметрическая точность» съемочной системы? Можно ли считать точной фотограмметрической системой съемочную систему со значительными, но известными по величине и направлению деформациями?
3. Что можно считать «фотометрическим шумом» в съемочных системах?
4. Каков физический смысл понятий «линейная разрешающая способность» съемочной системы, «разрешение» съемочной системы?

Глава 2. Фотографические съемочные системы

Цели изучения:

- уметь описать основные типы фотографических систем;
- иметь представление об устройстве кадровых топографических аэрофотоаппаратов;
- знать их достоинства и недостатки.

2.1. Общие сведения

Фотографирование земной поверхности началось практически одновременно с открытием фотографии. В настоящее время фотографический способ регистрации электромагнитного излучения — один из основных способов при производстве съемок земной поверхности с воздушных летательных аппаратов. Современные аналоговые фотографические материалы обладают высокими характеристиками, что позволяет им конкурировать с цифровыми сенсорами.

Знание свойств фотографических материалов, закономерностей построения изображения в различных типах фотокамер позволяет оптимизировать процесс аэросъемочных работ, последующую фотограмметрическую обработку и дешифрирование снимков.

Достоинства фотографического способа хранения информации заключаются в том, что:

- изображение представляет собой аналоговую модель снимаемого объекта в виде двумерного распределения функций его яркости (оптической плотности или цвета);
- достаточно строгая пропорциональность оптической плотности (цвета) на снимке яркостям объектов;
- высокая изученность фотографического процесса и возможность управления им;
- стоимость фотоснимков в настоящее время ниже стоимости снимков, полученных нефотографическим способом;
- высокая разрешающая способность получаемых изображений.

Существенными недостатками фотографического способа регистрации электромагнитного излучения можно считать:

- ограничение спектральной зоны съемки в пределах 0,3–1,1 мкм;
- необходимость проведения фотохимической обработки;
- неоперативность доставки получаемой информации;
- зависимость от погодных условий;
- необходимость проведения специальной процедуры преобразования аналогового изображения в цифровое для дальнейшей компьютерной обработки снимков.

2.2. Кадровые топографические аэрофотоаппараты

Фотографические съемочные системы, применяемые для съемки земной поверхности с различных воздушных летательных аппаратов, называют *аэрофотоаппаратами* (АФА). Аэрофотоаппараты можно классифицировать, как уже было рассмотрено, по способу построения снимка, количеству используемых каналов, а также по длине фокусного расстояния объектива, разрешающей способности, назначению и т. д.

Наибольшее применение имеют *кадровые топографические аэрофотоаппараты*. На рис. 2.1 в качестве примера показан внешний вид одного из типов кадровых топографических аэрофотоаппаратов.

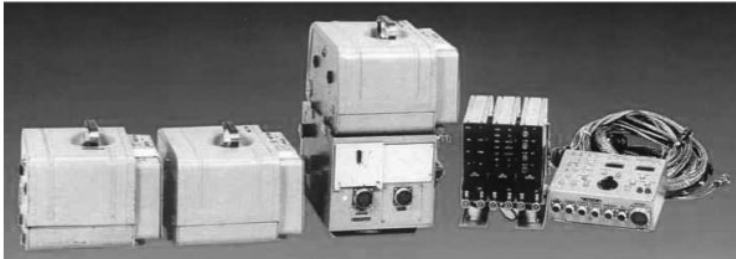


Рис. 2.1. Комплект топографического аэрофотоаппарата ТАФА-20

На рис. 2.2 показана схема построения изображения в кадровых АФА, которую принято считать классической: изображение строится в плоскости неподвижным относительно нее объективом; главная оптическая ось занимает неизменное положение перпендикулярно плоскости снимка; изображение строится по законам центральной проекции. Экспонирование аэрофотоэмульсии по всей площади снимка происходит практически одновременно.

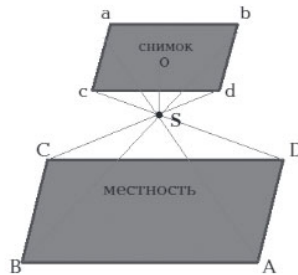


Рис. 2.2. Схема построения изображения в топографических АФА

Основными конструктивными модулями АФА (рис. 2.3) являются съёмочная камера и кассета.

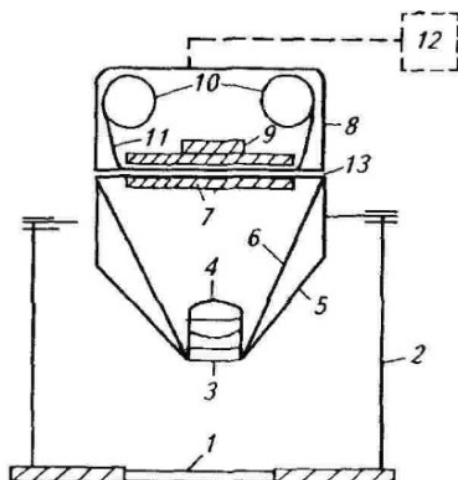


Рис. 2.3. Схема устройства аэрофотоаппарата:

- 1 – стекло люка самолета; 2 – аэрофотоустановка; 3 – светофильтр объектива;
- 4 – объектив; 5 – корпус аэрофотокамеры; 6 – оптический блок АФА;
- 7 – выравнивающее стекло; 8 – приемная и передающая фотокассеты;
- 9 – прижимной стол; 10 – приемная и передающая катушки с аэрофотопленкой;
- 11 – аэрофотопленка; 12 – пульт управления; 13 – прикладная рамка

Съёмочная камера состоит из оптического блока 6 и корпуса 5. В нижней части оптического блока расположен объектив 4 с закрепленным на нем светофильтром 3. В верхней части этого блока в фокальной плоскости аэрофотообъектива располагается прикладная рамка 13. Пленка 11 в АФА располагается в кассете 8 на катушках 10. В плоскости прикладной рамки в момент фотографирования происходит выравнивание аэрофотопленки.

Существуют несколько способов выравнивания аэрофотопленки в плоскость. Например, с помощью прижимного стола 9 аэрофотопленка прижимается к выравнивающему стеклу 7. В некоторых типах АФА выравнивание пленки производится за счет создания воздушного разряжения между пленкой и выравнивающим столом. Невыравнивание аэропленки приводит к геометрическим деформациям и нерезкости изображений, снижает разрешающую способность снимка. Управление работой АФА осуществляется с помощью блока 12. Аэрофотокамера закрепляется в аэрофотоустановке 2 над стеклом 1, герметизирующим люк летательного аппарата. Фотографирование осуществляется через стекло люка.

На серединах сторон прикладной рамки (в некоторых конструкциях также в ее углах) имеются координатные метки, которые фикс-

сируются (впечатываются) при съемке на каждом аэроснимке. Форма меток может быть различной, например, в виде острого угла, направленного к центральной части снимка, или в виде крестов. Прикладная рамка ограничивает размеры снимка. Наиболее широко применяемые форматы 180 × 180 мм, 230 × 230 мм и 300 × 300 мм. Формат кадра может быть не квадратным.

В некоторых типах АФА (АФА-ТЭС) в плоскости прикладной рамки находится выравнивающее стекло, на поверхность которого наносят контрольные метки в виде сетки крестов с шагом 10 мм. Толщина штрихов крестов 2–3 мкм, а точность их нанесения — 2 мкм. Используя сетку крестов, учитывают искажения изображений на снимке.

Расстояния между координатными и контрольными метками (крестами) определяют при фотограмметрической калибровке АФА. Результаты определений заносят в формуляр аэрофотоаппарата. Используют их для выявления и учета деформации аэрофотоплёнки, а также для создания системы координат снимка при фотограмметрической обработке снимков. По резкости изображения контрольных меток (крестов) оценивают качество выравнивания аэроплёнки.

Кассета — съёмная часть аэрокамеры — предназначена для размещения аэроплёнки, ее перемотки и отмеривания по размеру кадра, а также, как уже сказано ранее, выравнивания плёнки в плоскости. Кассета в зависимости от толщины подложки вмещает аэроплёнку длиной 60 или 120 метров, что соответствует для отечественных АФА 300 или 600 снимков размером 180 × 180 мм. Для зарубежных АФА с размером кадра 230 × 230 мм получают 500 снимков.

Аэрофотообъектив представляет собой оптико-механическое устройство, состоящее из оптической и механической части. Оптическая часть (собственно объектив) — это закрепленные в корпусе линзы различной кривизны и формы. Подбор линз выполняется с целью получения оптического изображения с заданными свойствами. Узлы механической части — затвор и диафрагма — размещаются в межлинзовом пространстве аэрофотообъектива.

Затвор — это устройство, регулирующее время (выдержку), в течение которого происходит экспонирование аэроплёнки. Выдержки в аэрофотозатворах изменяются в интервале от 1/40 сек до 1/1000 сек и менее. Изменение выдержек в аэрофотоаппаратах происходит ступенчато (например, 1/125 сек, 1/250 сек, 1/500 сек), что позволяет регулировать экспозицию кратно двум.

В момент открытия затвора АФА летательный аппарат и вместе с ним аэрофотоаппарат совершает линейные и угловые перемещения относительно снимаемой местности. Это вызывает перемещение оптического изображения относительно аэрофотоплёнки. В результате происходит «смаз» фотографического изображения, уменьшающий резкость и разрешающую способность снимка на 30–50%.

Смаз фотографического изображения можно уменьшить путем уменьшения выдержки t при съемке. Для минимизации влияния поступательного движения летательного аппарата выдержку рассчитывают по формуле (2.1):

$$t = m \delta_{\text{гон}} / W, \quad (2.1)$$

где

m — знаменатель масштаба снимка;

$\delta_{\text{гон}}$ — величина допустимого смаза;

W — скорость летательного аппарата.

Однако есть предел уменьшения выдержки. Поэтому в некоторых типах аэрофотоаппаратов применяют устройства, называемые компенсаторами сдвига изображения. Принцип их работы заключается в том, что с помощью специальных устройств в момент экспонирования устраняют перемещение оптического изображения относительно светочувствительного слоя. Помимо сдвигов оптического изображения, вызванных линейными и угловыми движениями летательного аппарата, на качество изображения оказывают влияние вибрационные сдвиги. Основная причина их появления — вибрация от работы моторов летательных аппаратов.

Диафрагма служит для изменения диаметра входного отверстия объектива. В аэрофотоаппаратах диаметр входного отверстия объектива регулирует величину светового потока, проходящего через объектив. Чем больше диаметр диафрагмы, тем больше освещенность экспонируемой аэрофотоплёнки. В практике для выражения размера отверстия объектива используют характеристику, называемую «относительным отверстием». Относительное отверстие объектива $1/k$ есть отношение диаметра входного (действующего) отверстия i к фокусному расстоянию объектива f (2.2):

$$1/k = i/f. \quad (2.2)$$

В объективах используют стандартные дискретные значения относительных отверстий, знаменатели которых равны 2; 2,8; 4; 5,6; 8; 11; 16; 22; 32. Их рассчитывают таким образом, что переход к соседнему индексу диафрагмы изменяет освещенность светочувствительного фотоматериала в два раза. Эти значения отмечаются на вращающемся кольце диафрагм, расположенном на объективе и регулирующем диаметр входного отверстия. С помощью кольца диафрагм можно установить заданную величину относительного отверстия.

Возможность изменения освещенности аэрофотоплёнки (диафрагмой) и выдержки (затвором) с шагом, кратным двум, увеличивает шкалу дискретности экспонирования. Создание более точной экспозиции при фотосъемке позволяет получить изображения с заданными изобразительными свойствами.

Основные характеристики аэрофотообъектива, определяющие метрические и изобразительные свойства снимков — фокусное расстояние, дисторсия, разрешающая способность, угол поля изображения, светораспределение по полю изображения.

Фокусным расстоянием f объектива (главным расстоянием аэрофотоаппарата) называется расстояние от задней узловой точки объектива до главного фокуса. Через главный фокус перпендикулярно оптической оси проходит фокальная плоскость, в которой строится изображение и где располагается аэрофотопленка. Фокусное расстояние определяют при фотограмметрической калибровке АФА с точностью до 0,001 мм и записывают в аттестат аэрофотообъектива. В АФА применяют объективы с фокусными расстояниями от 20–30 мм до нескольких метров. Фокусное расстояние АФА f и высота фотографирования H (расстояние до земной поверхности) определяют масштаб аэрофотографирования:

$$1/m = f/H, \tag{2.3}$$

где

m — знаменатель масштаба фотографирования.

При неизменной высоте фотографирования чем больше фокусное расстояние, тем крупнее масштаб съемки.

Важная характеристика топографических АФА — *дисторсия* объектива. Дисторсия — частный случай аберрации оптической системы, приводит к искажению связки проектирующих лучей, строящих оптическое изображение, т. е. к искажению центральной проекции. Проектирующий луч, исходящий из точки A , проходит через объектив S под углом ω к главной оптической оси SO , но выходит под углом ω' (рис. 2.4). Углы ω и ω' не равны между собой. Вследствие этого точка A изобразится на снимке в точке a' вместо точки a на расстоянии Δr .

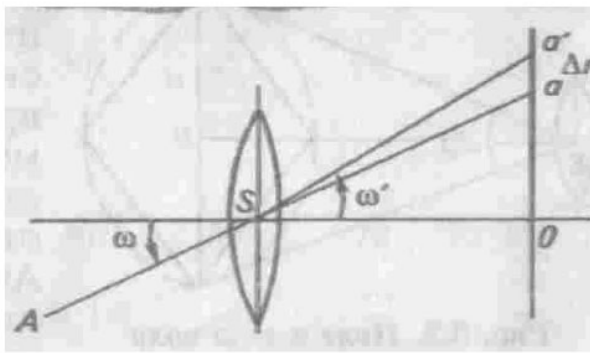


Рис. 2.4. Смещение изображения точки, вызванное влиянием дисторсии объектива

Для различно направленных к объективу проектирующих лучей происходит неравномерное преломление (рис. 2.4). Неравномерность смещения $\Delta\gamma$ точек по полю снимка и приводит к нарушению подобия объекта и его изображения (рис. 2.5).

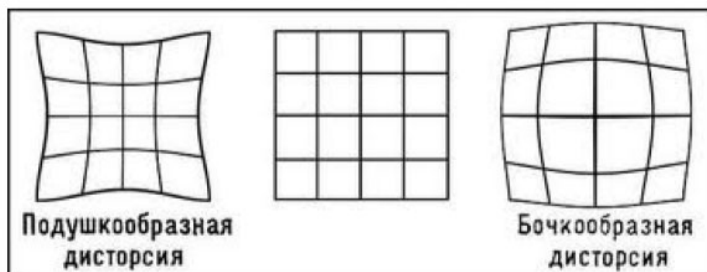


Рис. 2.5. Виды деформации изображения, вызванные влиянием дисторсии объектива

Геометрически дисторсию в какой-либо точке снимка можно представить вектором, определяющим направление и величину смещения изображения данной точки от ее неискаженного положения. Различают радиальную дисторсию, имеющую направление к центру или от центра снимка, и тангенциальную дисторсию, направление которой перпендикулярно радиальному. Дисторсию определяют при фотограмметрической калибровке АФА в дискретных точках по всей площади кадра. Для различных типов объективов ее величина варьируется от 0,002 – 0,005 мм до десятых долей миллиметра. Объективы, в которых дисторсия практически не искажает изображение, называют *ортоскопическими*. В технологиях компьютерной фотограмметрической обработки снимков возможен учет искажений, вызванных дисторсией. В положение точек изображения вводят поправки, равные величинам дисторсии с обратным знаком.

Под *разрешающей способностью* объектива понимают его свойство раздельно воспроизводить оптическое изображение двух близко расположенных точек или линий. При ее определении используют штриховые и радиальные миры, аналогично определению разрешающей способности съёмочных систем. В центре изображения, построенного объективом, разрешающая способность выше, чем на краю. Поэтому при изучении мелких деталей снимаемых объектов предпочтительнее использовать центральные части снимков. В длиннофокусных объективах падение разрешающей способности от центра к краю незначительно. Существуют аэрофотообъективы, у которых разрешающая способность практически не изменяется по полю изображения.

Светораспределение в плоскости снимка — одна из важных характеристик, определяющих фотометрические свойства аэрофотообъектива. Освещенность, создаваемая в фокальной плоскости,

уменьшается от центра к краю. Функция светораспределения описывается, согласно закону Ламберта, формулой

$$E_{\beta} = E_0 (\cos\beta)^n, \quad (2.4)$$

где

E_0 — освещенность в центре поля изображения;

β — угол, образуемый главной оптической осью и направлением на точку;

n — коэффициент, равный 1, 2, 3, 4 в зависимости от типа объектива;

E_{β} — освещенность в точке поля изображения.

Неравномерность светораспределения приводит к тому, что объекты одинаковой яркости при отображении их в центре или на краю снимка имеют различную оптическую плотность (цвет).

Угол, образованный лучами, исходящими из задней узловой точки объектива и опирающимися на диагональ прикладной рамки АФА, называют *углом поля изображения* (рис. 2.6). По величине угла поля изображения аэрофотоаппараты подразделяются на узкоугольные (менее 15°), нормальноугольные ($15 - 60^\circ$), широкоугольные (более 60°).

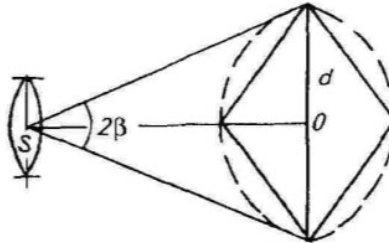


Рис. 2.6. Поле и угол поля изображения

При увеличении угла поля изображения увеличивается неравномерность светораспределения от центра к краю и уменьшается разрешающая способность снимка. В узкоугольных АФА эти изменения выражены в меньшей степени. Для устранения неравномерности светораспределения, которая в широкоугольных аппаратах есть величина значительная, применяют напыление на объектив металлического порошка, плотность слоя которого уменьшается от центра к краю.

Глубина резкости объектива — пространство вдоль оптической оси, в пределах которого все объекты изображаются в фокальной плоскости практически резко. Степень нерезкости определяется диаметром кружка нерезкости δ .

Гиперфокальное расстояние объектива — расстояние до ближайшей точки на главной оптической оси, начиная с которой при

фокусировке на бесконечность, все точки снимаемого пространства изображаются практически резко (с допустимой нерезкостью).

Расстояние до ближайшей границы резко изображаемого пространства определяют по формуле (2.5)

$$D = \frac{f^2}{k\delta}, \quad (2.5)$$

где

f — фокусное расстояние;

k — знаменатель относительного отверстия объектива;

δ — диаметр кружка нерезкости.

Данный параметр позволяет при изменении высоты аэрофотографирования и значительном перепаде рельефа не производить наведение на резкость.

Аэрофотоаппарат помещают в *аэрофотоустановку* (АФУ), предназначенную для его крепления на летательном носителе, ориентирования в заданном положении и уменьшения влияния вибрации. Продольную сторону прикладной рамки АФА ориентируют по направлению полета летательного аппарата, а также устанавливают заданный угол наклона снимка. Данные действия производятся вручную или автоматически. В зависимости от возможных задаваемых углов отклонения оптической оси АФА от отвесного направления различают АФУ плановые — при этом углы отклонения не превышают 3° и перспективные — с углами отклонения до $40-45^\circ$. Для уменьшения влияния продольных и поперечных наклонов летательных аппаратов применяют *гиростабилизирующие аэрофотоустановки*, обеспечивающие горизонтальность плоскости снимка с точностью до $5-7$ мин.

Командный прибор (интервалометр, *англ.*) предназначен для автоматического включения аэрофотоаппарата через определенный промежуток времени. По принципу работы они разделяются на электрические и оптико-электронные. После подачи электрического сигнала с командного прибора выполняется цикл последовательных операций для получения аэрофотоснимков: перемотка пленки, взвод затвора, выравнивание пленки в плоскость, экспонирование (срабатывание затвора). Длительность цикла различна у большинства АФА и находится в интервале $1,2-2,5$ сек.

Управляют работой всего комплекса узлов аэрофотоаппарата с пульта управления. Здесь же осуществляется синхронизация работы АФА и сопровождающей съемку специальной аппаратуры, например, космической навигационной аппаратуры GPS, позволяющей определять на момент съемки пространственное положение снимка.

Топографические аэрофотоаппараты используют для получения снимков, предназначенных для создания топографических, сельскохозяйственных, кадастровых планов и т. п. Применяют отечественные аэрофотоаппараты типа АФА-ТЭ (топографический электрический, с выравниванием пленки вакуумным способом) и АФА-ТЭС (топографический электрический с выравнивающим стеклом в плоскости прикладной рамки), а также зарубежные АФА. В таблице 2.1 приведены характеристики некоторых типов аэрофотоаппаратов.

Таблица 2.1

Характеристики некоторых типов топографических аэрофотоаппаратов

Топографические аэрофотоаппараты								
	АФА-ТЭ	АФА-41	АФА-ТЭС-5М	АФА-ТЭС-7	ФА-ТЭС-10	ЛМК-30	ЛМК-15	РС-30
Фокусное расстояние, мм	70; 100; 140; 200; 500	100; 200	50	70	100	305	152	Сменные объективы 88; 153; 303
Дисторсия, мм	0,03 – 0,01	0,025 – 0,04	0,01	0,01	0,01	0,002	0,003	0,002 – 0,008
Разрешающая способность, лин/мм	25 – 40	45 – 60	55	70	90	65	70	88 мм – 100
центр								153 мм – 105
край	12 – 25	12 – 20	16	25	30	65	70	88 мм – 30 153 мм – 66 303 мм – 77
Относит. отверстие	1:9 – 1:7	1:8 – 1:6,3	1:9	1:6; 1:8	1:6; 1:8	—	—	—
Способ выравнивания пленки	Вакуум	Вакуум	Прижим к стеклу	Прижим к стеклу	Прижим к стеклу	Прижим к стеклу	Прижим к стеклу	Прижим к стеклу
Формат снимка, мм	180 × 180	180 × 180	180 × 180	180 × 180	180 × 180	230 × 230	230 × 230	230 × 230

Новейшие научно-технические достижения в электронике, оптике, фотографии, вычислительной технике позволили разработать и перейти к использованию нового поколения аэрофотосъемочного оборудования.

Отличительными особенностями современного оборудования являются:

- наличие сменных объективов с различными фокусными расстояниями, их быстрая и удобная смена во время съемки;
- сложная оптическая система обеспечивает высокую (более 100 лин/мм) разрешающую способность изображения, практически одинаковую по всему полю кадра;
- остаточная дисторсия — 2–3 мкм;

- наличие большого диапазона выдержек 1/100–1/1000 сек и компенсаторов сдвига изображения, что позволяет производить аэрофотосъемку с малых высот и на больших скоростях летательных аппаратов;
- оптико-электронные командные приборы, управляющие работой камеры в полуавтоматическом режиме;
- наличие стабилизирующих платформ, обеспечивающих получение снимков с углами наклона не более 10 мин;
- автоматическое регулирование экспозиций.

Управляют работой аэрофотоаппарата и съемочным процессом в целом с помощью специального бортового компьютера. Компьютер помещен в крепкий корпус, не содержит движущихся частей (в отличие от обычных твердых дисков), имеется электронная защита, что значительно снижает вероятность его выхода из строя в полете. Программой обеспечиваются следующие функциональные возможности:

- графическое отображение на дисплее маршрута полета и разворотов над фотографируемым участком местности;
- точное открытие затвора в точке пространства с заданными координатами и регистрацией их на краю снимка в системе WGS-84;
- отображение любой исходной информации, необходимой при дальнейшей фотограмметрической обработке: времени суток, даты, точности определения координат центров фотографирования и т. п.

Одним из современных типов аэрофотосъемочного оборудования является разработанный фирмой Leica (Швейцария) топографический аэрофотоаппарат RC-30 (рис. 2.7) с навигационной системой ASCOT (рис. 2.8).



Рис. 2.7. Внешний вид АФА RC-30



Рис. 2.8. Навигационная система ASCOT

Аэрофотосъемочная система RC-30 предназначена для выполнения прецизионной аэрофотосъемки, результаты которой используются в топографии, землеустройстве, межевании и кадастре, лесо-

токсации, инженерных изысканиях, геологии, горных разработках и в других видах аэрофотогеодезических работ.

Рабочий комплект системы RC-30 включает: аэрофотокамеру PTW-30, гиросtabilизирующую платформу PAV-30, три объектива с фокусными расстояниями 88, 153 и 300 мм, визирное устройство (NSF3-E, SF3-E или NF3), вспомогательное оборудование и штатное программное обеспечение.

Аэрофотосъемочная система RC-30 является топографической аэрофотокамерой, получающей изображение местности на упорядоченном массиве плоских снимков в центральной проекции. Полученный массив пригоден для камеральной стереофотограмметрической обработки с целью построения топографических планов и карт, для дешифрирования изображения с целью обновления существующего картографического материала, сельскохозяйственных, экологических, ресурсных обследований, определения степени воздействия на местность и инженерные сооружения природных и техногенных катаклизмов, создание геоинформационных систем и решения других задач.

Аэрофотосъемочная камера установлена на гиросtabilизирующей платформе. Камера снабжена компенсатором сдвига изображения, системой автоматической установки экспозиции.

Максимальное отклонение поверхности прижимной рамки от плоскости 2 мкм.

В комплект аэрофотоаппарата входит GPS-приемник, предназначенный для получения в процессе аэрофотосъемки координат центров проекций (объектива).

Погрешность временного соответствия момента экспонирования моменту определения координат центра фотографирования GPS-приемником составляет ± 50 мкс.

Разрешающая способность объективов в пределах всего поля изображения с фокусным расстоянием:

88 мм — 30 — 100 мм⁻¹;

153 мм — 66 — 105 мм⁻¹;

303 мм — 77 — 118 мм⁻¹.

Фотограмметрическая дисторсия для данных объективов — 8,8, 2,1 и 2,8 мкм соответственно.

Диапазон выдержек затвора — 1/10 — 1/1000 сек. Диапазон диафрагм — 1:4 — 1:22.

Отличительной особенностью аэрофотокамеры RC-30 является способность фиксировать (запоминать в управляющем аэрофотосъемкой компьютере) координаты точек фотографирования, из которых по каким-либо причинам не произошла фотосъемка, например, из-за наличия облаков, закрывающих земную поверхность. После устранения воздействия причины компьютер выводит летательный аппарат в пропущенную точку съемки.

2.3. Деформация изображения в кадровых аэрофотоаппаратах

На геометрические свойства снимка, как было рассмотрено ранее, оказывают влияние различные факторы: особенности съемочной системы, условия проведения съемки, фотохимическая обработка. Под их воздействием формируется *реальный* снимок. *Идеальный* снимок — это снимок, полученный по заданному закону геометрического построения изображения. Получение идеального снимка возможно при отсутствии искажающего влияния физических факторов. В кадровых аэрофотоаппаратах в основе получения изображения лежит центральное проектирование. В идеальной центральной проекции точка изображения, центр проекции и точка местности находятся на одной прямой. Это положение называют *условием коллинеарности проектирующих лучей*. При выполнении аэро- и космических съемок под воздействием перечисленных физических факторов положение точек снимка изменяется — нарушается условие коллинеарности. При фотограмметрической обработке снимков координаты точек местности вычисляют после измерений координат их изображений на снимке. Если не учитывать искажения положений точек на снимке, то геодезические (географические) координаты могут быть определены с погрешностями, превышающими допустимые. Поэтому при фотограмметрической обработке необходимо знать величину и направление искажения положения точек на реальном снимке. В данном параграфе сделано обобщение влияния уже рассмотренных ранее факторов, вызывающих нарушение условия коллинеарности.

Воздействие физических факторов на геометрические искажения снимка имеет систематический или случайный характер. Систематические искажения могут быть определены с заданной точностью и учтены при фотограмметрической обработке снимков, например, деформация изображения, обусловленная влиянием дисторсии объектива. Искажения случайного характера учитывать сложнее, поэтому в процессе получения изображения создаются условия проведения съемок, при которых минимизируется их влияние.

Рассмотрим основные факторы, нарушающие идеальную центральную проекцию и вызывающие различные формы и виды геометрических искажений снимка, в последовательности прохождения луча, отраженного от объекта съемки, до фотографической пленки (сенсора). В этот же ряд факторов включим и деформацию фотопленки, возникающую в процессе ее фотохимической обработки и сушки. Большая часть из указанных факторов имеет систематический характер, что позволяет их определить и учесть.

Искажения случайного характера не могут быть исключены полностью.

Факторы, вызывающие нарушение условия коллинеарности проектирующих лучей, проявляют свое действие, как правило, совместно. Исключить или уменьшить их влияние можно путем выбора соответственных съемочных средств и условий проведения съемок, или учитывая их при фотограмметрической обработке снимков.

Учет перечисленных факторов и построение единой математической модели — одна из главных задач при фотограмметрической обработке снимков.

Воздействие каждого фактора изучено достаточно полно. Предлагаются различные виды аналитических моделей для введения поправок в измеренные координаты точек реальных снимков, т. е. для перехода к координатам точек идеальных снимков. Цифровые (компьютерные) методы фотограмметрической обработки снимков позволяют вводить поправки в измеренные координаты каждой точки изображения и, таким образом, переходить к так называемым плоским координатам точек идеального снимка.

Влияние кривизны Земли. Кривизна Земли влияет на геометрию построения снимка — вызывает отклонение в положении изображения точки местности. При решении некоторых фотограмметрических задач земную поверхность принимают за горизонтальную плоскость E , проходящую через точку N (рис. 2.9) основания отвесного луча SN , равно высоте съемки. Более точное представление о земной поверхности дает сферическая поверхность.

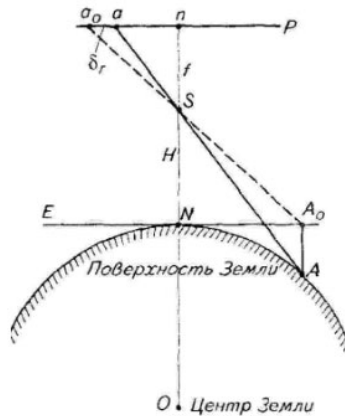


Рис. 2.9. Влияние кривизны поверхности Земли на смещение точек снимка

Рассмотрим влияние кривизны Земли. Точка A (рис. 2.9) принадлежит земной поверхности, A_0 — ее ортогональная проекция на горизонтальную плоскость E . На снимке P точкам A и A_0 соответствуют точки a и a_0 . Отрезок aa_0 — смещение δ_r точки на снимке, вызванное влиянием кривизны Земли. Величину смещения δ_r определяют по формуле

$$\delta_r = \frac{H r^3}{2R f^2}, \quad (2.6)$$

где

H — высота съемки;

r — расстояние от точки надира n до изображения a точки местности на снимке P ;

R — радиус Земли;

f — фокусное расстояние объектива съёмочной камеры.

Смещение точки снимка, вызванное кривизной Земли, направлено к точке n и приводит к уменьшению радиуса-вектора r .

При съемках в крупном масштабе камерой с фокусным расстоянием $f = 200$ мм смещение точки будет порядка 0,004 мм, что не повлияет на точность определения фотограмметрическим методом координат точки местности.

Смещение точки, вызванное кривизной Земли, частично компенсируется влиянием рефракции атмосферы.

Влияние рефракции световых лучей в атмосфере

В идеальной центральной проекции предполагается построение изображения прямолинейными проектирующими лучами. В действительности происходит искривление светового луча, т. к. он распространяется в среде (атмосфере) с непрерывно изменяющейся плотностью. Это явление называется атмосферной рефракцией.

Объясняется это тем, что в атмосфере происходит уменьшение плотности воздуха с увеличением высоты относительно земной поверхности. При прохождении светового луча из области с большей плотностью в область с меньшей плотностью происходит его преломление. Если атмосферу описать моделью, состоящей из нескольких горизонтальных слоев с изменяющейся плотностью воздуха, то явление рефракции можно представить на рис. 2.10.

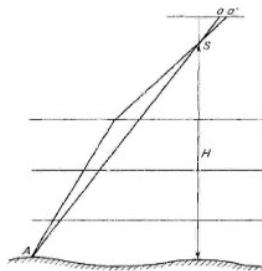


Рис. 2.10. Влияние вертикальной (фотограмметрической) рефракции атмосферы на деформацию изображения

Asa — прямолинейный проектирующий луч, распространяющийся в среде с одинаковой плотностью, неискаженный влиянием атмосферной рефракции, Asa' — реальный луч, строящий изображение точки A местности в точке a' на снимке. Расстояние aa' на снимке есть искажение положения точки, вызванное влиянием атмосферной рефракции. Искажения, вызванные атмосферной рефракцией, достигают 13 мкм, в зависимости от толщины слоя атмосферы (высоты фотографирования H).

Атмосферная рефракция происходит в горизонтальной и вертикальной плоскостях. При выполнении аэро- или космических съемок горизонтальная атмосферная рефракция значительно меньше вертикальной, и ее не учитывают.

Вертикальную рефракцию атмосферы рассчитывают для стандартного состояния атмосферы, зенитного расстояния луча (Z), угла, под которым луч проходит атмосферу, длины волны излучения, давления и т. п.

Вертикальная (или фотограмметрическая) рефракция λ — это угол с вершиной в точке фотографирования S между прямолинейным проектирующим лучом и касательной к искривленному проектирующему лучу в точке S .

Смещение точки снимка, вызванное рефракцией, находится в вертикальной плоскости, проходящей через S и точку местности A , и приводит к увеличению радиус-вектора $r = pa'$.

Поправки в положение точек горизонтального снимка за влияние атмосферной рефракции рассчитываются по формулам (2.7) и вводят по направлению к точке надира.

$$\begin{aligned} \Delta r &= -\left(f + \frac{r^2}{f}\right)\lambda, \\ \Delta x &= -\frac{x}{r}\left(f + \frac{r^2}{f}\right)\lambda, \\ \Delta y &= -\frac{y}{r}\left(f + \frac{r^2}{f}\right)\lambda, \end{aligned} \tag{2.7}$$

где

$$\Delta r = aa';$$

Δx — поправка в координату x точки снимка;

Δy — поправка в координату y точки снимка;

λ — вертикальная рефракция.

Существует достаточно большое количество формул для вычисления угла λ . Например, проф. Н.Д. Ильинский предложил формулу (2.8)

$$\lambda = 0,3 \text{Hmr}[1 - 0,035(3\text{H}_0 - \text{H})]10^{-11} \text{ рад}, \tag{2.8}$$

где

H — высота фотографирования (в км) над средней секущей плоскостью местности;

H_0 — высота точки над уровнем моря (в км);

r — расстояние от точки надира до точки снимка (в мм);

m — знаменатель масштаба снимка.

Так, при $f = 150$ мм $\rightarrow H = 3$ км; $m = 20\,000$; $H_0 = 0,2$ км; $r = 70$ мм $\lambda = 2,8''$.

Вычисления по различным формулам поправок в координаты точек снимка дают результаты, различающиеся на 1–2 мкм.

В таблице 2.2 приведены поправки Δr_k за кривизну Земли и Δr_r за атмосферную рефракцию (в мкм) и их суммарные значения для различных H, f, r ($R = 6370$ км; $H_0 = 0,2$ км). Значение рефракции λ'' получено по формуле (2.8).

Таблица 2.2

Поправки Δr_k за кривизну Земли и Δr_r за атмосферную рефракцию (в мкм)

f , мм	r , мм	Высота фотографирования							
		$H = 3$ км				$H = 5$ км			
		λ''	Δr_k	Δr_r	$\Delta r_k + \Delta r_r$	λ''	Δr_k	Δr_r	$\Delta r_k + \Delta r_r$
88	100	6,8	30,4	-6,6	23,8	20,2	55,7	-19,7	36,0
153	100	3,9	10,0	-4,1	5,9	11,6	16,7	-12,2	4,5
303	100	2,0	2,6	-3,2	-0,6	5,9	4,2	-9,6	-5,4

Рефракция атмосферы оказывает влияние при производстве аэро- и космических съемок. При их организации и проведении учитывают рефракцию атмосферы с целью повышения метрического качества получаемых снимков.

Рефракции в защитном стекле фотолюка. Защитным стеклом фотолюка называют однородную плоскопараллельную стеклянную пластину, изолирующую отсек (или салон летательного аппарата), где установлен аэрофотоаппарат, от внешней среды. В результате разности температур и давления воздуха на внешней и внутренней поверхности стекла люка защитное стекло прогибается, возникает его кривизна и клиновидность. Происходит отклонение луча, что вызывает дефокусировку аэрофотокамеры и деформирует изображение. При расчетах их допустимых значений учитывают разности температур между внешней средой и внутри летательного аппарата, коэффициент преломления стекла фотолюка и т. п. Рефракция имеет величину порядка 3–5 мкм, а дефокусировка — нескольких десятых долей микрометра.

Рефракция в светофильтре. Светофильтр — оптическое устройство (среда), служит для изменения спектрального состава

проходящего через него светового потока. Его действие основано на различных оптических явлениях: поглощении, отражении, интерференции. При аэрофотосъемке в качестве светофильтров обычно используют окрашенные в различные цвета стеклянные пластины со спектрально-избирательным поглощением. Оптические свойства светофильтра описываются спектрофотометрической кривой, выражающей зависимость спектрального коэффициента пропускания от длины волны.

Основные характеристики аэрофотосъёмочных светофильтров — эффективный коэффициент пропускания и кратность светофильтра. *Эффективный коэффициент пропускания* светофильтра есть отношение светового потока, прошедшего через светофильтр и воспринятого сенсором аэрофотоаппарата, к суммарному световому потоку, падающему на светофильтр.

Кратность светофильтра — коэффициент, показывающий во сколько раз уменьшится светочувствительность сенсора (аэрофотоплёнки) при использовании светофильтра по сравнению со светочувствительностью этого сенсора к данному излучению без светофильтра.

Кратность светофильтра показывает, во сколько раз необходимо увеличить выдержку при съёмке со светофильтром для получения того же фотографического эффекта, что и при съёмке без светофильтра.

Рефракция светофильтра вызвана непараллельностью его сторон, в зависимости от качества изготовления она может достигать нескольких микрометров.

Дисторсия объектива аэрофотоаппарата. В современных топографических АФА дисторсия равна 2—3 мкм, в нетопографических аппаратах может достигать десятых долей миллиметра. Основные положения, связанные с дисторсией, рассмотрены ранее.

Фотографический смаз изображения. В течение того времени, когда открыт затвор аэрофотоаппарата, последний совершает совместно с летательным аппаратом линейные и угловые перемещения в пространстве относительно фотографируемой местности. Это вызывает линейные и угловые перемещения оптического изображения относительно фотоплёнки, что создает на аэрофотоснимке сдвиг изображения. После фотохимической обработки экспонированной аэрофотоплёнки возникает фотографический смаз изображения на снимке, который приводит к уменьшению резкости и разрешающей способности аэрофотоснимка.

Линейные перемещения точек изображения возникают:

- вследствие поступательного движения летательного аппарата по направлению полета;

- в результате смещения летательного аппарата в направлении, перпендикулярном линии маршрута;

– при изменении высоты полета.

Угловые перемещения оптического изображения обусловлены поперечным (креном) и продольным (тангажом) наклонами, а также разворотом (рысканьем) летательного аппарата.

Вибрация летательного аппарата также приводит к смазу фотографического изображения.

Снижение влияния названных факторов осуществляется уменьшением выдержки при съемке. Сдвиг оптического изображения, вызванный поступательным движением летательного аппарата, устраняют:

- посредством перемещения аэрофотоплёнки («продергивание») со скоростью, равной скорости движения оптического изображения;
- вращая объектив АФА, вызывая обратное движение оптического изображения.

Смаз допускается, в зависимости от метода фотограмметрической обработки снимков, в пределах 0,02 – 0,05 мм.

Отклонение поверхности аэрофотоплёнки от фокальной плоскости АФА определяется величиной зазора между светочувствительным слоем и плоскостью прикладной рамки и составляет 5 – 30 мкм.

Остаточная погрешность выравнивания плёнки в плоскость. Для уменьшения геометрических искажений и повышения резкости изображения в АФА фотоплёнка перед экспонированием выравнивается в плоскость. Погрешность выравнивания зависит: от способа выравнивания плёнки (механический или вакуумный), клиновидности, толщины и величины прогиба выравнивающего стекла. В центральной части кадра невыравнивание плёнки вызывает смещение изображения порядка 2 – 2,5 мкм, на краю снимка может достигать 150 мкм.

Неравномерность толщины фотоэмульсионного слоя аэрофотоплёнки. При изготовлении фотоплёнки фотоэмульсию (светочувствительный слой) наносят на основу (подложку) способом полива. Поэтому толщина фотоэмульсионного слоя в пределах снимка неодинакова. Для аэрофотоплёнок на триацетатной основе изменение толщины фотоэмульсионного слоя не превышает 2 мкм на 10 мм, частные изменения достигают 6 – 7 мкм. Смещение точки изображения, вызываемое различием толщины фотослоя в центральной части снимка, — порядка 2 мкм, на краю снимка может достигать величины 20 мкм, а для широкоугольных АФА и более.

Деформация фотоплёнки (подложки), вызванная сушкой после фотохимической обработки и хранением снимков, составляет 15 – 20 мкм.

Деформация — критерий подложки, определяющий позиционную точность изображения на снимке. Деформация может быть плоскостной, которая определяется по двум взаимно перпендику-

лярным направлениям в плоскости снимка и в вертикальном направлении вследствие непостоянства толщины аэрофотопленки (изменение толщины порядка 4 – 8 мкм). Плоскостную деформацию разделяют на равномерную и неравномерную. Исследования деформаций различных типов аэрофотопленок позволяют сделать следующие выводы:

- наибольшая равномерная деформация наблюдается у пленок на триацетатной основе в пределах 0,06 – 0,25%, что при формате снимка 180 × 180 мм приводит к изменению длины линии на 0,1 – 0,5 мм; равномерная деформация может изменяться для различных кадров в одном аэрофильме до двух крат; при нагревании (что может произойти при вводе снимка в компьютер при помощи сканера) величина деформации может изменяться до 1,5 крат; для лавсановых основ равномерная деформация в два раз меньше, чем для триацетатных;

- неравномерная деформация (неодинаковая в различных направлениях) для обоих типов основ составляет в среднем 0,01 – 0,02%, что соответствует на краю снимка 7 – 14 мкм;

- локальная, или местная, деформация для аэрофотопленок на триацетатной основе достигает величины 6 мкм, для лавсановой подложки — 4 мкм; при цифровом методе фотограмметрической обработки снимков деформацию учитывают с помощью сетки контрольных меток (крестов), впечатываемых в каждый снимок при съемке, построением локальной модели деформации или общей на весь снимок. Деформацию учитывают с погрешностью 2 – 3 мкм.

Для учета деформации всего снимка часто используют координатные метки. В этом случае создают модель деформации, используя различные аналитические зависимости.

При равномерной деформации применяют масштабное преобразование с использованием расстояний между координатными метками:

$$x' = k_x x; \quad y' = k_y y,$$

где

x', y' — преобразованные плоские координаты точки снимка;

k_x, k_y — масштабные коэффициенты, определяемые по формулам

$k_x = \frac{xx_{\text{практ}}}{xx_{\text{теор}}}; k_y = \frac{yy_{\text{практ}}}{yy_{\text{теор}}}$ ($xx_{\text{практ}}, yy_{\text{практ}}$ — расстояния между координатными метками на снимке; $xx_{\text{теор}}, yy_{\text{теор}}$ — расстояния между координатными метками в прикладной рамке АФА);

x, y — измеренные координаты на снимке.

При неравномерной деформации используют конформное линейное преобразование:

$$\begin{aligned} x' &= a_0 + a_1 x + b_1 y, \\ y' &= b_0 + b_1 x + a_1 y; \end{aligned} \tag{2.9}$$

аффинное линейное преобразование:

$$\begin{aligned} x' &= a_0 + a_1x + a_2y, \\ y' &= b_0 + b_1x + b_2y. \end{aligned} \quad (2.10)$$

Приведенные линейные зависимости при расположении контрольных точек по периферии снимка обеспечивают учет деформации с точностью 15–20 мкм при точности измерения координат точек на снимке 2–3 мкм.

Проективно-аффинное преобразование описывается формулами

$$\begin{aligned} x' &= -f_k \frac{a_1(x-x_0) + a_2(y-y_0) - a_3f_x}{c_1(x-x_0) + a_2(y-y_0) - c_3f_x}, \\ y' &= -f_k \frac{b_1(x-x_0) + b_2(y-y_0) - b_3f_y}{c_1(x-x_0) + a_2(y-y_0) - c_3f_y}, \end{aligned} \quad (2.11)$$

где

x, y — измеренные координаты точки на снимке;

x_0, y_0 — координаты главной точки снимка O в системе координат измерительного прибора;

a_i, b_i, c_i — коэффициенты, описывающие проективную связь между измеренными и исправленными координатами точки снимка;

f_k — фокусное расстояние АФА;

f_x — псевдофокусное расстояние АФА, учитывающее масштаб по оси x ;

f_y — псевдофокусное расстояние АФА, учитывающее масштаб по оси y .

2.4. Нетопографические аэрофотоаппараты

Целевые аэрофотоаппараты. Как уже отмечалось, существенный недостаток снимков, получаемых кадровыми аэрофотоаппаратами, — фотографический смаз изображения, вызванный главным образом поступательным движением летательного аппарата. Скорость перемещения оптического изображения относительно аэрофотоплёнки

$$V_{из} = Wf/H = W/m, \quad (2.12)$$

где

W — скорость летательного аппарата, f — фокусное расстояние АФА, H — высота фотографирования, m — знаменатель масштаба аэрофото-съемки.

Как видно из формулы, при равных съёмочных масштабах скорость перемещения оптического изображения относительно аэро-

фотопленки и, следовательно, фотографический смаз зависят от скорости летательного аппарата. Чем больше его скорость, тем больше смаз фотографического изображения. Для устранения влияния поступательного движения летательного аппарата на смаз и увеличения разрешающей способности изображения используют щелевые аэрофотоаппараты.

В щелевых **АФА (ЩАФА)** изображение местности (рис. 2.11) получают в результате непрерывного экспонирования пленки 3. Пленка движется по направлению движения оптического изображения со скоростью $V_{пл} = V_{из}$. Таким образом, скорость движения оптического изображения относительно пленки равна нулю. Синхронное движение аэрофотопленки и оптического изображения исключает фотографический смаз изображения, вызванный поступательным перемещением летательного аппарата. Изображение строится объективом 2 и щелью 4, расположенной перед светочувствительным слоем пленки перпендикулярно направлению полета. Экспонирование происходит через постоянно открытую щель, ширина которой прямо пропорционально зависит от интенсивности освещения.

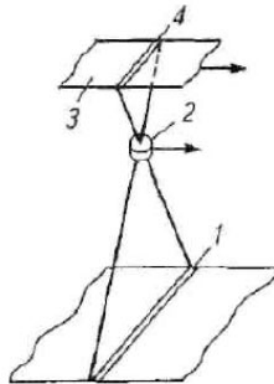


Рис. 2.11. Схема построения изображения в щелевом аэрофотоаппарате:

1 — зона захвата; 2 — объектив; 3 — фотопленка; 4 — проектирующая щель

В результате съемки получают не отдельные кадры, а сплошную ленту фотографического изображения. При этом изображение строится по двум законам: в поперечном направлении снимок представляет собой центральную проекцию, в продольном (по оси полета) — ортогональную проекцию. Изображение, построенное одновременно по двум законам, требует особой фотограмметрической обработки, отличающейся от обработки снимков, полученных топографическими кадрowymi системами. Внедрение компьютерных технологий позволяет достаточно точно выполнять фотограмметрическую обработку изображений, полученных ЩАФА.

По ряду причин возникает рассогласование скоростей движения пленки и оптического изображения. Две главные причины рассогласования — рельеф местности и угол наклона щели. Рассогласование скоростей движения пленки и оптического изображения приводит к аффинным искажениям (преобразованиям) изображения. Под *аффинным преобразованием* понимают геометрическое преобразование плоскости изображения (или пространства), которое можно получить, комбинируя движение в направлениях координатных осей. Преобразования могут иметь неодинаковые значения по различным осям.

Применительно к получению снимков аффинность может быть выражена зависимостями:

$$\begin{aligned}x' &= a_0 + a_1x + a_2y, \\y' &= b_0 + b_1x + b_2y,\end{aligned}$$

где

x, y — искаженные координаты на исходном снимке;

x', y' — исправленные координаты на преобразованном снимке.

Аффинность характеризуется понятием *масштаб времени*.

$\left(\frac{1}{m_t}\right)$ — отношение времени $t_{o,из}$ прохождения определенного от-

резка l_x точкой оптического изображения к времени $t_{на}$ прохождения того же отрезка пленкой.

$$\frac{1}{m_t} = \frac{t_{o,из}}{t_{на}}. \quad (2.13)$$

При щелевой съемке масштаб времени равен коэффициенту аффинности.

Панорамные аэрофотоаппараты (ПАФА). Эти аппараты разработаны исходя из следующих соображений. Для увеличения зоны захвата съемочной системой необходимо использовать широкоугольный объектив. Однако, как уже отмечалось, увеличение угла поля изображения приводит к падению освещенности и к уменьшению разрешающей способности от центра к краю снимка. В конструкции панорамного АФА (рис. 2.12) используется свободный от этих недостатков узкоугольный объектив. Объектив 2 вращается вокруг оси, проходящей через его заднюю узловую точку параллельно оси маршрута, и просматривает (панорамирует) полосу местности в пределах угла $140 - 180^\circ$. Этот способ панорамирования называют прямым. Косвенное панорамирование осуществляют вращением призм или зеркал, установленных перед объективом. Изображение строится полосой 4 на пленке 3, расположенной на цилиндрической поверхности.

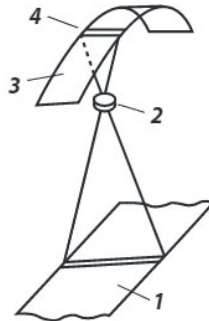


Рис. 2.12. Схема построения изображения в панорамном аэрофотоаппарате:

1 – полоса захвата на местности; 2 – узкоугольный объектив; 3 – фотопленка; 4 – полоса на изображении

Получаемый в ПАФА кадр представляет собой вытянутый прямоугольник. Особенности панорамных снимков:

- высокие изобразительные свойства по всей площади снимка, обусловленные свойствами применяемого узкоугольного объектива (высокая разрешающая способность и меньшая аберрация);

- ширина полосы захвата на местности в десять и более раз превышает высоту фотогафрирования;

- разномасштабность по полю снимка от центра к краю увеличивается в несколько раз из-за изменения соотношения длин проецирующих лучей;

- наличие значительных геометрических теней («мертвых» зон, возникающих на краях снимка за высотными объектам зданиями, сооружениями, горами и т. п.).

Панорамные снимки из-за механических перемещений частей ПАФА в момент экспонирования имеют значительные геометрические искажения. Поэтому чаще их используют для получения семантической информации. Применение цифровых технологий фотограмметрической обработки позволяет применять панорамные снимки в картографических целях.

Панорамные съемочные системы, разрабатываемые в настоящее время, включают конструктивные и технические решения, основанные на достижениях в области оптики, электроники и компьютерной техники. Рассмотрим на примере оптико-электронного аэросъемочного фотограмметрического комплекса А3 EDGEVisionMap (Израиль) технические особенности современного панорамного аэрофотоаппарата (рис. 2.13).



Рис. 2.13. Общий вид панорамной аэрокамеры А3 EDGE

Основные технические параметры камеры АЗ EDGE (табл. 2.3):

Объектив камеры с фокусным расстоянием 300 мм.

Угол захвата — 109°.

Спектральные зоны, используемые при съемке, — RGB и ближняя ИК-зона.

Размер пикселя — 7,4 мкм.

Размер матрицы — 4864 × 3232 пикс.

Применяется электронный затвор, встроенный в ПЗС.

Наземное разрешение снимка зависит от высоты полета носителя и варьирует от 2,5 до 25 см.

Стандартные высоты съемки: 1000 м; 1600 м; 3300 м; 5000 м; 6700 м; 8400 м; 10 000 м. Скорость самолета 220 — 900 км/ч.

Камера работает с гиростабилизатором.

Применяется стабилизация во время вращения объективов камеры.

Угол отклонения главного луча от нормали при перспективной съемке — 55°.

Производительность аэрофотосъемки — до 11 000 км² в зависимости от высоты полета и скорости самолета.

Таблица 2.3

Технические характеристики аэрокамеры АЗ EDGE

Модель	АЗ EDGE
Вес, кг	42
Размеры, см	50 × 60 × 60
Фокусное расстояние, мм	300
Цвет	RGB or RGB + NIR
Глубина цвета, бит	12
Компенсация сдвига изображения	Forward, Roll, Vibration (FMC, RMC, VC)
Макс. угол поля зрения, °	110
Плановая съемка	Да
Перспективная съемка	Да
Размеры пикселя, мкм	7,4
Размер матрицы ПЗС, пикс.	4864 × 3232
Макс. размер снимка, пикс.	78 000 × 9600
Макс. объем снимка, Мпикс.	718
Время работы бортовой памяти при постоянном фотографировании, час	6–7
Температура, °С	–15 ... +55°

Камера имеет два объектива, позволяющих панорамировать местность перпендикулярно направлению полета. Каждым объективом в аппарате создается полоса изображения, состоящая из 32 отдельных элементов панорамы. Таким образом, за одно панорамирование создается 64 малоформатных снимка. На рис. 2.14 и 2.15 представлены различные способы проведения аэрофотосъемки.



Рис. 2.14. Схема панорамирования при съемке аэрокамерой АЗ EDGE



Рис. 2.15. Схема боковой перспективной съемки аэрокамерой АЗ EDGE

Автоматическое планирование, производство аэрофотосъемки, ортофототрансформирование квазиснимков и создание ортофотопланов осуществляют входящим в комплект программным обеспечением.

С помощью специализированной компьютерной программы создают квазиснимок — объединяют все элементы панорамы (рис. 2.16). Созданные снимки подлежат фотограмметрической обработке с целью создания ортофотопланов или иной картографической продукции.



Рис. 2.16. Фрагмент квазиснимка, полученного камерой АЗ EDGE

2.5. Кадровые оптико-электронные аэрофотокамеры

Оптико-электронные съемочные системы (ОЭСС) получили широкое применение при использовании технологий компьютерной фотограмметрической обработки снимков. Использование в ОЭСС в качестве приемника излучения (сенсора) прибора с зарядовой связью (ПЗС, или ССД — англ. аббревиатура) расширяет класс съемочных систем, имеющих на выходе цифровое изображение.

Принцип работы прибора с зарядовой связью заключается в следующем. Светочувствительный слой представляет собой сетку кремниевых фотодиодов, расположенную за оптической системой. Каждый кремниевый фотодиод соединен с ячейкой хранения заряда. При воздействии на фотодиод светового потока в виде оптического изображения генерируется некоторое количество электрического заряда пропорционально падающему потоку. Заряд переносится в ячейку хранения заряда (ячейку памяти). Из ячеек памяти информация последовательно считывается и преобразуется в цифровой код (цифровое изображение).

При использовании в качестве сенсора ПЗС-матрицы снимок формируется аналогично закону построения в кадровых топографических аэрофотоаппаратах.

Линейное разрешение ОЭСС зависит от размера элементов (фотодиодов), составляющих ПЗС-матрицу. Их количество в современных цифровых съемочных системах достигает 80 млн элементов и более, что обеспечивает разрешающую способность, близкую к фотографической. Использование ПЗС-матриц в качестве сенсора при создании формата снимка 18×18 см, 23×23 см ограничено технологической возможностью изготовления матриц большого размера. Обычно сенсор кадровых ОЭСС состоит из 4, 9 или более ПЗС-матриц. Каждая матрица служит для фиксирования изображения. Изображение, сформированное каждой ПЗС-матрицей, перекрывается соседними. С помощью программных средств, используя перекрывающиеся части снимков малого формата, формируют квазиснимок большего размера, для которого рассчитывают фокусное расстояние.

Например, черно-белый сенсор аэрокамеры UltraCam-D фирмы Vexcel (Австрия) состоит из 9 матриц, имеет размер изображения 11500×7500 пикс., при этом размер пикселя равен 9 мкм; разрешение на местности при высоте съемки 500 м (300 м) — 5 см и 3 см соответственно; фокусное расстояние сменных объективов 75 мм, 100 мм, 125 мм; производительность — 1 снимок в секунду; объем записанной информации более 1,5 терабайт при количестве снимков 2775; съемка может производиться в четырех спектральных каналах — R, G, B (красном, зеленом, синем) и NIR (ближнем инфракрасном).

Аэрокамера DMC фирмы Z/I имеет сенсор, состоящий из четырех матриц с общим количеством пикселей $13\,500 \times 8000$, фокусное расстояние 40 – 120 мм.

DMC II 140 имеет монолитный широкоформатный ПЗС-сенсор с матрицей размером $12,2k \times 11,4k$ пикселей, разработанный для Z/I Imaging компанией DALSA. Дизайн камеры DMC II 140 является развитием проверенной временем технологии системы DMC и имеет специализированную оптику, разработанную Carl Zeiss (Германия). Использование одноматричного модуля панхроматической камеры позволяет решить основную задачу разработок и развития цифровых аэросъемочных камер — обеспечения большого охвата местности с помощью однообъективной системы. При этом сохраняется конструктивный принцип топографических АФА — построение изображения по закону центральной проекции, который является базовым для всех пленочных камер в течение десятилетий. Благодаря исключению влияния потенциальных источников геометрических ошибок повышается точность определения геодезических координат элементов местности. Этот подход позволяет получать изображения для решения задач по картографированию и ДЗЗ.

Для крупномасштабного картографирования наиболее важным является процесс получения снимков за наиболее короткий промежуток времени (минимальные значения выдержки). Например, камера UltraCam-X позволяет собирать цифровую информацию с высокой скоростью 3 Гб/сек. Благодаря этому UltraCam-X позволяет получать изображения с 70 %-ным продольным перекрытием (с разрешением 3 см/пикс.) и 80 %-ным продольным перекрытием (с разрешением 5 см/пикс.) на применяемых стандартных скоростях выполнения аэрофотосъемки. Данная технология дает ряд преимуществ: позволяет снимать городскую территорию с минимальным влиянием атмосферных эффектов, исключает пропуски при создании цифровой модели рельефа (ЦМР), при создании ортофотопланов используют центральные части аэрофотоснимков.

UltraCamLp благодаря новым электронным компонентам камеры обладает рядом преимуществ:

- обеспечивает большую площадь захвата местности, результат — 43 %-е увеличение объема изображений при том же числе кадров;
- получение данных на более высокой скорости полета;
- увеличение продольного перекрытия при заданных значениях скорости;
- получение данных с более высоким разрешением.

UltraCamLp обеспечивает высокую геометрическую точность, широкий динамический диапазон, возможность стереообработки. Получаемые изображения пригодны для создания цифровых моделей местности (ЦММ), фототриангуляции, создания ортофотоизображений и трехмерного технического векторного картографирования.

Microsoft UltraCam Osprey — единая фотограмметрическая система, состоящая из двух камер плановой и перспективной съемки. Как и остальные камеры серии UltraCam, Microsoft UltraCam Osprey гарантирует получение снимков субпиксельной точности широкого динамического диапазона, при этом все основные системные компоненты, включая систему геопозиционирования и систему управления полетом, интегрированы в сенсор камеры. Система поддерживается программным обеспечением UltraMAP. Камера UltraCam Osprey сконструирована таким образом, что целиком использует поле зрения камеры плановой съемки (11 674 пикселя) с перекрытием по наклонным снимкам, что дает возможность получать текстурированные цифровые модели местности. UltraCam Osprey — съемочная система для картографирования и создания трехмерных моделей городских и застроенных территорий. При надирном положении главного оптического луча съемку выполняют в панхроматическом, RGB и инфракрасном спектральных интервалах. Перспективные снимки получают при наклоне главного оптического луча вперед и назад относительно положения летательного аппарата.

Цифровые метрические камеры отличаются друг от друга не только по конструкции, но и по принципу действия. Различие обусловлено применяемыми сенсорами, регистрирующими изображение снимаемой местности. Указанные различия влияют на геометрические свойства формируемых ими изображений. Матричные считывающие устройства позволяют получать цифровые изображения, идентичные кадровым снимкам, то есть полученный цифровой снимок является изображением в центральной проекции (рис. 2.17).



Рис. 2.17. Изображение, полученное ОЭСС



Z/I Imaging (DMC)



Leica (DSW700)



VEXCEL (UltraCam-X)



DIMAC SYSTEMS (DIMAC)



Jena-Optronik (JAS150)



DSS 539



DMC II 140 Z/I



UltraCam-X



UltraCamLp



UltraCam Osprey

Также они отличаются постоянством элементов внутреннего ориентирования (значения фокусного расстояния и координат главной точки снимка). Наиболее известными являются камеры (рис. 2.18): UltraCam-X, DSS (ApplanixCorp., Канада), RCD 100 (Leica Geosystems, Швейцария), DMC (Z/I Imaging, США), DIMAC Systems (Люксембург), Rollei AIC (Trimble Navigation, США). Основные параметры крупноформатных камер представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4

Основные параметры крупноформатных аэрофотокамер

Аэрофотокамера	DMC, Intergraph (многомодульный)	DiMAC SYSTEMS	DSS 539 appanlix	DMCII 140 Z/I	UltraCamX Microsoft (Vexcel)	UltraCamLp Microsoft (Vexcel)	UltraCam Osprey Microsoft (Vexcel)
Тип по числу снимков, получаемых одновременно	Кадровый	Кадровый (модульный)	Кадровый	Кадровый	Кадровый (модульный)	Кадровый (модульный)	Кадровый (модульный)
Размер кадра, пикс.	7680 x 13 824	от 4080 × 5440 до 8080 × 10800 в зависимости от количества модулей	5412 × 7216	12240 × 11 418 (PAN); 6846 × 6096 (зональный)	14430 × 9420 (PAN) 4992 × 3328 (зональный), эквивалент 15 × 23 см	11704 × 7920 (PAN) 5320 × 3600 (зональный)	11674 × 7514 (PAN) 6870 × 4520 (зональный)
Фокусное расстояние, мм	120/25	на заказ	60	92 (PAN), 45 (зонал.)	100; 33	70 (PAN); 33 (зональный и NIR)	51 (PAN) 80 (наклонных объективов)
Минимальный интервал съемки, сек	от 2,1	2		1 кадр в 2 сек	1 кадр в 1,35 сек	1 кадр в 2,5 сек	1 кадр в 2 сек
Компенсация «смаза»	есть	есть	есть	есть TDI	есть	есть	есть
Накопление изображений	—	—	5000	2000	2500	2500	(3160 снимков в одном модуле)
Сенсор	CCD-матрица	CCD-матрица в каждом модуле	CCD-матрица	CCD-матрица	13 CCD-массивов (9 PAN; 4 зонал.)	CCD	CCD
Размер пикселя, мкм	—	—	—	7,2	7,2	6,0	6,0

Применение специальных цифровых камер, предполагаемых для фотограмметрических целей, в массовом использовании затруд-

нительно в связи с высокой рыночной ценой. Поэтому во многих случаях (например, при съемке с беспилотных летательных аппаратов) целесообразнее использовать более дешевые серийно выпускаемые цифровые любительские камеры среднего формата и профессиональные фотокамеры (рис. 2.19).



Рис. 2.19. Среднеформатные цифровые камеры

При использовании этих камер необходимо проведение процедуры их фотограмметрической калибровки, в результате которой определяются элементы внутреннего ориентирования и параметры фотограмметрической дисторсии объектива.

Цифровые камеры среднего формата — современные цифровые оптические приборы с высокоточной оптикой и сенсорами.

В данном типе камер установлены высокоскоростные ПЗС-матрицы с базовой памятью, играющей роль кэш-памяти. Снимок записывается в нее, а затем в фоновом режиме переписывается на карту памяти, одновременно освобождая ПЗС-матрицу. Наиболее известными являются камеры: DSS (Applanix Corp., Канада), Rollei AIC (Trimble Navigation, США), Hasselblad (H2) и др. Основные параметры среднеформатных цифровых фотокамер представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5

Основные параметры среднеформатных цифровых фотокамер

Марка	Модель	Разрешение, пикс.	Размер пикселя, мкм	Размер датчика, мм
Rolleiflex	Rolleiflex HY6	6668 × 4992	9 × 9	48 × 36
Phase one	Phase one 645AF	8984 × 6732	—	53 × 40
Mamiya	Mamiya DM22	5356 × 4056	22	48 × 36
	Mamiya DM28	6144 × 4622	28	44 × 33
Kodak	Kodak Probak 645	4080 × 4080	9	36 × 36

Контрольные вопросы

1. Достоинства и недостатки фотографического способа регистрации информации.
2. Перечислите основные характеристики аэрофотообъективов.
3. Составьте принципиальную схему конструкции АФА.
4. Каковы принципы построения изображения в кадровых, щелевых и панорамных аэрофотоаппаратах?
5. Что означают понятия «оптический сдвиг изображения» и «фотографический смаз изображения»?
6. Как влияет дисторсия объектива на геометрические свойства изображения?
7. Перечислите основные факторы, приводящие к деформации изображений, полученных кадровыми АФА.

Тесты

1. Что такое фотограмметрическая рефракция атмосферы?
 - а) преломление отраженного от объекта луча в вертикальной плоскости при выполнении АКС;
 - б) преломление отраженного от объекта луча в горизонтальной плоскости при выполнении АКС;
 - в) искажение координаты положения точки на снимке.
2. Что такое линейная разрешающая способность съемочной системы?
 - а) способность разделять на снимке мелкие детали снимаемого объекта;
 - б) мера искажения прямолинейности прохождения проектирующего луча;
 - в) количество спектральных зон, используемых при регистрации отраженного излучения в съемочной системе.
3. Что такое гиперфокальное расстояние объектива?
 - а) диаметр относительного отверстия объектива;
 - б) расстояние наилучшей резкости изображения;
 - в) расстояние вдоль оптической оси объектива, с которого начинается резкое изображение пространства при наведении на бесконечность.
4. Что такое глубина резкости объектива?
 - а) диаметр действующего отверстия объектива;
 - б) расстояние вдоль оптической оси, равное фокусному расстоянию;
 - в) пространство вдоль оптической оси, все точки которого практически резко отображаются в фокальной плоскости.

5. Чем вызван оптический сдвиг изображения?
- а) невыполнением главного условия оптики;
 - б) различием атмосферного давления внутри съёмочной камеры;
 - в) линейными и угловыми перемещениями съёмочной камеры.
6. Для каких целей служит затвор в фотоаппарате?
- а) для перемотки фотопленки;
 - б) для регулирования времени освещения фотоматериала;
 - в) для изменения глубины резкости объектива.
7. Зачем на выравнивающее стекло АФА наносится сетка крестов?
- а) для определения размера снимка;
 - б) для учета деформаций изображения;
 - в) для учета изменений оптической плотности в пределах снимка.
8. В каком спектральном интервале производится аналоговая фотографическая съёмка?
- а) в спектральной зоне съёмки менее 0,3 мкм;
 - б) в пределах 0,3 – 1,3 мкм;
 - в) в пределах более 1,3 мкм.
9. Что такое аэрофотоустановка?
- а) устройство для определения оптимальной экспозиции при аэрофотосъёмке;
 - б) прибор для определения положения аэрофотоаппарата в пространстве;
 - в) устройство для крепления АФА на летательном аппарате, для ориентирования в заданном положении и уменьшения влияния вибрации.
10. Для чего предназначен командный прибор АФА?
- а) для определения экспозиции;
 - б) для устранения вибрации АФА;
 - в) для автоматического включения АФА через определенный интервал времени.
11. Что такое относительное отверстие объектива?
- а) диаметр входного отверстия объектива;
 - б) минимальный диаметр входного отверстия объектива;
 - в) отношение действующего отверстия объектива к фокусному расстоянию.
12. Что такое идеальный снимок?
- а) снимок, полученный при идеальных погодных условиях;
 - б) снимок, полученный при реальных условиях съёмки;
 - в) снимок, полученный по заданному закону геометрического построения изображения.

Глава 3. Основные сведения по линейной перспективе

3.1. Центральная проекция

Построение изображения объекта на плоскости (или какой-либо иной поверхности) по определенному закону называется *проецированием*, а полученное изображение — *проекцией*.

Существуют различные виды проецирования. В геодезии, например, при топографической съемке с последующим построением плана локального участка местности все точки проецируют на горизонтальную плоскость отвесными линиями. Такой способ проецирования называют *ортогональным*, а полученную проекцию — *ортогональной*.

Если точки пространства (местности) проецируют на плоскость (или поверхность) лучами, проходящими через одну точку, называемую *центром проекции*, то такой вид проецирования называют *центральной*. Лучи, строящие изображение, называют *проектирующими лучами*. Следы пересечения этих лучей с избранной поверхностью создают фигуру, называемую *центральной проекцией* и построенную по законам центрального проецирования. Множество проектирующих лучей, проходящих через центр проекции, образуют *связку* проектирующих лучей.

Способ проецирования объекта на одну плоскость из одного центра проекции прямолинейными проектирующими лучами называют *линейной перспективой*.

Аэрофотоснимки, полученные топографическими аэрофотоаппаратами, в геометрическом смысле представляют собой центральную проекцию, центром которой служит задняя узловая точка объектива. Для построения плана местности с помощью аэрофотоснимка необходимо понимание его геометрических свойств, определяемых в значительной степени законами линейной перспективы.

В центральной проекции точка всегда изображается точкой, отрезок прямой — отрезком, в частном случае — точкой (когда отрезок лежит на проектирующем луче), пространственные (объемные) объекты изображаются плоскими фигурами.

3.2. Основные элементы центральной проекции

Рассмотрим основные плоскости, линии и точки, являющиеся элементами центральной проекции и используемые в центральном проецировании, а также при анализе геометрических свойств аэрофотоснимков (рис. 3.1).

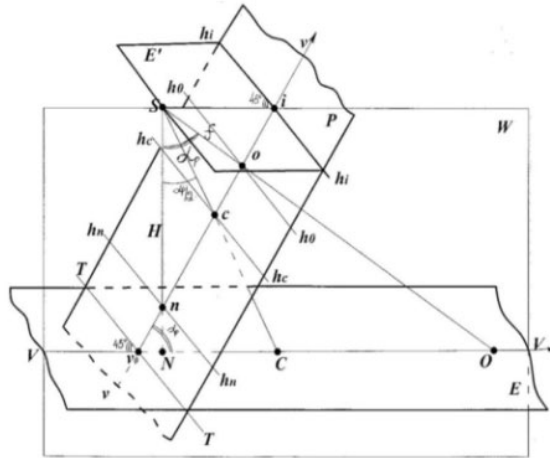


Рис. 3.1. Основные элементы центральной проекции

S — центр проекции.

E — предметная плоскость (соответствует горизонтальной плоской местности).

P — позитивная картинная плоскость, расположенная между центром проекции S и предметной плоскостью E , соответствует позитивному изображению аэрофотоснимка (контактного или увеличенного).

E' — плоскость действительного горизонта, проходящая через центр проекции S параллельно предметной плоскости E .

P' — негативная картинная плоскость (центр проекции S расположен между предметной плоскостью E и картинной плоскостью P') соответствует негативному изображению аэрофотоснимка, параллельна плоскости P . Плоскости P и P' находятся на равном расстоянии f от центра проекции S .

Законы построения перспектив элементов, располагающихся в предметной плоскости, одинаковы для плоскостей P и P' . Следует заметить, что перспективы, построенные в картинной плоскости P , соответствуют позитивному аэрофотоснимку (позитиву), а построенные в картинной плоскости P' соответствуют негативному изображению (негативу). При дальнейших построениях будем использовать позитивную картинную плоскость.

W — плоскость главного вертикала — проходит через центр проекции S и перпендикулярна трем плоскостям P (или P'), E и E' . Линию пересечения плоскости W с картинной плоскостью P называют главной вертикалью V_0i .

V_0V — проекция главной вертикали V_0i на предметную плоскость E .
 TT — основание картины (картинной плоскости) — линия пересечения картинной плоскости P с предметной плоскостью E .

$h_i h_i$ — линия действительного горизонта — линия пересечения картинной плоскости P с плоскостью действительного горизонта E' .

SO — главный луч центральной проекции — перпендикулярен картинной плоскости P , находится в плоскости главного вертикала W и соответствует оптической оси аэрофотоаппарата.

o — главная точка картинной плоскости — пересечение главного луча SO с картинной плоскостью P (соответствует главной точке аэрофотоснимка).

So — главное расстояние — расстояние от центра проекции до главной точки картины (соответствует фокусному расстоянию аэрофотоаппарата f).

SN — высота центра проекции S над предметной плоскостью — длина перпендикуляра, опущенного из центра проекции S на предметную плоскость и расположенного в плоскости главного вертикала W (соответствует высоте аэрофотосъемки).

α — угол наклона картинной плоскости P образован плоскостями E и P , равен углу отклонения главного луча центральной проекции SO от перпендикуляра SN , опущенного из центра проекции S на плоскость E (соответствует углу наклона аэрофотоснимка).

i — главная точка схода — точка пересечения главной вертикали V_0i и линии действительного горизонта $h_i h_i$.

n — точка надгиря — точка пересечения отвесного луча SN с картинной плоскостью P (расположена на главной вертикали V_0i).

N — проекция точки надгиря на предметную плоскость E — пересечение отвесного луча SN с плоскостью E .

c — точка нулевых искажений — точка пересечения биссектрисы угла $oSn = \alpha$ с картинной плоскостью P (расположена на главной вертикали V_0i).

Точки o , c , n имеют теоретическое и практическое значение при анализе геометрических свойств аэрофотоснимка. Как следует из рис. 3.1, расстояния между точками o , c , n , i определяются следующими зависимостями:

$$on = ftg\alpha, oc = ftg(\alpha/2), oi = fctg\alpha.$$

Контрольные задания по теме «Линейная перспектива»

Построение пространственного чертежа центральной проекции.
 Исходные данные для построения пространственного чертежа центральной проекции:

$$SN = 70 \text{ мм};$$

$$S_o = f = 30 \text{ мм};$$

$$\alpha = 60^\circ;$$

$$h_i h_i = TT = 80 \text{ мм};$$

$$V_o V = 90 \text{ мм}.$$

Для удобства визуального восприятия элементы центральной проекции следует вычерчивать различными цветами:

- черным цветом выделить предметную плоскость E и все элементы, ей принадлежащие;
- красным цветом выделить картинную плоскость P и все элементы, ей принадлежащие;
- синим цветом выделить плоскость действительного горизонта и все элементы, ей принадлежащие;
- зеленым цветом показать проектирующие лучи, исходящие из центра проекции S .

Линии $h_i h_i$ и TT как пересечения соответственно плоскостей E' и P , P и E выделить синим или красным цветом, красным или черным цветом.

При построении плоскости E и P , E' и P должны быть развернуты относительно друг друга на угол $VV_o T = 135^\circ$ (45°).

Последовательность построения пространственного чертежа центральной проекции:

- построение выполняется на листе бумаги формата А4;
- провести линию $V_o V = 90$ мм таким образом, чтобы будущий чертеж находился в центральной части листа (учесть размеры $h_i h_i$, TT , SN). На прямой $V_o V$ выбрать точку V_o ;
- из точки V_o построить луч $V_o i$ под углом $\alpha = 60^\circ$ к прямой $V_o V$;
- получить точку i — главную точку схода. Для этого построить горизонтальную прямую, параллельную прямой $V_o V$ и удаленную от нее на расстояние $SN = 70$ мм. В пересечении построенной прямой с лучом $V_o i$ находится искомая точка i ;
- определить положение точки S . Для этого вычислить расстояние Si и отложить его от точки i . Как следует из чертежа (рис.3.1)

$$S_i = f / \sin \alpha;$$

– построить плоскости E , P и E' . Для этого через точки V_o , i провести параллельные линии под углом 135° относительно $V_o V$ и S_i , отложить на построенных прямых симметрично точкам V_o , i расстояния по 20 мм. Определяются углы искомых плоскостей. Соединив углы соответственных плоскостей, построить пространственный чертеж центральной проекции. Обозначить основные элементы центральной проекции.

Данный чертеж будет использоваться при решении задач на построение перспектив различных геометрических фигур (рекомендуется для решения каждой задачи использовать отдельный чертеж).

— определить положение следа сечения в плоскости действительного горизонта E' . Для этого из центра проекции S провести линию в плоскости E' параллельно следу сечения Ak_1 до линии действительного горизонта h_1h_1 (на основании известной теоремы — если две параллельные плоскости пересекаются третьей плоскостью, то следы пересечения также параллельны). На линии h_1h_1 получим точку i_1 ;

— определить положение следа сечения в картинной плоскости P , соединив точки k_1 и i_1 . Это построение возможно на основании несложного доказательства. Точка k_1 находится на линии TT , то есть принадлежит двум плоскостям E и P . Точка i_1 находится на линии h_1h_1 , то есть принадлежит двум плоскостям E' и P . Таким образом, точки k_1 и i_1 расположены в плоскости P , что позволяет их соединить, образуя след сечения в плоскости P ;

— определить положение перспективы точки A в картинной плоскости P . Из центра проекции S провести проектирующий луч SA . В пересечении с картинной плоскостью (со следом сечения k_1i_1) находится перспектива точки a .

Положение точки a неизменно при различных положениях проектирующей плоскости Q и, как следствие, различных направлениях следов сечения в плоскостях E, P, E' .

Задание 2. Построение перспектив отрезков, расположенных в предметной плоскости

При построении перспектив отрезков, расположенных в предметной плоскости, могут возникнуть два случая. Первый вариант — отрезок принадлежит прямой, пересекающей линию TT , второй вариант — отрезок расположен параллельно линии TT .

В первом варианте построение перспективы горизонтального отрезка происходит следующим образом:

— провести проектирующие плоскости Q_1 и Q_2 , проходящие через центр проекции S и отрезки AB и DC соответственно (рис. 3.3). Через отрезок, расположенный в предметной плоскости, и точку S можно провести единственную проектирующую плоскость;

— провести следы сечения проектирующих плоскостей с предметной плоскостью — прямые AB и DC — до пересечения с основанием картины TT в точках k_1 и k_2 соответственно;

— определить положение следов сечения проектирующих плоскостей Q_1 и Q_2 с плоскостью действительного горизонта E' . Для этого из центра проекции S провести линии в плоскости E' параллельно следам сечения ABk_1 и DCk_2 до линии действительного горизонта h_1h_1 .

На линии h_1h_1 получим две точки i_1 и i_2 ;

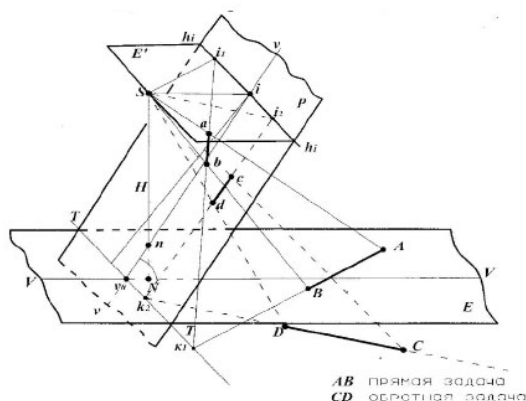


Рис. 3.3. Построение перспективы отрезков, расположенных в предметной плоскости и пересекающихся в своем продолжении основание картины TT

— определить положение следов сечения проектирующих плоскостей Q_1 и Q_2 с картинной плоскостью P , соединив точки k_1 и i_1 (k_2 и i_2) по аналогии с первой задачей;

— определить положение перспектив отрезков AB и DC в картинной плоскости P . Из центра проекции S провести два проектирующих луча SA и SB . В пересечении с картинной плоскостью (со следом сечения k_1i_1) получится перспектива ab отрезка AB . Подобным образом построить перспективу dc отрезка DC .

Во втором варианте применение одной проектирующей плоскости невозможно. Поэтому перспективу отрезка, параллельного линии TT , следует строить поточечно. Для двух точек (концов отрезка) выполнить построения их перспектив по алгоритму, описанному в первой задаче «Построение перспективы точки». В частном случае при использовании двух проектирующих плоскостей, пересекающих плоскость действительного горизонта по линии Si , следы их пересечения с предметной плоскостью E будут перпендикулярны основанию картины TT (рис. 3.4).

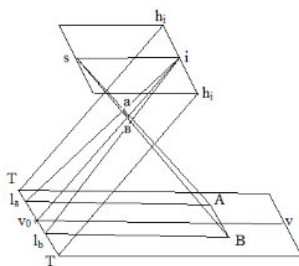


Рис. 3.4. Построение перспективы отрезка, расположенного в предметной плоскости параллельно основанию картины TT

Основные выводы из решения данной задачи:

- перспективы прямых, перпендикулярных линии TT , пересекаются в главной точке схода i ;
- перспективы прямых, параллельных оси перспективы TT , также параллельны TT .

Задание 3. Построение перспективы вертикального отрезка

Дано: вертикальный отрезок AB , его основание B принадлежит предметной плоскости E (рис. 3.5). Требуется построить перспективу вертикального отрезка в картинной плоскости.

Алгоритм построения практически аналогичен применяемому в предыдущих задачах:

- провести проектирующую плоскость Q , проходящую через центр проекции S и вертикальный отрезок AB (рис. 3.5). Плоскость Q вертикальна, поскольку содержит вертикальный отрезок AB , следовательно, она содержит вертикальный отрезок SN (высоту центра проекции) и точку надира n ;
- далее находим следы сечения проектирующей плоскости Q с предметной и картинной плоскостями.

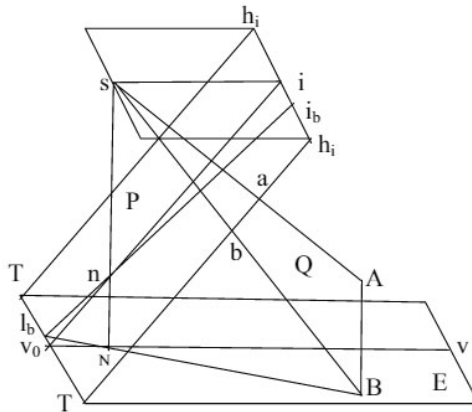


Рис. 3.5. Построение перспективы вертикального отрезка

След сечения проектирующей плоскости Q с предметной плоскостью E пройдет через основание вертикального отрезка B и проекцию точки надира N , на линии TT получаем точку пересечения I_b ; след сечения проектирующей плоскости Q с картинной плоскостью P пройдет через точку пересечения I_b и точку надира n поскольку обе эти точки принадлежат и проектирующей, и картинной плоскостям. Эти построения выполняются при любом расположении вертикального отрезка:

– провести два проектирующих луча SA и SB из центра проекции S на основание и вершину вертикального отрезка AB .

В картинной плоскости пересечения проектирующих лучей и следа сечения $l_b i_b$ определяется положение проекции ab вертикального отрезка AB .

Выводы из решения данной задачи:

- точкой схода перспектив вертикальных прямых является точка надира $л$;
- проекция основания вертикального отрезка расположена ближе к точке надира, проекция вершины — дальше по направлению от точки надира;
- проекцией вертикальной прямой, совпадающей с надирным лучом, является точка надира $л$.

Задание 4. Построение перспективы сетки квадратов на элюре растяжения

Термин «элюр» происходит от французского слова *epure* — «улучшенный» и означает в данном контексте чертеж более удобный, чем пространственный. Элюр растяжения возникает, если угол наклона картинной плоскости $\alpha = 180^\circ$. При этом три плоскости E, P, E' расположены в одной плоскости (рис. 3.6), а размер элемента S_l на элюре равен соответствующему элементу в плоскости E' на пространственном чертеже.

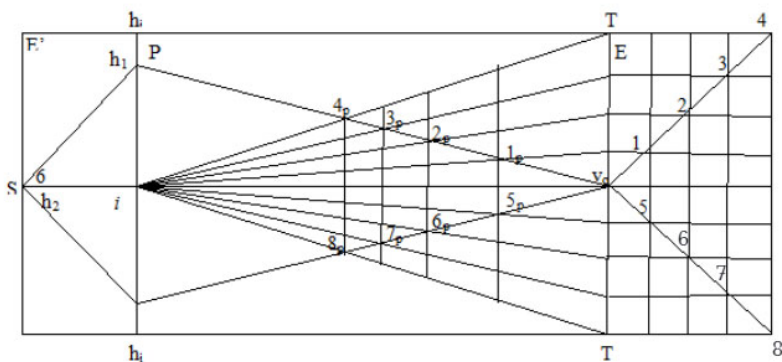


Рис. 3.6. Построение перспективы сетки квадратов

Сетка квадратов расположена в предметной плоскости так, что одна из сторон сетки совпадает с осью перспективы $ТТ$, а другая — с проекцией главной вертикали. Таким образом, стороны сетки квадратов параллельны или перпендикулярны оси перспективы $ТТ$.

Цель построения перспективы сетки квадратов — изучение закономерности изменения масштаба, формы и размеров перспективного изображения.

Существуют различные способы построения перспективы сетки. Рассмотрим один из них, используя сведения, полученные из предыдущих построений:

- перспективы прямых, расположенных в предметной плоскости параллельно оси TT , также ей параллельны;
- перспективы прямых, расположенных в предметной плоскости перпендикулярно оси TT , пересекаются в главной точке схода i ;
- если отрезки, расположенные в предметной плоскости, пересекаются, то их перспективы также пересекаются.

Последовательность построения

1. Провести диагонали через углы сетки квадратов V_o-4 и V_o-8 . Диагонали пересекают ось перспективы TT , поэтому возможно применить методику построения перспективы отрезка (задача 2).

Провести виртуально две проектирующие плоскости Q_1 и Q_2 . Следы сечения в предметной плоскости совпадут с направлениями диагоналей V_o4 и V_o8 . Следы сечения Sh_1 и Sh_2 в плоскости E' параллельны соответственным следам сечения V_o4 и V_o8 .

Соединить точки схода h_1 и h_2 с точкой V_o и определить положение следов сечения в картинной плоскости, на которых расположены перспективы углов сетки квадратов V_o-4 и V_o-8 .

2. Определить положение перспектив сторон сетки квадратов, перпендикулярных оси TT . Для этого необходимо соединить точки пересечения данных сторон на оси TT с главной точкой схода i .
3. Отметить на чертеже пересечение соответственных перспектив 1_p-8_p . Данные точки есть перспективы точек $1-8$, расположенных на плоскости E .
4. Найти положение перспектив сторон сетки квадратов, параллельных оси TT . Для этого соединить точки 1_p и $5_{p'}$, 2_p и $6_{p'}$, 3_p и $7_{p'}$, 4_p и $8_{p'}$.

В результате построений получена перспектива сетки квадратов — каждому квадрату сетки в предметной плоскости определено положение его перспективы.

Выводы:

- формы и размеры перспектив квадратов изменяются и зависят от положения на картинной плоскости;
- масштаб в картинной плоскости — величина переменная: на оси TT масштаб равен 1:1, по направлению к главной точке схода i

масштаб стремится к нулю (знаменатель масштаба стремится к бесконечности);

– линии 1_p и 5_p , 2_p и 6_p , 3_p и 7_p , 4_p и 8_p , параллельные TT , называются *фотограмметрическими горизонталями*. На каждой из них масштаб постояен, но при переходе на другую фотограмметрическую горизонталь масштаб изменяется;

– равенство углов в предметной и картинной плоскостях не сохраняется.

Контрольные вопросы

1. Докажите способом графических построений на пространственном чертеже, что независимо от выбора направления проектирующей плоскости положение перспективы точки в картинной плоскости остается неизменным.
2. Постройте перспективу вертикального отрезка, направленного вниз.
3. Определите на пространственном чертеже положение точки в предметной плоскости по ее перспективе (решение обратной задачи).
4. Определите на эюре растяжения положение отрезка в предметной плоскости по его перспективе (решение обратной задачи).
5. Почему точку i называют главной точкой схода? Докажите данное определение способом графических построений.

Глава 4. Геометрические свойства снимка, полученного топографическим аэрофотоаппаратом

4.1. Масштаб горизонтального снимка равнинной местности

Как уже отмечалось, построение изображения при аэрофотографировании происходит по законам центральной проекции. При этом, как правило, главный луч объектива имеет отклонение от отвесного положения на некоторый угол, называемый *углом наклона снимка*. Фотографируемая местность представляет собой поверхность с различными превышениями. Рассмотрим случай, когда угол наклона снимка равен нулю, а местность представляет собой горизонтальную плоскость (рис. 4.1).

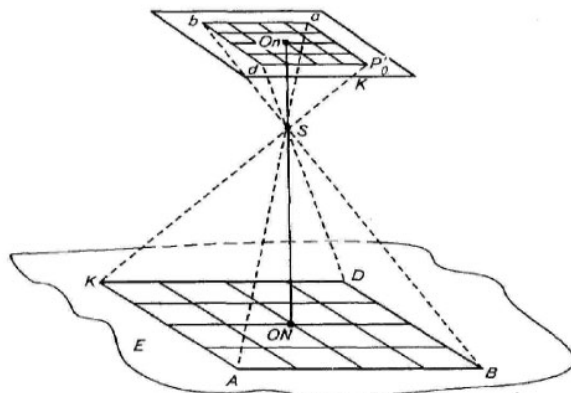


Рис. 4.1. Масштаб горизонтального снимка равнинной местности

На нем изображен горизонтальный снимок P_0 равнинной местности, полученный из центра проекции S . Проектирующие лучи SA и SB строят изображения точек местности A и B соответственно в точках a и b . Треугольники ΔSAB и ΔSab подобны по трем углам. В подобных треугольниках соответственные элементы также подобны, а отношение длин соответственных линейных элементов — величина постоянная. Например, отношение соответственных сторон ab и AB треугольников ΔSab и ΔSAB равно отношению их высот f и H .

$$ab/AB = f/H,$$

но отношение длины линии на изображении к длине соответствующей линии на местности является линейным масштабом изображения. То есть

$$ab/AB = 1/m,$$

значит,

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{H}. \quad (4.1)$$

Масштаб горизонтального снимка равнинной местности величина постоянная, равная отношению фокусного расстояния съёмочной камеры к высоте фотографирования.

4.2. Смещение точек наклонного снимка

Угол наклона снимка вызывает смещение его точек. Рассмотрим горизонтальный P_0 и наклонный P снимки, полученные из одного центра проекции S (рис. 4.2). Точки A и B местности изобразились на горизонтальном и наклонном снимках в точках a_0, b_0 и a, b соответственно. Совместим изображения снимков P_0 и P , развернув наклонный снимок на угол α вокруг их общей прямой $h_c h_c'$. Как видно из рис. 4.2, точки a_0, b_0 горизонтального снимка и соответствующие точки a', b' наклонного снимка не совпали.

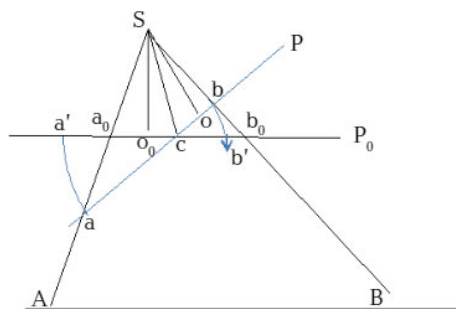


Рис. 4.2. Смещение точек наклонного снимка

Расстояния между точками $a'a_0$ и $b'b_0$ называют смещением точек за угол наклона и обозначают δ_α . Смещение точки за угол наклона рассчитывают по формуле (4.2).

$$\delta_\alpha = a'a_0 = \frac{r_c^2 \cos \varphi \sin \alpha_p}{f - r_c \cos \varphi \sin \alpha_p} \quad (4.2)$$

где

r_c — расстояние точки снимка от точки нулевых искажений c ;

α_p — угол наклона снимка;

φ — угол на снимке между направлением из точки c на данную точку и направлением главной вертикали на главную точку схода i ;

f — фокусное расстояние съёмочной камеры.

Анализ формулы (4.2) показывает:

- смещение точек за угол наклона увеличивается с увеличением угла наклона снимка α_p ;
- смещение точек за угол наклона уменьшается с увеличением фокусного расстояния f съемочной камеры;
- для конкретного снимка при фиксированных значениях α_p и f смещение точки зависит от ее положения на снимке, определяемого расстоянием r_c и углом φ ;
- на линии неискаженных масштабов $h_c h_c$ смещение за угол наклона равно 0, поскольку для точек, лежащих на линии $h_c h_c$, $\cos \varphi = \cos 90^\circ = 0$.

На главной вертикали $V_0 i$ смещение точек за угол наклона максимально ($\cos \varphi = \cos 0^\circ = 1$ или $\cos \varphi = \cos 180^\circ = -1$).

Точки, расположенные между прямыми $h_c h_c$ и $h_i h_i$ (линией действительного горизонта), смещаются к точке нулевых искажений c ($\cos \varphi > 0$; $\delta\alpha < 0$); точки, расположенные между прямыми $h_c h_c$ и TT (основанием картины), смещаются от точки нулевых искажений c ($\cos \varphi < 0$; $\delta\alpha > 0$) (рис. 4.4).

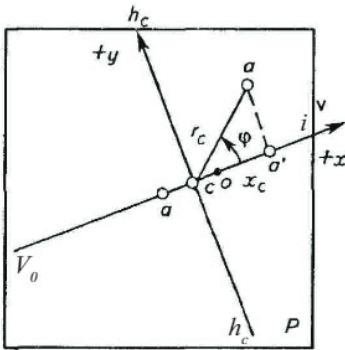


Рис. 4.3. Определение положения точки на наклонном снимке

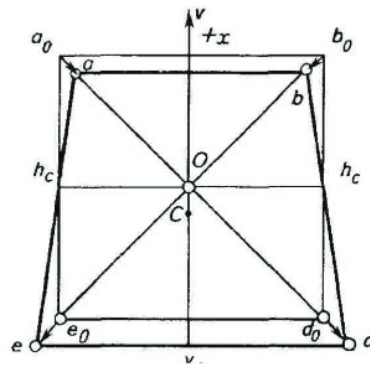


Рис. 4.4. Перспективное изображение квадратного контура

Используя обозначения на рис. 4.3 для углов наклона менее 3° , формула 4.2 примет вид 4.3.

$$\delta_\alpha = -\frac{r_c x_c \sin \alpha_p}{f}, \quad (4.3)$$

где

x_c — абсцисса точки a ,

$x_c = r_c \cos \varphi$.

4.3. Масштаб наклонного снимка

Построение перспективы сетки квадратов привело к важному выводу: масштаб вдоль фотограмметрической горизонтали — величина постоянная. Каждая фотограмметрическая горизонталь имеет свой постоянный масштаб. Он зависит от положения горизонтали на снимке.

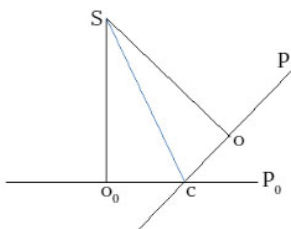


Рис. 4.5. Масштаб наклонного снимка

На рис. 4.5 изображены наклонный P и горизонтальный P_0 снимки, полученные из одного центра проекции S . Плоскости наклонного и горизонтального снимков пересекаются по прямой, принадлежащей одновременно плоскостям P и P_0 . Поскольку эта прямая принадлежит горизонтальной плоскости P_0 , она также горизонтальна. Но она также принадлежит наклонной плоскости и поэтому является фотограмметрической горизонталью hh . Напомним, что фотограмметрические горизонталь — это следы сечения наклонного снимка горизонтальными плоскостями. Масштаб фотограмметрической горизонтали hh равен масштабу горизонтального снимка, а именно $1/m_{hh} = f/H$. Докажем, что наклонный и горизонтальный снимки, полученные из одного центра проекции, пересекаются по фотограмметрической горизонтали hh , проходящей через точку нулевых искажений c .

Рассмотрим треугольники ΔSco и ΔSco_0 на рис. 4.5, где точки o и o_0 — главные точки наклонного и горизонтального снимков соответственно. Рассматриваемые треугольники — прямоугольные, с общей гипотенузой Sc и равными катетами So и So_0 . Следовательно, эти треугольники равны по катету и гипотенузе, и, следовательно, их соответственные элементы также равны. То есть угол cSo равен углу cSo_0 . Таким образом, луч Sc — это биссектриса угла α_p — угла наклона снимка P . Точка пересечения биссектрисы угла наклона снимка c с плоскостью снимка — это точка нулевых искажений c . Таким образом, пересечение горизонтального и наклонного снимков, полученных из одного центра проекции, происходит по фотограмметрической горизонтали, содержащей точку нулевых искажений c . Эта фотограмметрическая горизонталь называется *линией неискаженных масштабов* и обозначается $h_c h_c$.

Масштаб вдоль фотограмметрической горизонтали $h_c h_c$ равен масштабу горизонтального снимка равнинной местности $1/m = f/H$ и называется главным масштабом снимка.

Вдоль произвольной горизонтали hh масштаб не равен главному и определяется по формуле

$$\frac{1}{m_{hh}} = \frac{f}{H} \left(1 - \frac{x}{f} \sin \alpha_p \right), \quad (4.4)$$

где

x — абсцисса горизонтали hh в системе координат с началом в точке c и положительным направлением оси абсцисс вдоль главной вертикали $V_o i$.

Определим масштаб вдоль фотограмметрической горизонтали $h_o h_o$, проходящей через точку нулевых искажений o . Абсцисса этой горизонтали в представленной на рис. 4.4 системе координат равна расстоянию oc (4.5)

$$x = OC = fg \frac{\alpha_p}{2}. \quad (4.5)$$

Подставим ее значение в формулу (4.4). Получим

$$\begin{aligned} \frac{1}{m_o} &= \frac{f}{H} \left(1 - \frac{fg \frac{\alpha_p}{2}}{f} \sin \alpha_p \right) = \frac{f}{H} \left(1 - \frac{\sin \frac{\alpha_p}{2}}{\cos \frac{\alpha_p}{2}} 2 \sin \frac{\alpha_p}{2} \cos \frac{\alpha_p}{2} \right) = \\ &= \frac{f}{H} (1 - 2 \sin^2 \frac{\alpha_p}{2}) = \frac{f}{H} \cos \alpha_p. \end{aligned} \quad (4.6)$$

Определим масштаб вдоль фотограмметрической горизонтали $h_n h_n$, проходящей через точку надира n . Вычислим абсциссу этой горизонтали:

$$\begin{aligned} x = -cn &= -(f \operatorname{tg} \alpha_p - \operatorname{tg} \frac{\alpha_p}{2}) = f \left(\operatorname{tg} \frac{\alpha_p}{2} - \operatorname{tg} \alpha_p \right) = f \left(\frac{1 - \cos \alpha_p}{\sin \alpha_p} - \frac{\sin \alpha_p}{\cos \alpha_p} \right) = \\ &= f \left(\frac{\cos \alpha_p - \cos^2 \alpha_p - \sin^2 \alpha_p}{\sin \alpha_p \cos \alpha_p} \right) = f \left(\frac{\cos \alpha_p - 1}{\sin \alpha_p \cos \alpha_p} \right). \end{aligned} \quad (4.7)$$

Также подставим ее значение в формулу (4.4). Получим:

$$\begin{aligned} \frac{1}{m_o} &= \frac{f}{H} \left(1 - \frac{f \left(\frac{\cos \alpha_p - 1}{\sin \alpha_p \cos \alpha_p} \right) \sin \alpha_p}{f} \right) = \frac{f}{H} \left(1 - \frac{\sin \alpha_p \cos \alpha_p - \sin \alpha_p}{\sin \alpha_p \cos \alpha_p} \right) = \\ &= \frac{f}{H} \left(1 - 1 + \frac{1}{\cos \alpha_p} \right) = \frac{f}{H \cos \alpha_p}. \end{aligned} \quad (4.8)$$

Масштаб бесконечно малого отрезка по направлению вдоль главной вертикали рассчитывается по формуле (4.9)

$$\frac{1}{m_v} = \frac{f}{H} \left(1 - \frac{x}{f} \sin \alpha_p\right)^2, \quad (4.9)$$

где

x — абсцисса начала отрезка.

В системе координат с началом в главной точке o и осью абсцисс, совпадающей с главной вертикалью, масштаб произвольной фотографической горизонтали с абсциссой x определяется по формуле (4.10)

$$\frac{1}{m_n} = \frac{f}{H} \left(\cos \alpha_p - \frac{x}{f} \sin \alpha_p\right). \quad (4.10)$$

Тогда абсцисса горизонтали $h_n h_n'$, проходящей через точку надира, равна расстоянию on , взятому с обратным знаком.

$$on = f \operatorname{tg} \alpha_p. \quad (4.11)$$

$$x = -f \operatorname{tg} \alpha. \quad (4.12)$$

Масштаб вдоль горизонтали $h_n h_n'$, содержащей точку надира n , вычисляется по формуле (4.13)

$$\frac{1}{m_n} = \frac{f}{H} \left(\cos \alpha + \frac{f \operatorname{tg} \alpha \sin \alpha}{f}\right) = \frac{f}{H} \left(\frac{\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha}{\cos \alpha}\right) = \frac{f}{H \cos \alpha}. \quad (4.13)$$

Для горизонтали $h_c h_c'$, проходящей через точку нулевых искажений c , абсцисса вычисляется по формуле (4.14)

$$x = -f \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha}{2}\right). \quad (4.14)$$

Масштаб вдоль горизонтали $h_c h_c'$, содержащей точку нулевых искажений c , вычисляется по формуле (4.15)

$$\frac{1}{m_c} = \frac{f}{H} \left(\cos \alpha + \frac{f \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \sin \alpha}{f}\right). \quad (4.15)$$

Заменим в этой формуле тригонометрические функции угла α на их выражения через тригонометрические функции половинного угла $\alpha/2$.

$$\cos \alpha = \cos^2 \frac{\alpha}{2} - \sin^2 \frac{\alpha}{2},$$

$$\sin \alpha = 2 \sin \frac{\alpha}{2} \cos \frac{\alpha}{2}.$$

Произведем преобразования в скобках формулы (4.13)

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} 2 \sin \frac{\alpha}{2} \cos \frac{\alpha}{2} = 2 \sin^2 \frac{\alpha}{2},$$

$$\cos \alpha + 2 \sin^2 \frac{\alpha}{2} = \cos^2 \frac{\alpha}{2} - \sin^2 \frac{\alpha}{2} + 2 \sin^2 \frac{\alpha}{2} = \cos^2 \frac{\alpha}{2} + \sin^2 \frac{\alpha}{2} = 1.$$

В итоге получим

$$1/m_c = f/H. \quad (4.16)$$

Для горизонтали $h_o h_o'$, проходящей через главную точку снимка o , абсцисса равна 0 ($x = 0$).

Масштаб вдоль горизонтали $h_o h_o'$ вычисляется по формуле (4.17)

$$\frac{1}{m_o} = \frac{f}{H} \cos \alpha. \quad (4.17)$$

Изменение масштаба по площади снимка называют его разномасштабностью. Различают абсолютную и относительную разномасштабность снимка.

Абсолютная разномасштабность Δm — отклонение знаменателя масштаба снимка в данной точке от знаменателя среднего масштаба снимка m_{cp} (4.18)

$$\Delta m = m - m_{cp} = (1,5m_{cp} x \sin \alpha_p)/f. \quad (4.18)$$

где

x — абсцисса данной точки в системе координат с началом в точке c и положительным направлением оси абсцисс вдоль главной вертикали $V_o i$.

Относительная разномасштабность $\Delta m/m_{cp}$ — отношение абсолютной разномасштабности к знаменателю среднего масштаба снимка. Максимальная относительная разномасштабность наклонного снимка (рис. 4.6) равнинной местности рассчитывается по формуле (4.19)

$$\frac{\Delta m}{m_{cp}} = \frac{1,5 \Delta x \sin \alpha_p}{f}, \quad (4.19)$$

где

Δx — максимально возможное расстояние вдоль главной вертикали между фотограмметрическими горизонталями, для которых определены знаменатели масштабов m_1 и m_2 соответственно:

$$\Delta m = m_2 - m_1.$$

По формуле (4.19) можно рассчитать величину области на снимке Δx , для которой относительная разномасштабность $\Delta m/m_{cp}$ будет допустимой. Согласно действующим инструкциям по созданию

цифровых планов и карт допустимая относительная разномасштабность 1/300.

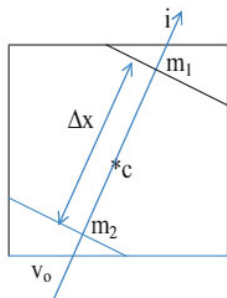


Рис. 4.6. Иллюстрация к определению разномасштабности наклонного снимка

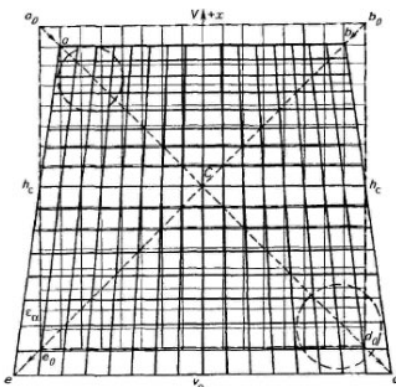


Рис. 4.7. Иллюстрация изменения масштаба на наклонном снимке

4.4. Искажение направлений на наклонном снимке

Смещение точек за угол наклона вызывает искажение направлений по сравнению с горизонтальным снимком.

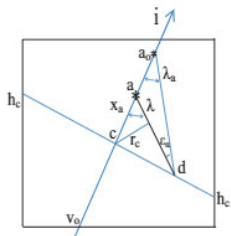


Рис. 4.8. Искажение направления на наклонном снимке

На рис. 4.8 изображен наклонный снимок и произвольное направление, пересекающее главную вертикаль в точке a , а линию неискаженных масштабов в точке d . Введем поправки в положение точек a и d , чтобы получить их изображение, соответствующее горизонтальному снимку. Исправленное положение точки a — точка a_0 . Точка d не смещалась за угол наклона, поскольку лежит на линии неискаженных масштабов. Значит, неискаженное направление проходит через точки a_0 и d . Угол ε_α между направлением на наклонном снимке da и его исправленным положением da_0 называется *искажением направления за угол наклона*.

Вычислим этот угол, используя теорему синусов для треугольника Δaa_0d .

$$aa_0 = \delta_a = \frac{x_a^2 \sin \alpha_p \cos \varphi}{f}, \quad (4.20)$$

$$\frac{\sin \varepsilon_\alpha}{aa_0} = \frac{\sin(180^\circ - \lambda)}{a_0d} = \frac{\sin \lambda}{a_0d},$$

$$\sin \varepsilon_\alpha = \frac{aa_0 \sin \lambda}{a_0d};$$

$$\sin \lambda = \frac{r_c}{x_a}, \quad (4.21)$$

$$a_0d \approx ad = \frac{x_a}{\cos \lambda},$$

$$\sin \varepsilon_\alpha = \frac{aa_0 \sin \lambda}{ad} = \frac{x_a^2 \sin \alpha \cos \lambda r_c}{fx} = \frac{r_c \sin \alpha \cos \lambda}{f}.$$

Итак,

$$\sin \varepsilon_\alpha = \frac{r_c \sin \alpha_p \cos \lambda}{f}, \quad (4.22)$$

где

r_c — расстояние между направлением на снимке и точкой c ;

α_p — угол наклона снимка;

λ — угол между направлением и главной вертикалью;

f — фокусное расстояние съемочной камеры.

Анализ формулы (4.22) показывает:

— не искажаются направления, проходящие через точку нулевых искажений c ($r_c = 0$), а также совпадающие с фотограмметрическими горизонталями ($\lambda = 90^\circ$);

— искажение направления увеличивается с увеличением угла наклона снимка α_p ;

- искажение направления увеличивается с уменьшением фокусного расстояния съёмочной камеры f ;
- при фиксированных f и α_p наибольшие искажения имеют направления, параллельные главной вертикали ($\lambda = 0^\circ, \cos \lambda = 1$), причем чем удаленнее направление от точки c (чем больше r), тем больше оно искажается.

В таблице (4.1) приведены значения искажений направлений, удаленных от точки c на 100 мм ($r_c = 100$ мм), для различных углов наклона снимка α_p и фокусных расстояний f съёмочных камер.

Таблица 4.1

Величины искажений направлений

α_p	f (мм)		
	88	150	300
3°	$3^\circ 24'$	2°	1°
$40'$	$45'$	$27'$	$13'$
$10'$	$11'$	$7'$	$3'$

4.5. Искажение площадей на наклонном снимке

Разномасштабность наклонного снимка, обусловленная смещением точек за угол наклона, вызывает искажение площадей участков на снимке.

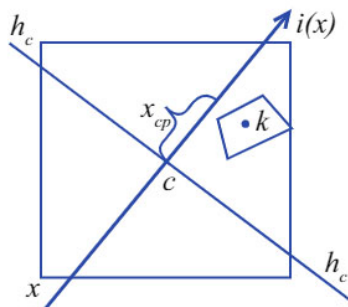


Рис. 4.9. Изображение участка на наклонном снимке

На рис. 4.9 представлен наклонный снимок с изображенным на нем участком местности. Геометрический центр этого участка находится в точке k . Площадь P_o данного участка на местности может быть рассчитана с использованием среднего масштаба снимка по формуле (4.23)

$$P_o = p \frac{H^2}{f^2} \left(1 + \frac{3x \sin \alpha_p}{f} \right). \quad (4.23)$$

Или по формуле (4.24)

$$P_o = P \left(1 + \frac{3x_{cp} \sin \alpha_p}{f} \right), \quad (4.24)$$

где

p — площадь участка на наклонном снимке;

P — площадь участка на местности, искаженная за угол наклона снимка; $P = pm^2_{cp}$;

x_{cp} — абсцисса центра участка (точки k) в системе координат с началом в точке s и положительным направлением оси абсцисс вдоль главной вертикали V_{ij} ;

α_p — угол наклона снимка;

f — фокусное расстояние съёмочной камеры.

Абсолютное искажение площади участка ΔP_α — разность между ее значением P , рассчитанным с использованием среднего масштаба, и истинной площадью участка P_o — вычисляется по формуле (4.25)

$$\Delta P_\alpha = P - P_o = - \frac{3Px_{cp} \sin \alpha_p}{f}. \quad (4.25)$$

Относительное искажение площади участка — отношение абсолютного искажения площади ΔP_α к площади P , вычисленной по среднему масштабу снимка.

$$\frac{\Delta P}{P} = - \frac{3x_{cp} \sin \alpha_p}{f}. \quad (4.26)$$

Искажение площади имеет знак. Оно отрицательно для участков, у которых центр k имеет положительную абсциссу x . Это означает, что вычисленная по среднему масштабу площадь участка меньше ее действительного значения. И наоборот, для участков, у которых центр k имеет отрицательную абсциссу x , искажение площади — положительно. То есть вычисленная по среднему масштабу площадь участка больше ее действительного значения.

Анализ формулы (4.26) показывает:

1. Искажение площадей увеличивается с увеличением угла наклона снимка и с уменьшением фокусного расстояния съёмочной камеры.
2. Площади участков, расположенных симметрично относительно линии неискаженных масштабов $h_c h_c$, не искажаются. Для них $x_{cp} = 0$.
3. Искажение площади отрицательно для участков, у которых центр k имеет положительную абсциссу x . Это означает, что вычисленная по среднему масштабу площадь участка меньше ее действительного значения.

4. Искажение площади положительно для участков, у которых центр k имеет отрицательную абсциссу x , то есть вычисленная по среднему масштабу площадь участка больше ее действительного значения.

Сравнение формул (4.25) и (4.26) позволяет сделать вывод:

$$\frac{\Delta m}{m_{cp}} = \frac{1}{2} \frac{\Delta p}{p} . \quad (4.27)$$

По формуле (4.27) определяют допустимую величину разномасштабности наклонного снимка в зависимости от требуемой точности определения площадей. Например, если

$$\frac{\Delta p}{p} = \frac{1}{100} ,$$

то допустимая величина разномасштабности снимка

$$\frac{\Delta m}{m_{cp}} = \frac{1}{200} .$$

4.6. Смещение точек горизонтального снимка, вызванное рельефом местности

На рис. 4.10 изображены горизонтальный снимок P_o , полученный из центра проекции S , и рельефная местность со средней секущей (начальной) плоскостью E . H — высота аэрофотосъемки над начальной плоскостью E . На горизонтальном снимке точки o , s , n совпадают.

Рисунок представлен в плоскости главного вертикала, то есть в вертикальной плоскости, построенной на главном луче объектива АФА. Ортогональные проекции точек A и B местности на плоскость E — соответственно точки A_o и B_o , имеющие превышения h над начальной плоскостью E .

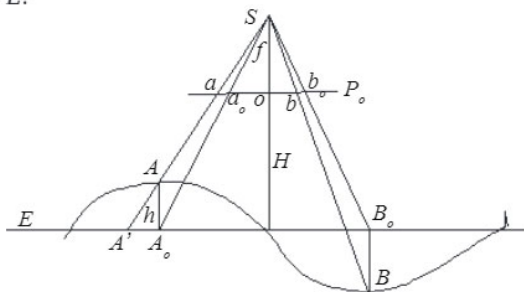


Рис. 4.10. Смещение точек на горизонтальном снимке вследствие влияния рельефа местности

Из рис. 4.10 видно, что точка местности A , расположенная выше плоскости E на величину превышения h , изобразилась на снимке в точке a . Изображения ортогональных проекций точек A_0 и B_0 находятся на снимке в точках a_0 и b_0 соответственно. Расстояние aa_0 есть смещение точки a на снимке, вызванное положительным превышением точки A местности над плоскостью E . Аналогично расстояние bb_0 — смещение точки b на снимке, вызванное отрицательным превышением точки B местности. При положительных превышениях точек местности соответствующие точки снимка смещаются от точки надира, что приводит к увеличению масштаба изображения. При отрицательных превышениях происходит обратное — точки аэрофотоснимка смещаются к точке надира, что приводит к уменьшению масштаба изображения.

Выведем формулу смещения точки за рельеф.

Обозначим смещение за рельеф точки a через δ_h .

$$\delta_h = aa_0.$$

Тогда из подобия треугольников $\Delta AA_0A'$ и ΔSaa_0 следует

$$aa_0/A'A_0 = f/H. \tag{4.28}$$

Откуда $aa_0 = fA'A_0/H$.

Из подобия треугольников $\Delta SA_0A'$ и ΔSaa_0 следует

$$aa_0/A'A_0 = f/h.$$

Откуда $A'A_0 = aa_0h/f$.

Таким образом,

$$\delta_h = \frac{r h}{H} = \frac{r h}{fm}, \tag{4.29}$$

где

r — расстояние от точки надира n до точки снимка;

f — фокусное расстояние АФА;

H — высота фотографирования над начальной плоскостью E ;

h — превышение точки местности над начальной плоскостью E ;

m — знаменатель масштаба аэрофотоснимка для точек, лежащих в плоскости E .

Величина смещения точки за рельеф зависит от ее удаления на снимке от точки надира, превышения h на местности над выбранной начальной плоскостью и от высоты съемки H над этой плоскостью (4.29).

Анализ формулы (4.29) показывает, что:

1. Смещение за рельеф δ_h равно нулю, если точка местности не имеет превышения над начальной плоскостью ($h = 0$) или совпадает с точкой надира n ($r_n = 0$).

2. Чем больше превышение h и чем больше расстояние от точки надира r_n , тем больше смещение за рельеф δ_h .
3. Величина смещения за рельеф уменьшается с увеличением фокусного расстояния АФА при сохранении масштаба съемки. Поэтому для уменьшения влияния рельефа на смещения точек, вызывающего разномасштабность в пределах снимка, съемку рельефной местности целесообразно проводить с большей высоты фотографирования длиннофокусными АФА при сохранении заданного масштаба съемки.

4.7. Искажение направлений на аэрофотоснимке вследствие влияния рельефа местности

Смещение точек за рельеф вызывает искажение направлений на снимке.

На рис. 4.11 изображен горизонтальный снимок рельефной местности. Рассмотрим произвольное направление, проходящее через точки a, b . Пусть точка A местности, изобразившаяся в точке a , лежит выше по рельефу точки B местности. Примем горизонтальную плоскость, проходящую через точку B , за начальную. Введем поправку за рельеф δ_h в положение точки a :

$$\delta_h = aao = rh/H,$$

где

r — расстояние от точки a до главной точки o горизонтального снимка;

h — превышение точки A местности над точкой B ;

H — высота фотографирования над горизонтальной плоскостью, проходящей через точку B .

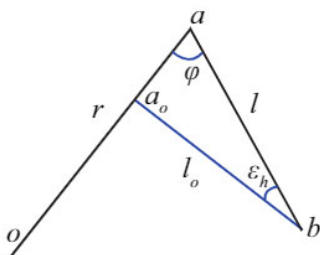


Рис. 4.11. Искажение направления вследствие влияния рельефа

Точки a_o и b соответствуют точкам местности с одинаковыми высотами, поэтому направление $a_o b$ — неискаженное направление, направление ab — направление, искаженное за влияние рельефа.

Угол $aba_o = \epsilon_h$ называется искажением направления за влияние рельефа местности.

Выведем формулу для вычисления искажения направления ε_h за влияние рельефа местности.

Воспользуемся теоремой синусов для треугольника $\Delta a b a_o$ (рис. 4.11). Обозначим отрезок $ab = l$, отрезок $a_o b = l_o$, получаем

$$\frac{\sin \varepsilon_h}{a a_o} = \frac{\sin \varphi}{l_o},$$

$$\sin \varepsilon_h = \frac{a a_o \sin \varphi}{l_o} = \frac{r h \sin \varphi}{H l_o}.$$
(4.30)

Таким образом, получена формула искажения направления за влияние рельефа (4.31)

$$\sin \varepsilon_h = \frac{\delta_h \sin \varphi}{l_o} = \frac{r h \sin \varphi}{H l_o}.$$
(4.31)

Анализ формулы (4.31) показывает:

1. Наибольшее искажение имеют направления, для которых угол $\varphi = 90^\circ$, для них $\sin \varphi = 1$.

Тогда

$$\varphi = (90^\circ),$$

$$\sin \varphi = 1,$$

$$l_o = \frac{l}{\cos \varepsilon_h},$$

$$\sin \varepsilon_h = \frac{r h \cos \varepsilon_h}{H l},$$

$$\operatorname{tg} \varepsilon_h = \frac{r h}{H l}.$$
(4.32)

В случае, когда

$$r = l,$$

$$\operatorname{tg} \varepsilon_h = \frac{h}{H},$$

$$\frac{h}{H} = \frac{1}{3} \rightarrow \varepsilon = 18^\circ,$$

$$\frac{h}{H} = \frac{1}{20} \rightarrow \varepsilon = 3^\circ.$$
(4.33)

2. На горизонтальном снимке не искажаются направления, проходящие через главную точку o (точку надира n). Для них $r = 0$ или $\varphi = 0$.

3. На горизонтальном снимке не искажаются направления, проходящие через точки с одинаковыми высотами. Для них $h = 0$.

4. Для снимков, полученных в одном масштабе, искажения направлений за влияние рельефа тем меньше, чем больше фокусное расстояние f АФА и длиннее отрезок l , определяющий направление.

На плановом снимке положение точки надира неизвестно, но положение главной точки известно с высокой точностью. Определим максимальное искажение ε_{hmax} для направлений, проходящих через главную точку планового снимка. В этом случае

$$r = on = ftg\alpha. \quad (4.34)$$

Тогда

$$tg\varepsilon_{max} = \frac{rh}{Hl} = \frac{ftg\alpha_p h}{Hl} = \frac{htg\alpha_p}{ml}. \quad (4.35)$$

Или для малых углов α_p

$$\varepsilon'_{max} = \frac{h\alpha'}{ml}, \quad (4.36)$$

где

m — знаменатель масштаба снимка, определенный для горизонтальной плоскости, проходящей через проекцию O главной точки на местности.

Так, при $h = \pm 100$ м, $\alpha_p = 3^\circ$, $\varepsilon_{hmax} = 11', 8$.

Обычно при плановой съемке искажение направлений, идущих из главной точки, даже при больших превышениях

$/\varepsilon_{max}/$ имеет значения менее $5-7'$, при гиостабилизации

$/\varepsilon_{max}/ = 1-2'$.

4.8. Изменение масштаба аэрофотоснимка вследствие влияния рельефа местности

Масштаб изображения горизонтали. На рис. 4.12 показаны рельефная местность и ее изображение на горизонтальном снимке P_o , полученном из центра проекции S с фокусным расстоянием f . Геодезические горизонталы AB и DK расположены в горизонтальных плоскостях E и E' соответственно.

Превышение между плоскостями E и E' составляет величину h . На снимке горизонталы изобразились линиями ab и dk . Поскольку геодезическая горизонталь на местности принадлежит горизонтальной плоскости, ее изображение на горизонтальном снимке имеет постоянный масштаб, и его определяют по известной формуле:

$$1/m = f/H.$$

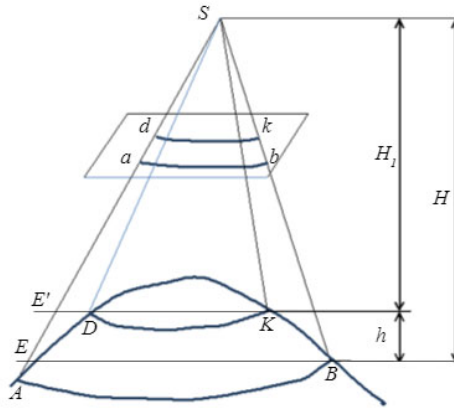


Рис. 4.12. Масштаб изображения горизонтали

Так, масштаб изображения горизонтали AB

$$1/m_{AB} = f/H,$$

где H — высота фотографирования над плоскостью E .

Масштаб изображения горизонтали DK определяют по формуле (4.37):

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{H_1}, \quad (4.37)$$

где

H_1 — высота фотографирования над плоскостью E' .

Как видно из рисунка 4.12,

$$H_1 = H - h. \quad (4.38)$$

Тогда

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{H - h}. \quad (4.39)$$

Абсолютная разномасштабность изображения горизонталей составит величину

$$\Delta m = H/f - (H - h)/f = h/f. \quad (4.40)$$

Относительная разномасштабность изображения горизонталей

$\frac{\Delta m}{m}$ определится по формуле (4.41):

$$\frac{\Delta m}{m} = \frac{h}{f} \frac{f}{H} = \frac{h}{H}. \quad (4.41)$$

Как видно из формулы (4.41), относительная разномасштабность изображения рельефной местности на горизонтальном снимке зависит от превышений на местности и положения начальной плоскости E , над которой определена высота фотографирования H . За начальную плоскость принимают среднюю секущую плоскость. В этом случае максимальные превышения над ней h_{\max} будут меньшими, чем при использовании любой другой плоскости.

Выполним анализ формулы (4.39).

1. Масштаб изображения произвольной горизонтали — величина постоянная, поскольку для нее $H - h = \text{const}$. Разные horizontals имеют разный масштаб, поскольку у них разные превышения h над начальной плоскостью.
2. Чем больше превышение над начальной плоскостью (чем выше горизонталь), тем крупнее масштаб ее изображения.

Из формулы (4.40) следует, что длиннофокусные снимки имеют меньшую разномасштабность.

Масштаб изображения наклонного участка местности (ската). На рис. 4.13 изображен отрезок AB местности, имеющий угол наклона ν с горизонтальной начальной плоскостью E . Из центра проекции S получен горизонтальный снимок P_0 с фокусным расстоянием f . На снимке P_0 скат AB изобразился отрезком ab .

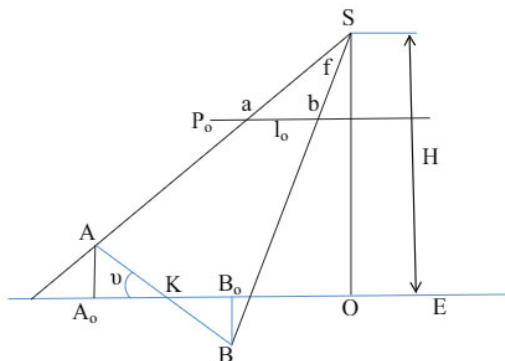


Рис. 4.13. Масштаб изображения ската

Масштаб снимка вдоль изображения ската местности есть величина переменная, поскольку высота фотографирования H над различными точками ската различна. При прочих равных условиях наибольшее изменение масштаба происходит вдоль изображения ската, совпадающего с направлением из главной точки O горизонтального снимка.

Масштаб бесконечно малого отрезка вдоль ската, совпадающего с направлением из главной точки O горизонтального снимка, рассчитывается по формуле (4.42):

$$\frac{1}{m_v} = \frac{f}{H} \left(1 + \frac{r}{f} \operatorname{tg} v\right), \quad (4.42)$$

где

r — расстояние от главной точки снимка O до середины бесконечно малого отрезка;

H — высота фотографирования над точкой ската, для которой определяется масштаб.

Анализ формулы (4.42) показывает:

1. Масштаб горизонтального снимка вдоль изображения ската непрерывно меняется, поскольку меняется g .
2. Если отметки точек ската возрастают по направлению от главной точки снимка O (угол $v > 0$), то при увеличении расстояния g от главной точки O значение $\left(1 + \frac{r}{f} \operatorname{tg} v\right)$ увеличивается, а H уменьшается и масштаб становится крупнее.
3. Масштаб в точке вдоль изображения ската есть масштаб в той же точке вдоль изображения горизонтали, умноженный на $\left(1 + \frac{r}{f} \operatorname{tg} v\right)$, и рассчитывается по формуле (4.43)

$$\frac{1}{m'_v} = \frac{1}{m'_h} \left(1 + \frac{r}{f} \operatorname{tg} v\right). \quad (4.43)$$

4.9. Искажение длин отрезков на горизонтальном снимке вследствие влияния рельефа местности

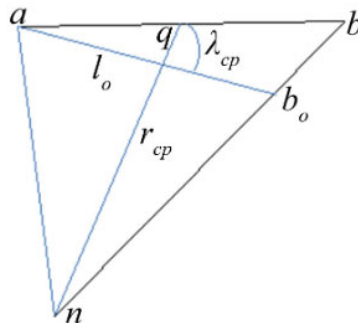


Рис. 4.14. Искажение длины отрезков на горизонтальном снимке вследствие влияния рельефа местности

Смещение точек снимка, вызванное рельефом местности, приводит к искажению длин отрезков (рис. 4.14).

Связь между отрезком l снимка и соответственным горизонтальным проложением l_o на местности выражается уравнением (4.44)

$$l_o = l_o \frac{H_{cp}}{f} = l \frac{H_{cp}}{f} \left(1 - \frac{r_{cp} \operatorname{tg} v \cos \lambda_{cp}}{f}\right), \quad (4.44)$$

где

l_o — отрезок на снимке, исправленный за влияние рельефа;

H_{cp} — высота фотографирования над начальной плоскостью, проходящей через точку A местности;

r_{cp} — расстояние от точки надира n до точки q (q — середина отрезка ab);

v — угол наклона местности по направлению ab ;

λ_{cp} — угол на снимке между отрезком ab и направлением из точки n на точку q .

Длина отрезка l_o на снимке, исправленная за влияние рельефа, связана с длиной l реального отрезка ab на снимке уравнением (4.45)

$$l_o = l \left(1 - \frac{r_{cp} \operatorname{tg} v \cos \lambda_{cp}}{f}\right). \quad (4.45)$$

Разность между реальной l и исправленной l_o длиной отрезка на снимке называется искажением длины отрезка Δl .

$$\Delta l = l - l_o. \quad (4.46)$$

$$l_{max} = l - l_o = l \frac{r_{cp} \operatorname{tg} v_{max}}{f}. \quad (4.47)$$

Наибольшее искажение отрезка возникает:

1. При $\cos \lambda_{cp} = 1$ ($\lambda_{cp} = 0$), т. е. когда отрезок совмещен с центральным направлением.
2. При v_{max} , когда отрезок расположен вдоль ската.

Масштаб изображения отрезка, лежащего на наклонной плоскости местности, равен масштабу в средней точке этого отрезка по его направлению.

Анализ формулы (4.45) позволяет дать определение неискаженного отрезка. Так, неискаженный отрезок — отрезок, проходящий примерно через центр снимка, а его концы примерно симметричны относительно центра снимка ($r_{cp} = 0$). Также неискаженным за влияние рельефа является отрезок, срединный перпендикуляр к которому проходит примерно через центр снимка ($\lambda_{cp} = 90^\circ$). Уклонения от указанных условий могут составлять 10–15 мм.

Для неискаженного отрезка выполняется равенство $l = l_o$, отсюда

$$\begin{aligned} L_o &= 1 H_{cp} / f, \\ H_{cp} &= mf. \end{aligned}$$

Таким образом, неискаженный отрезок позволяет определить высоту фотографирования H_{cp} над средней плоскостью относительно концов соответственного отрезка на местности. Если имеется топографическая карта, всегда можно перейти к высоте фотографирования над выбранной начальной плоскостью.

Приняв допустимое значение искажения отрезка $\Delta l = \Delta l_{\text{дон}}$, получим формулу максимально допустимой длины отрезка на снимке l_{max} , длину L которого на местности можно определять с использованием среднего масштаба.

$$l_{\text{max}} = \frac{\Delta l}{r_{cp} \cdot \text{tg} v_{\text{max}}} . \quad (4.48)$$

При работе с увеличенными в K раз изображениями (увеличенными снимками, приведенными фотосхемами) и задавая $\Delta l = 0,5$ мм на увеличенном изображении, пользуются преобразованной формулой (4.49).

$$l_{\text{max}} = \frac{0,5f}{kr_{cp} \cdot \text{tg} v_{\text{max}}} . \quad (4.49)$$

4.10. Искажение площадей на горизонтальном снимке за влияние рельефа местности

Рельеф местности вызывает также искажение площадей участков снимка по сравнению с соответственной ортогональной проекцией (рис. 4.15).

Площадь P_o участка, линия ската которого расположена произвольно, вычисляется по формуле (4.50):

$$P = p(m')^2 = p \frac{H^2}{f} \left(1 + \frac{r_{cp} \cdot \text{tg} v_{cp}}{f} \right)^2 , \quad (4.50)$$

где

p — площадь участка на снимке;

$1/m'$ — средний масштаб в центре участка;

H' — высота фотографирования над центром участка;

v_{cp} — угол наклона участка вдоль центрального направления;

r_{cp} — расстояние от главной точки снимка O до центра участка.

Формула (4.50) верна для определения площади по гиростабилизированному снимку. При этом величины H' и v_{cp} могут определяться по топографической карте.

Величина искажения площади ΔP_h вычисляется по формуле (4.51):

$$\Delta P_h = P - P_o = Pr_{cp} \operatorname{tg} v_{cp} / f, \quad (4.51)$$

где

P — площадь участка, искаженная за рельеф;

P_o — площадь неискаженного за рельеф участка.

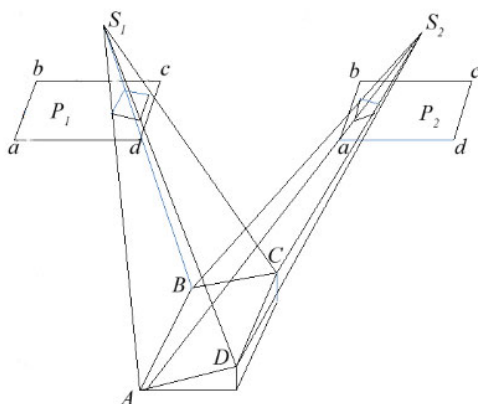


Рис. 4.15. Искажение площадей на горизонтальном снимке за влияние рельефа

Анализ формулы (4.51) позволяет сделать следующие выводы:

1. Не искажаются площади участков, центр которых совпадает с главной точкой снимка O ($r_{cp} = 0$).
2. Не искажаются площади участков, уклон которых вдоль центрального направления равен 0 ($\operatorname{tg} v_{cp} = 0$).
3. На длиннофокусных снимках искажение площадей меньше, чем на короткофокусных при прочих равных условиях.

Относительная величина искажения площади определяется по формуле (4.52):

$$\frac{\Delta p_h}{p} = \frac{r_{cp} \operatorname{tg} v_{cp}}{f}. \quad (4.52)$$

Максимальное искажение площади участка возникает при совпадении линии ската участка с центральным направлением на снимке (4.53).

$$\left(\frac{\Delta p_h}{p}\right)_{max} = \frac{r_{cp} \operatorname{tg} v_{max}}{f}. \quad (4.53)$$

Если угол наклона участка вдоль центрального направления $\nu_{cp} = 0$, то при углах наклона местности до 10° ($\nu_{max} < 10^\circ$) искажение площадей практически отсутствует.

В процессе цифровой фотограмметрической обработки снимков влияние угла наклона снимка и рельефа местности устраняют.

4.11. Фотосхемы

Фотосхемой называют фотографическое изображение местности, составленное из рабочих площадей контактных или увеличенных снимков.

Фотосхемы, изготовленные из снимков одного маршрута, называют одномаршрутными. Многомаршрутные фотосхемы составляют из одномаршрутных.

Важное достоинство фотосхем — для их изготовления не требуется геодезической подготовки снимков и на монтажные работы требуется мало времени.

Фотосхемы можно использовать на стадии предварительного изучения территорий и эскизного межевания. Проектировщик при этом получает существенные преимущества в сравнении с решением тех же задач по имеющимся графическим (векторным) планам или картам. Так как фотосхемы монтируют из снимков новой аэро- или космической фотосъемки, фотоизображение содержит большой объем актуальной информации о состоянии угодий, объектов инфраструктуры, водоемов и др. Фотосхемы — более удобный материал, чем отдельные снимки, для тех видов дешифрирования, в которых требуется выявление взаимосвязей объектов ландшафта, закономерностей строения рельефа на больших территориях, например, при почвенном дешифрировании или мелиоративных изысканиях.

И наконец, фотосхемы — незаменимый материал при выполнении дешифровочных работ с борта самолета или вертолета (аэровизуальное дешифрирование).

Наиболее простой способ монтажа фотосхем — по соответственным точкам.

Способ может быть реализован в двух вариантах — индивидуальной и совместной обрезке снимков.

При *индивидуальной обрезке* вблизи средней линии продольного перекрытия смежных снимков выбирают и накалывают на обоих снимках две надежно идентифицируемые точки (на рис. 4.16 точки a_1 , d_1 и a_2 , d_2). Разумеется, что эти точки должны располагаться на возможно большем расстоянии одна от другой. Приложив поочередно линейку к накалотым точкам на одном и другом снимках, их обрезают по линиям a_1d_1 и a_2d_2 . Аналогично обрезают остальные снимки маршрута.

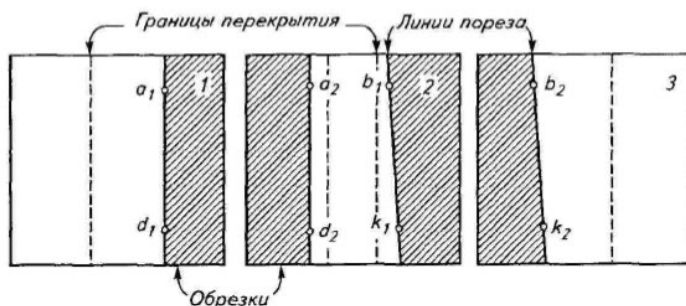


Рис. 4.16. Индивидуальная обрезка снимков при монтаже фотосхемы по соответственным точкам

При работе с гиостабилизированными снимками равнины выгодно использовать в монтаже только четные или нечетные снимки (монтаж через снимок). Линии порезов пройдут примерно по середине оставшегося (примерно 20%) продольного перекрытия.

Для совместной обрезки смежные снимки накладывают один на другой, добиваясь наилучшего совмещения элементов изображения вдоль средней линии перекрытия. Качество укладки контролируют наколами в верхней, средней и нижней частях перекрытия. Расхождения контрольных точек в середине должны быть минимальными, а вверху и внизу направлены вдоль средней линии.

Снимки разрезают совместно по кривой или ломаной линии с небольшими отклонениями от средней линии перекрытия снимков. При выборе направления изгибов линии пореза желательно линейные элементы топографической ситуации и границы угодий проходить под углами, близкими к прямому, а мелкие элементы обходить.

Вырезанные средние части снимков (рабочие площади) наклеивают безводным клеем на лист плотной бумаги, картона или другого материала. Снимки, разрезанные индивидуально, наклеивают, добиваясь минимального расхождения элементов изображения в середине линии пореза.

Достоинство рассмотренного способа — высокая производительность и простота технологии. Однако влияние рельефа местности и угла наклона снимка на смещение точек, используемых при монтаже, может существенно искривить направление фотосхемы даже при идеальной прямолинейности съемочного маршрута.

При монтаже возможно искривление одномаршрутной фотосхемы, вызванное влиянием рельефа. На смежных снимках точки, по которым выполняется порез, смещаются по направлению от или к точке надира. Это вызывает изменение направления линий пореза (рис. 4.17). Допустим, что точка a выше точки d на некоторую величину. Точка a снимка 1 сместится по направлению от главной

точки O (строго от точки надира) на a_0, a_1 , аналогично сместится и точка a_2 на снимке 2. Линии порезов при этом пройдут по направлениям $a_1 d_1$ и $a_2 d_2$. Возникает изменение направлений пореза для каждого снимка. Снимок 2 при этом развернется относительно направления съемочного маршрута. Подсоединение последующих снимков в зависимости от особенностей рельефа может привести к суммированию отклонений и образованию прогиба фотосхемы. Аналогично воздействует на непрямолинейность фотосхемы и угол наклона используемых для монтажа снимков.



Рис. 4.17. Искривление фотосхемы рельефной местности

Это усложняет процесс ограничения рабочих площадей на смежных одномаршрутных фотосхемах и практически исключает возможность изготовления качественной единой многомаршрутной фотосхемы.

Качество монтажа фотосхемы оценивают с помощью обрезков. На каждом порезе можно использовать любой из двух обрезков. Обрезок прикладывают к порезу так, чтобы элементы изображения на нем точно совпали с соответственными элементами вмонтированного в фотосхему фрагмента того же снимка. Иглой вдоль пореза, возможно ближе к нему, через 2 – 3 см накалывают четкие точки изображения. Затем убирают обрезок и измеряют отклонения наколов от соответственных точек на фотосхеме.

Аналогично выполняют контроль по другим порезам. Принципиально можно измерять абсолютные отклонения. Но более важно оценить размер смещения накола в продольном направлении. Если накол находится между линией пореза и точкой, наколотой через обрезок, то изображение в этом участке пореза дублируется (возникает «дублет») — смещение на корректурном листе обозначают знаком «плюс». Если точка находится между наколом и линией пореза, на фотосхеме образуется «вырез», размер которого показывают на корректурном листе со знаком «минус». Корректурный лист представляет собой уменьшенное схематическое изображение фотосхемы с примерным сохранением формы порезов (рис. 4.18).

Допустимые значения дублетов и вырезов официально не регламентируют, но очевидно, что дублеты предпочтительнее вырезов.

Фотосхемы характеризуются средним масштабом. Определить его просто и быстро можно, сопоставив два соответственных бази-

са, измеренных на фотосхеме и плане. Масштаб плана при этом должен быть не мельче масштаба фотосхемы. Базисы располагают по диагоналям фотосхемы.

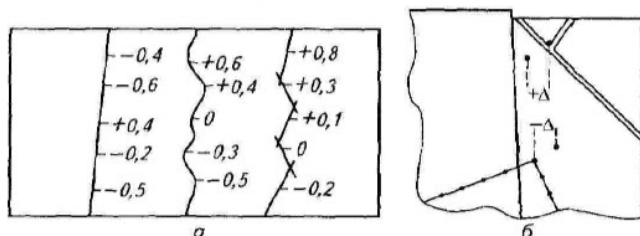


Рис. 4.18. Корректирный лист (а) и правила определения дублетов и вырезов (б)

При отсутствии плана средний масштаб фотосхемы может быть определен по опознанным на фотосхеме пунктам государственной геодезической сети. Если известна высота фотографирования каждого снимка, используемого при изготовлении фотосхемы, можно по известной формуле $1/m = f/H$ вычислить средний масштаб снимков, а затем фотосхемы.

Измерительные свойства фотосхемы такие же, что и для отдельных снимков. Измерения небольших расстояний и площадей через порез могут содержать существенные дополнительные погрешности. О значении их можно судить по результатам оценки качества монтажа. С увеличением расстояний и площадей результаты их измерения будут точнее. Можно предположить, что площадь пахотных или других угодий административного района может быть определена по фотосхемам при корректном определении их среднего масштаба с точностью, приближающейся к точности решения той же задачи по планам. Разумеется, что рельеф на этой территории должен быть равнинный или всхолмленный.

Контрольные вопросы

1. В разных частях крупномасштабного аэрофотоснимка, полученного АФА с широкоугольным объективом, изобразилось несколько возвышающихся линейных объектов (столбы, углы многоэтажных зданий и т. п.). Можно ли на этом снимке найти положение точки нулевых искажений?
2. Теоретически установлено, что площадь участка равнинной местности, центр которого совпал с точкой s , не искажается. Как это положение можно использовать в практике выполнения измерительных работ?

3. Могут ли площади участков местности, представляющих собой наклонную плоскость, оказаться не искаженными за влияние рельефа? Ответ обосновать аналитически или графически.
4. Предложите технологию измерения площадей непосредственно по снимку с использованием современных технических средств, если установлено, что влияние угла наклона снимка и рельефа на искажение площадей несущественно.
5. Изменяются ли масштабы изображения двух равнинных участков местности, расположенных на разных высотах, и соотношения этих масштабов при изменении их положения в плоскости горизонтального снимка? Ответ обосновать.
6. Каким способом можно уменьшить разномасштабность снимка при производстве аэрофотосъемки?

Глава 5. Теория фотограмметрической обработки одиначного топографического снимка

Цели изучения:

- знать элементы внутреннего и внешнего ориентирования аэрофотоснимка, иметь представление об аналитической связи координат точек снимка и местности;
- знать технологическую схему фотограмметрической обработки одиначного снимка.

5.1. Системы координат, применяемые в фотограмметрии

В фотограмметрии обычно используют следующие системы координат.

Для определения положения точки на снимке применяют *правую плоскую прямоугольную систему координат* снимка $o'x'y$ (рис. 5.1).

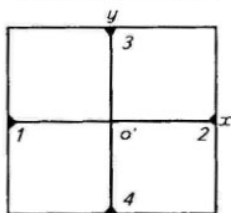


Рис. 5.1. Плоская система координат снимка

Началом системы координат является точка o' — точка пересечения прямых, соединяющих координатные метки снимка 1–2 и 3–4. Ось x совпадает с прямой 1–2, а ее положительное направление — с направлением полета. Ось y перпендикулярна оси x и проходит через точку o' . Координаты точек (x, y) , измеренные в системе координат снимка, называют *плоскими координатами*.

Для определения положения центра проекции относительно снимка используют *пространственную систему координат* снимка $o'xyz$ (рис. 5.2).

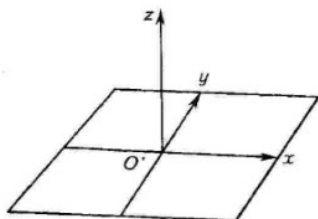


Рис. 5.2. Пространственная система координат снимка

В этом случае начало системы координат и оси x и y те же, что и в плоской системе координат снимка. Ось $o'z$ перпендикулярна плоскости снимка и дополняет систему координат до правой.

Взаимное положение точек местности определяют в *пространственной фотограмметрической системе координат*. Это правая система координат. Начало системы и направления координатных осей выбирают произвольно. Часто начало системы координат совмещают с центром проекции S — $SXYZ$ или с какой-либо точкой местности M — $MXYZ$. Плоскость XY принимают горизонтальной или параллельной плоскости снимка (рис. 5.3).

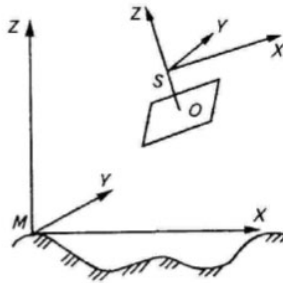


Рис. 5.3. Пространственные фотограмметрические системы координат

Положение точек местности определяют в левой *геодезической системе прямоугольных координат Гаусса–Крюгера* — $O^G X^G Y^G Z^G$. Начало геодезической системы координат O^G находится в точке пересечения осевого меридиана данной зоны и экватора. Плоскость $X^G Y^G$ — горизонтальная. Ось Y^G направлена на восток, ось X^G — на север (рис. 5.4). Условная геодезическая система координат может иметь началом любую точку местности, а ее оси сонаправлены соответствующим осям системы координат Гаусса – Крюгера (рис. 5.5).

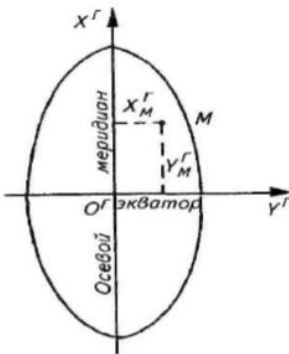


Рис. 5.4. Геодезическая система координат

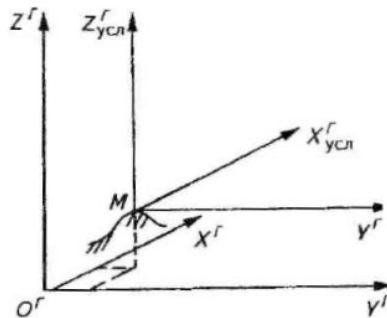


Рис. 5.5. Условная геодезическая система координат

5.2. Элементы ориентирования одиночного топографического снимка

Различают элементы внутреннего и внешнего ориентирования снимка. Элементы внутреннего ориентирования определяют положение центра проекции S относительно снимка. Ими являются координаты точки S_n пространственной системы координат снимка (рис. 5.6, а). Поскольку проекцией точки S на плоскости снимка является главная точка o , то их плановые координаты x и y в системе координат снимка совпадают, аппликатой точки S является расстояние S_o , т. е. фокусное расстояние АФА f . Таким образом, элементами внутреннего ориентирования снимка являются координаты главной точки снимка x_o, y_o и фокусное расстояние АФА f . Эти элементы определяют в процессе калибровки АФА с высокой точностью. Например, $f = 100,020$ мм; $x_o = -0,012$ мм; $y_o = +0,023$ мм.

Элементы внутреннего ориентирования снимка позволяют восстановить связку проектирующих лучей, существовавшую при аэрофотосъемке.

Ее положение в пространстве определяют шесть элементов внешнего ориентирования (ЭВО) снимка.

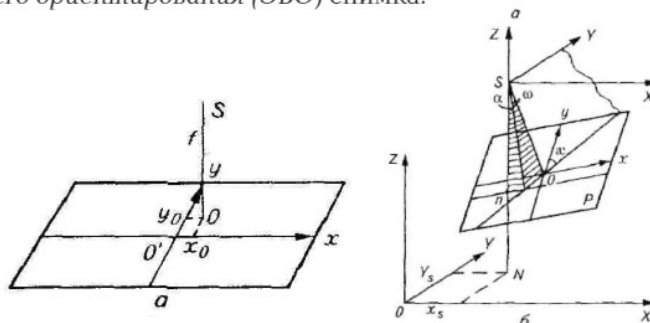


Рис. 5.6. Элементы внутреннего (а) и внешнего (б) ориентирования снимка

Это три линейных элемента — геодезические координаты центра проекции $S (X_s^r, Y_s^r, Z_s^r)$ и три угловых элемента $(\alpha; \omega; \kappa)$ (рис. 5.6, б):

α — продольный угол наклона снимка — угол между осью Z и проекцией главного луча на плоскость XZ ;

ω — поперечный угол наклона снимка — угол между главным лучом и проекцией главного луча на плоскость XZ ;

κ — угол поворота снимка — угол на снимке между осью Y и следом сечения плоскости снимка с плоскостью, построенной на главном луче и оси Y .

В аналитической фотограмметрии горизонтальным снимком называют снимок, углы наклона и поворота которого равны нулю, т. е. $\alpha = \omega = \kappa = 0$.

Следует заметить, что для всех снимков, полученных данным АФА, элементы внутреннего ориентирования принимают известными постоянными величинами. Элементы внешнего ориентирования у каждого снимка свои и, как правило, неизвестны.

5.3. Аналитическое трансформирование топографических снимков

Конечная цель фотограмметрической обработки снимков — преобразование их в заданную картографическую проекцию местности. В Российской Федерации, как известно, такой проекцией является равноугольная поперечно-цилиндрическая проекция Гаусса — Крюгера. Преобразование снимков в проекцию Гаусса — Крюгера требует выполнения громоздких вычислений. При крупномасштабном картографировании проекция Гаусса — Крюгера как математическая основа топографической карты часто заменяется близкой к ней по геометрическим свойствам ортогональной проекцией.

В фотограмметрии под *трансформированием* понимают преобразование аэро- или космических снимков, полученных в большинстве случаев в центральной проекции, в ортогональную или какую-либо иную картографическую проекцию.

Суть *аналитического трансформирования* заключается в преобразовании координат точек снимка в координаты соответствующих точек местности с использованием строгих математических зависимостей.

Пространственные геодезические координаты (X^r, Y^r, Z^r) точки местности A связаны с плоскими координатами (x, y) точки a снимка с помощью элементов внутреннего и внешнего ориентирования снимка.

$$\frac{X^r - X_s}{Z^r - Z_s} = \frac{a_1(x - x_0) + a_2(y - y_0) - a_3f}{c_1(x - x_0) + c_2(y - y_0) - c_3f}, \tag{5.1}$$

$$\frac{X - X_s}{Z^r - Z_s} = \frac{b_1(x - x_0) + b_2(y - y_0) - b_3f}{c_1(x - x_0) + c_2(y - y_0) - c_3f}.$$

Уравнения (5.1) называют *уравнениями коллинеарности* проектирующих лучей или *формулами связи координат* точек снимка и местности. В этих формулах коэффициенты a_i, b_i, c_i называются *направляющими косинусами*.

Направляющие косинусы определяют угловое ориентирование двух развернутых относительно друг друга систем координат —

пространственной системы координат снимка и геодезической системы координат. Это косинусы углов, образованных парами координатных осей этих систем координат. Пары координатных осей двух систем координат образуют 9 углов, косинусы которых приведены в таблице 5.1.

Так, например, направляющий косинус b_1 — косинус угла, образованного осью x снимка и осью Y^r геодезической системы.

Таблица 5.1

Направляющие косинусы

Оси геодезической системы координат	Оси пространственной системы координат снимка		
	x	y	z
X^r	a_1	a_2	a_3
Y^r	b_1	b_2	b_3
Z^r	c_1	c_2	c_3

Девять направляющих косинусов связаны между собой шестью независимыми уравнениями:

$$\begin{aligned}
 a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 &= 1; \\
 b_1^2 + b_2^2 + b_3^2 &= 1; \\
 c_1^2 + c_2^2 + c_3^2 &= 1. \\
 a_1b_1 + a_2b_2 + a_3b_3 &= 0; \\
 a_1c_1 + a_2c_2 + a_3c_3 &= 0; \\
 b_1c_1 + b_2c_2 + b_3c_3 &= 0.
 \end{aligned}
 \tag{5.2}$$

Девять направляющих косинусов являются функциями трех углов. В фотограмметрии этими углами являются три угла наклона и поворота снимка — α, ω, κ .

Таким образом, направляющие косинусы являются функциями угловых ЭВО снимка, их вычисляют по следующим формулам:

$$\begin{aligned}
 a_1 &= \cos \alpha \cos \kappa - \sin \alpha \sin \omega \sin \kappa; \\
 a_2 &= -\cos \alpha \sin \kappa - \sin \alpha \sin \omega \sin \kappa; \\
 a_3 &= -\sin \alpha \cos \omega; \\
 b_1 &= \cos \omega \sin \kappa; \\
 b_2 &= \cos \omega \cos \kappa; \\
 b_3 &= -\sin \omega; \\
 c_1 &= \sin \alpha \cos \kappa + \cos \alpha \sin \omega \sin \kappa; \\
 c_2 &= -\sin \alpha \sin \kappa + \cos \alpha \sin \omega \cos \kappa; \\
 c_3 &= \cos \alpha \cos \omega.
 \end{aligned}
 \tag{5.3}$$

Если направляющие косинусы известны, то можно определить угловые ЭВО снимка по формулам (5.4):

$$\begin{aligned} \alpha &= \arctg (a_3/c_3); \\ \omega &= \arcsin (-b_3); \\ \kappa &= \arctg (b_1/b_2). \end{aligned} \quad (5.4)$$

Для горизонтального снимка матрица направляющих косинусов превращается в единичную матрицу, все элементы которой равны нулю, кроме элементов, стоящих на главной диагонали:

$$a_1 = b_2 = c_3 = 1.$$

Как следует из анализа формул (5.1), связь между геодезическими координатами точки местности и плоскими координатами ее изображения на снимке осуществляется посредством элементов внутреннего и внешнего ориентирования снимка.

$$\begin{aligned} X^r &= X_S^r + (Z^r - Z_S^r) \frac{a_1(x-x_0) + a_2(y-y_0) - a_3f}{c_1(x-x_0) + c_2(y-y_0) - c_3f}, \\ Y^r &= Y_S^r + (Z^r - Z_S^r) \frac{b_1(x-x_0) + b_2(y-y_0) - b_3f}{c_1(x-x_0) + c_2(y-y_0) - c_3f}. \end{aligned} \quad (5.5)$$

Задачу по определению геодезических координат точки местности по измеренным координатам ее изображения на снимке называют *прямой фотограмметрической засечкой*.

Однако система из двух уравнений с тремя неизвестными не имеет однозначного решения. Следовательно, по одиночному снимку нельзя определить все три пространственные координаты точки местности. Однозначности решения достигают в том случае, если одну из неизвестных величин задают с достаточной точностью. При аналитической обработке одиночного снимка этой величиной является высотная координата Z^r точки местности.

Существует несколько способов задания высоты точки местности для решения прямой фотограмметрической засечки.

Если требуется вычислить плановые координаты небольшого числа точек, то высоты этих точек могут быть определены по имеющимся планам с горизонталями при отождествлении на них этих точек.

В случае равнинной местности всем точкам присваивают одинаковую высоту Z_{cp} , равную средней отметке снимаемой местности. Возможность использования этого способа определяется предварительным расчетом допустимых перепадов высот снимаемой местности. Предварительный расчет проводят по формуле:

$$h_{пред} = \frac{2\delta_{доп} Mf}{r_{max}}, \quad (5.6)$$

где

$h_{пред}$ — допустимый перепад высот снимаемой местности;

- $\delta_{\text{пгон}}$ — допустимое смещение точек за рельеф на создаваемом плане;
 M — знаменатель масштаба создаваемого плана;
 f — фокусное расстояние АФА;
 r_{max} — расстояние от точки надира до угла рабочей площади снимка.

Действительный перепад высот на снимаемой местности можно определить по существующим планам с горизонталями. Если он меньше допустимого, рассчитанного по формуле (5.6), то местность можно считать равнинной и всем точкам местности присвоить одинаковую высоту $Z_{\text{ср}}$.

В случае, когда действительный перепад высот превышает допустимый, создают цифровую модель рельефа (ЦМР). Высоты точек местности определяют посредством ЦМР.

Точность определения плановых геодезических координат X^T , Y^T точки местности зависит от точности задания высотной координаты Z^T . Таким образом, одиночный снимок дает возможность вычислять плановые геодезические координаты X^T , Y^T точек местности, если известны элементы ориентирования снимка и имеется информация о рельефе местности.

5.4. Определение элементов внешнего ориентирования топографического аэроснимка

Решение прямой фотограмметрической засечки возможно при условии, что элементы внутреннего и внешнего ориентирования снимка известны. Как уже отмечалось, элементы внутреннего ориентирования снимка известны. Их определяют при фотограмметрической калибровке АФА с точностью 0,001 мм и записывают в его паспорт.

Элементы внешнего ориентирования снимка можно определить различными способами. Их делят на две группы.

Первую группу составляют способы определения ЭВО снимков в полете с помощью специальных приборов. Например, координаты центров проекций находят по показаниям GPS-приемников, установленных на борту летательного аппарата. Угловые элементы внешнего ориентирования определяют с помощью инерциальных систем навигации. Координаты центров проекции в этом случае определяют с точностью 10–20 см, а угловые элементы с точностью 3–4'.

Способы второй группы позволяют вычислять элементы внешнего ориентирования снимков по опорным точкам. Опорными точками (опознаками) называют точки с известными геодезическими координатами и надежно отождествляемые на фотоизображении. Опорные точки могут быть плановыми — для них известны только

плановые координаты (X, Y) ; высотными — с известной высотной координатой (Z) ; планово-высотными — с тремя известными координатами (X, Y, Z) . Определение элементов внешнего ориентирования снимков с использованием опорных точек называют *обратной фотограмметрической засечкой*. Ее решают аналитически с использованием уже известных из параграфа 5.3 уравнений (5.5) связи координат точек снимка и местности.

В правых частях уравнений (5.5) содержатся все шесть искомых элементов внешнего ориентирования снимка. Для одной опорной точки с геодезическими координатами (X^T, Y^T, Z^T) и измеренными координатами (x, y) ее изображения на снимке можно составить два независимых уравнения вида (5.5) с шестью неизвестными величинами $X_{S'}^T, Y_{S'}^T, Z_{S'}^T, a, \omega, \kappa$. Чтобы однозначно определить все шесть элементов внешнего ориентирования, необходимо объединить в систему не менее шести независимых уравнений, содержащих искомые элементы. Для этого требуется не менее трех планово-высотных опорных точек.

Для решения обратной фотограмметрической засечки с контролем используют четыре опорные точки и более, расположенные по углам снимка. Увеличение числа опорных точек позволяет также отбраковывать грубые измерения.

5.5. Раздельное определение элементов внешнего ориентирования снимка при фотограмметрической обработке его частей

При решении обратной фотограмметрической засечки способом, описанным в параграфе 5.3, важно, чтобы координаты опорных точек (x, y) , входящие в уравнения связи координат, были измерены в системе координат снимка (o', x', y') . Это не всегда возможно. Например, при работе с частями увеличенных снимков координатные метки могут не попасть на обрабатываемый фрагмент или числа изобразившихся на фрагменте координатных меток недостаточно для восстановления системы координат снимка.

В этом случае для определения элементов внешнего ориентирования снимка можно использовать способ, не зависящий от выбора системы координат на снимке. Это способ раздельного определения линейных и угловых элементов ориентирования снимка.

Сначала находят линейные элементы $X_{S'}^T, Y_{S'}^T, Z_{S'}^T$. Для этого используют условие равенства углов между проектирующими лучами в треугольнике Sab и в треугольнике SAB (рис. 5.7). Очевидно, что угол ASB равен углу aSb . Косинусы этих углов также равны и могут быть вычислены с использованием теоремы косинусов из соответствующих треугольников Sab и SAB , а затем приравнены между собой.

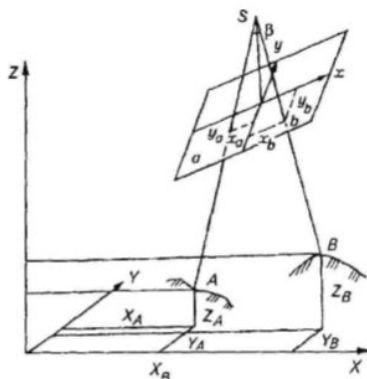


Рис. 5.7. Принцип раздельного определения элементов внешнего ориентирования снимка

В итоге получают уравнение:

$$\frac{x_a x_b + y_a y_b + f^2}{l_a l_b} = \frac{(X_A^r - X_S^r)(X_B^r - X_S^r) + (Y_A^r - Y_S^r)(Y_B^r - Y_S^r) + (Z_A^r - Z_S^r)(Z_B^r - Z_S^r)}{L_A L_B}, \quad (5.7)$$

где

l_a, l_b — длины векторов S_a и S_b соответственно;

L_A и L_B — длины векторов SA и SB соответственно, которые рассчитывают по формулам:

$$l_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + f^2};$$

$$L_i = \sqrt{(X_i^r - X_S^r)^2 + (Y_i^r - Y_S^r)^2 + (Z_i^r - Z_S^r)^2}.$$

Для двух опорных точек A и B можно составить одно уравнение вида (5.7), в котором $(X_{A'}^r; Y_{A'}^r; Z_{A'}^r)$ и $(X_{B'}^r; Y_{B'}^r; Z_{B'}^r)$ — геодезические координаты соответственно точек A и B ; $(x_a; y_a)$; $(x_b; y_b)$ — координаты точек a и b на снимке.

Для измерения этих координат можно построить на снимке прямоугольную систему координат с произвольным началом и произвольным ориентированием осей.

Неизвестными величинами в уравнении (5.7) являются геодезические координаты центра проекции X_S^r, Y_S^r, Z_S^r , входящие в правую часть уравнения. Для их нахождения требуются как минимум три опорные точки; n опорных точек позволяют составить $n(n-1)/2$ уравнений вида (5.7), чтобы решить задачу с контролем.

После определения координат центра проекции вычисляют угловые элементы внешнего ориентирования снимка. Их вычисляют, также используя опорные точки, по следующим формулам:

$$\begin{aligned} (X^r - X_S^r)k &= a_1x + a_2y - a_3f; \\ (Y^r - Y_S^r)k &= b_1x + b_2y - b_3f; \\ (Z^r - Z_S^r)k &= c_1x + c_2y - c_3f, \end{aligned} \tag{5.8}$$

где

X^r, Y^r, Z^r — геодезические координаты опорных точек;

k — масштабный коэффициент, $k = l/L$;

x, y — координаты опорных точек в системе координат снимка.

В этих формулах угловые элементы внешнего ориентирования снимка являются аргументами формул, определяющих направляющие косинусов a_i, b_i, c_i . По найденным направляющим косинусам вычисляют углы:

$$\begin{aligned} \alpha &= \text{arctg}(a_3/c_3); \\ \omega &= \text{arcsin}(-b_3); \\ \varphi &= \text{arctg}(b_1/b_2). \end{aligned}$$

В некоторых случаях, например при работе с архивными снимками, элементы внутреннего ориентирования АФА могут быть неизвестными. Фотограмметрическая обработка снимков с неизвестными элементами внутреннего и внешнего ориентирования возможна. Для их нахождения также можно использовать опорные точки. В этом случае для нахождения девяти неизвестных элементов ориентирования снимка: $x_o, y_o, f, X_{S_i}^r, Y_{S_i}^r, Z_{S_i}^r, \alpha, \omega, \kappa$ составляют систему уравнений коллинеарности как минимум для пяти опорных точек, не лежащих на одной прямой и в одной плоскости. Составленную систему уравнений решают относительно девяти неизвестных элементов ориентирования снимка.

5.6. Математический метод решения фотограмметрических задач

Рассмотренные варианты решения обратной фотограмметрической засечки предполагают составление и решение систем нелинейных уравнений, в которых число неизвестных более двух. При решении таких систем в фотограмметрии достаточно широко используют метод функциональной итерации.

Суть этого метода заключается в том, что исходные нелинейные уравнения вида $f(x_1, x_2, \dots, x_k) = 0$ линеаризуют (приводят к линейному виду), раскладывая в ряд Тейлора.

$$f_i(x_1, x_2, \dots, x_k) = a_i \delta x_1 + b_i \delta x_2 + \dots + g_i \delta x_k + r_i$$

где

i — номер уравнения, $i = 1, 2, \dots, n$;

x_1, x_2, \dots, x_k — искомые неизвестные;

a_i, b_i, \dots, g_i — коэффициенты при поправках — частные производные исходной функции по соответствующим неизвестным. Так, $a_i = \partial f / \partial x_1$, $b_i = \partial f / \partial x_2, \dots, g_i = \partial f / \partial x_k$; $\delta x_1, \delta x_2, \dots, \delta x_k$ — поправки к приближенным значениям неизвестных;

r_i — свободный член, значение данной функции при приближенных значениях функции.

Таким образом, получают систему линейных уравнений, где неизвестными являются поправки к приближенно заданным значениям искомым неизвестных параметров:

$$a_i \delta x_1 + b_i \delta x_2 + \dots + g_i \delta x_k + f_i(x_1^0, x_2^0, \dots, x_k^0) = 0, \quad (5.9)$$

где $x_1^0, x_2^0, \dots, x_k^0$ — приближенные значения неизвестных.

Систему линейных уравнений поправок решают по способу наименьших квадратов, поскольку число неизвестных k всегда меньше общего числа уравнений поправок n .

Найденными поправками исправляют первоначально заданные значения неизвестных, получают новые приближенные их значения. После этого составляют новую систему уравнений относительно новых поправок к новым приближенным значениям неизвестных. Начинается следующая итерация — следующий цикл в решении системы уравнений поправок. С каждой новой итерацией значение поправок уменьшается.

Вычисления повторяют до тех пор, пока значения поправок не станут меньше заранее заданного значения, которое определяют исходя из требуемой точности. Важно при выборе начальных значений неизвестных попасть в некоторую δ -окрестность искомым величин.

Таким образом, при аналитическом решении многих фотограмметрических задач возникает необходимость включать в исходные данные приближенные значения искомым величин.

Рассмотрим пример. Для решения задачи ориентирования планового одиночного снимка требуется задать приближенные значения его элементов внешнего ориентирования: $X_S^T, Y_S^T, Z_S^T, \alpha, \omega, \kappa$. Как это сделать?

Сначала определимся с угловыми элементами. Поскольку снимок плановый, его продольный α и поперечный ω углы наклона не превышают 3° .

Поэтому в качестве первого приближения этих величин можно задать их значения, равные 0° . Угол κ зависит от направления аэро-

фотосъемочного маршрута и приблизительно $\kappa = \alpha_A - 90^\circ$ (где α_A — дирекционный угол направления маршрута). Для определения по снимку дирекционного угла направления съемки можно воспользоваться опорными точками. Выбирают две из них, определяющие направление, приблизительно параллельное оси x снимка. Например, точки 1 — 2 или 3 — 4 на рис. 5.8.

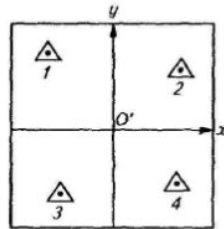


Рис. 5.8. Пример использования опорных точек для определения приближенного значения угла κ и плановых координат центра проекции

По координатам этих опорных точек вычисляют дирекционный угол этого направления. Затем его используют для вычисления приближенного значения угла κ . Для определения приближенных значений координат центра проекции также можно воспользоваться опорными точками. Плановые координаты (X^r_s, Y^r_s) центра проекции S совпадают с плановыми координатами проекции точки надира n (X^r_n, Y^r_n) . На плановом снимке точка надира n находится, как известно, вблизи начала системы координат снимка. Поэтому приближенные координаты проекции точки надира (X^r_n, Y^r_n) можно заменить координатами точки O' местности. Ее же приближенные плановые геодезические координаты определяются как среднее арифметическое соответствующих геодезических координат опорных точек:

$$X^r_s = (X^r_1 + X^r_2 + X^r_3 + X^r_4)/4,$$

$$Y^r_s = (Y^r_1 + Y^r_2 + Y^r_3 + Y^r_4)/4.$$

Высотную координату центра проекции Z^r_s определяют как сумму средней высоты опорных точек и высоты фотографирования:

$$Z^r_s = (Z^r_1 + Z^r_2 + Z^r_3 + Z^r_4)/4 + H,$$

где

H — высота фотографирования, $H = mf$ (здесь m — знаменатель среднего масштаба снимка, который также можно вычислить с помощью опорных точек, $m = L/l$, где L — расстояние между опорными точками i и j на местности, а l — расстояние между теми же опорными точками на снимке).

В результате для всех шести элементов внешнего ориентирования снимка вычислены приближенные значения, которые будут уточняться в процессе решения обратной фотограмметрической засечки методом функциональной итерации.

5.7. Цифровые модели рельефа

Цифровая модель рельефа (ЦМР) — это цифровое представление земной поверхности как непрерывного явления, описывающее ее с определенной точностью. Под ЦМР понимают множество точек с известными геодезическими координатами (X^T , Y^T , Z^T) и правило определения высоты Z^T любой другой точки, не входящей в это множество. Точки с известными геодезическими координатами в данном случае принято называть высотными пикетами. Правило определения высоты называют правилом интерполяции высот, или *аналитической моделью рельефа* (АМР).

Методы построения цифровых моделей рельефа различают по схемам расположения высотных пикетов и по способам интерполяции высот в промежутках между ними.

По схемам расположения высотных пикетов ЦМР делят на регулярные, полурегулярные и структурные.

В *регулярных моделях* высотные пикеты расположены в узлах сеток квадратов, прямоугольников или равносторонних треугольников (рис. 5.9, а). Недостатком этих моделей является то, что наиболее значимые точки рельефа, находящиеся на линиях гальвегов и водоразделов, перегибах скатов, могут оказаться между узлами сетки и не отобразиться на ЦМР. В связи с этим важно выбрать оптимальный шаг сетки, так как с его увеличением возрастают погрешности ЦМР, а с уменьшением — объем ЦМР, время и средства на ее создание.

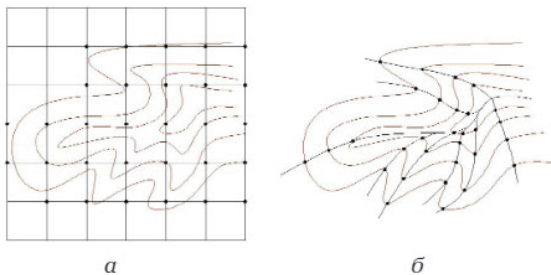


Рис. 5.9. Регулярные (а) и структурные (б) цифровые модели рельефа

Для наиболее правильного описания рельефа, с использованием меньшего числа высотных пикетов, создают *структурные* ЦМР (рис. 5.9, б). В этих моделях положение высотных пикетов определяется структурой рельефа — их выбирают в его характерных точках.

В *полурегулярных моделях* (рис. 5.10) высотные пикеты располагают на поперечниках к заданным линиям. Пикеты могут находиться на поперечниках либо на одинаковых расстояниях друг от друга,

либо на перегибах скатов. Полурегулярные ЦМР в основном используют при проектировании трасс линейных сооружений (дорог, линий электропередачи, нефте- и газопроводов и т. п.).

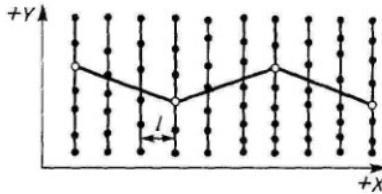


Рис. 5.10. Полурегулярная цифровая модель рельефа

Координаты высотных пикетов, используемых для построения ЦМР, могут быть получены в результате полевых геодезических измерений, по топографическим картам, по результатам воздушного и космического лазерного сканирования, путем стереофотограмметрической обработки снимков.

Для определения высот точек, находящихся между пикетами, применяют различные способы линейного и нелинейного интерполирования.

При использовании регулярных ЦМР с малым шагом сетки высоты промежуточных точек можно определить двойным линейным интерполированием (рис. 5.11).

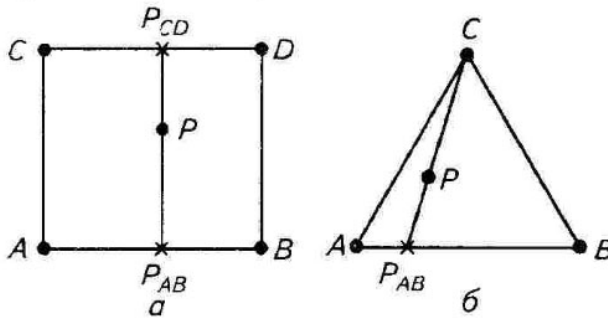


Рис. 5.11. Определение высот точек методом интерполирования:

- а) вычисляют высоты точек P_{CD} и P_{AB} интерполированием соответственно по линиям CD и AB и высоту точки P интерполированием по линии $P_{CD}P_{AB}$;
- б) вычисляют высоту точки P_{AB} интерполированием по линии AB и высоту точки P интерполированием по линии CP_{AB} .

Высота i -й точки с плановыми координатами (X_i, Y_i) может быть определена с использованием полинома первой, второй и реже третьей степени. Например,

$$Z_i = a_0 + a_1 X_i + a_2 Y_i + a_3 X_i Y_i + a_4 X_i^2 + a_5 Y_i^2. \quad (5.10)$$

Полный полином второй степени содержит шесть неизвестных коэффициентов a_i . Эти коэффициенты определяют, решая систему уравнений вида (5.10), составленных для высотных пикетов, находящихся вблизи определяемой i -й точки с координатами (X_i, Y_i) . Для каждой определяемой точки подбирают свой полином, который может отличаться как коэффициентами, так и числом входящих в него членов. Выбор высотных пикетов, используемых для вычисления коэффициентов a_i , зависит от задаваемого радиуса R зоны их поиска.

В структурных ЦМР применяют, как правило, линейные методы интерполяции. Цифровые модели рельефа используют при изготовлении ортофотопланов, для создания оригинала рельефа в горизонталях и как самостоятельный слой в геоинформационных системах (ГИС).

5.8. Построение нерегулярной цифровой модели рельефа¹

Еще одним из способов цифрового представления рельефа является TIN-модель (Triangulated Irregular Network), включающая некоторую совокупность точек с известными высотными отметками, по которым проведена трехмерная модель рельефа. TIN-модель представляет собой сеть треугольников. Преимуществом TIN-модели является большая точность построения ортофотопланов с ее использованием.

Представление рельефа в виде TIN-модели предпочтительно с точки зрения точности и возможности использовать различную детализацию на различных участках моделируемой поверхности. Однако с точки зрения алгоритмической сложности построения и обработки такой модели ее использование существенно более трудоемко.

Обычно ЦМР строится на основе треугольной или прямоугольной сетки. Существуют принципиальные различия между использованием треугольной и прямоугольной сетки при построении ЦМР.

ЦМР на основе прямоугольной сетки построить легче, однако качество такой модели хуже. При построении ЦМР на основе прямоугольной сетки значения высот в узлах сетки вычисляют при помощи интерполирования значений высот исходных высотных пикетов, координаты которых попадают в некоторую окрестность около узловой точки сетки. Значения высоты в исходных высотных пикетах заданы с высокой точностью, а рассчитанные значения высоты в узлах прямоугольной сетки содержат погрешность. К тому же ЦМР на основе прямоугольной сетки не позволяет учитывать ограничения на форму рельефа, налагаемые структурными линиями. Эти недостатки отсутствуют в ЦМР на основе TIN-модели.

Модель рельефа, построенная на основе сети треугольников, обладает большей точностью, так как позволяет включить исходные

¹ В параграфе использованы авторские материалы А.С. Назарова.

высотные отметки и структурные линии в модель рельефа. *Структурными линиями* называют линии резкого изменения уклона. Они, как правило, совпадают с тальвегами, водоразделами, бровками оврагов и т. п. TIN-модели широко применяются в современных ГИС и фотограмметрических приложениях.

Применяемые в настоящее время способы построения цифровой модели поверхности в зависимости от принятой схемы размещения точек и типа математической модели можно условно разделить на две группы.

Первая группа объединяет способы, основанные на нелинейной интерполяции высот с использованием полиномов, сплайнов, корреляционных функций и т. п., различающиеся видом используемой функции, способом отбора исходных пунктов и т. п.

Параметры применяемой математической модели вычисляют по опорным точкам, а затем используют для интерполяции высот произвольных точек области моделирования по их плановым координатам.

Полиномиальные способы предполагают представление моделируемой поверхности полиномом вида (5.11)

$$A_i = Z_i = a_0 + a_1X_i + a_2Y_i + a_3X_iY_i + a_4X_i^2 + a_5Y_i^2 + \dots \quad (5.11)$$

При избыточном количестве высотных пикетов для отыскания неизвестных коэффициентов полинома для каждой опорной точки составляют одно уравнение поправок, неизвестными в котором являются коэффициенты полинома. Полученную систему решают последовательными приближениями, в каждом из которых неизвестные находят методом наименьших квадратов, под условием $[pv^2] = \min$. Найденные таким образом коэффициенты $a_0 - a_5$ используют для интерполяции высот произвольных точек области моделирования.

Кусочно-полиномиальные способы предполагают деление области моделирования на участки, подбор для каждого участка своего локального полинома и последующую связь локальных полиномов с помощью переходных уравнений. Во всех случаях возникают переопределенные системы уравнений, решение которых выполняют методом наименьших квадратов, под условием минимума суммы квадратов расхождений высот точек реальной и аппроксимирующей поверхностей.

Вторая группа объединяет способы, основанные на построении геометрически упорядоченной модели, элементами которой являются либо определенным образом упорядоченные линии, либо поверхности различных многогранников (треугольников, четырехугольников или иных фигур). Во втором случае поверхность задается точками в вершинах геометрических фигур (треугольников, квадратов и др.) исходя из предположения, что ограничиваемая ими поверхность имеет одинаковый и однообразный уклон.

Различия между способами связаны со схемой расположения исходных точек и характером связей между ними.

Структурная модель местности представляется отметками точек, размещенных в характерных точках рельефа. Такая модель наиболее точно отражает поверхность минимальным числом точек, однако ее использование затруднено из-за сложности интерполяции высот определяемых точек.

Цифровую модель рельефа, построенную по пикетам, расположенным в вершинах треугольников и покрывающих всю область моделирования, называют *TIN-модель*. Модель представляет рельеф наиболее точно, поскольку обеспечивает плотное «прилегание» треугольников к моделируемой поверхности. В силу этого модель применяется очень широко и она известна как модель на нерегулярной сетке.

Использование модели TIN для получения высот новых точек не совсем удобно, поскольку для этого необходимо не только определить принадлежность определяемой точки конкретному треугольнику, но и, что особенно важно, выполнить линейную интерполяцию высот по отметкам его вершин.

Для практического использования более удобна модель на регулярной сетке со сторонами, параллельными координатным осям X и Y системы местности. Такая модель называется *регулярной* и известна как модель DEM (DigitalElevationModel), или матрица высот. Эта модель не может быть построена непосредственно по точкам с известными отметками. Для этого используют либо полиномиальные методы, либо предварительно созданные на основе опорных точек другие модели — TIN, горизонталы и др. В первом случае отметки узлов регулярной сетки находят по известным параметрам полиномиальной функции, а во втором — линейной интерполяцией высот по ближайшим точкам сети треугольников или горизонталей.

Модель TIN основана на триангуляции Делоне, названной по имени автора — российского математика Б.Н. Делоне. Триангуляцией Делоне называют сеть треугольников, удовлетворяющую следующим условиям:

- внутри окружности, описанной вокруг любого треугольника, не попадает ни одна из исходных точек;
- сумма минимальных углов всех треугольников максимальна из всех возможных триангуляций;
- сумма радиусов окружностей, описанных около треугольников, минимальна среди всех возможных триангуляций.

Для приближения создаваемой модели рельефа к реальной поверхности в нее внедряют дополнительные элементы, обеспечивающие учет и отображение ее линейных и площадных структурных элементов. Такими дополнительными элементами являются широко используемые в топографии структурные линии, совокупность которых создает каркас триангуляции Делоне. Эти структурные линии внедряются в триангуляцию в качестве сторон треугольников (ребер

получаемого многогранника). Такие ребра называются *структурными* и в последующем не изменяются.

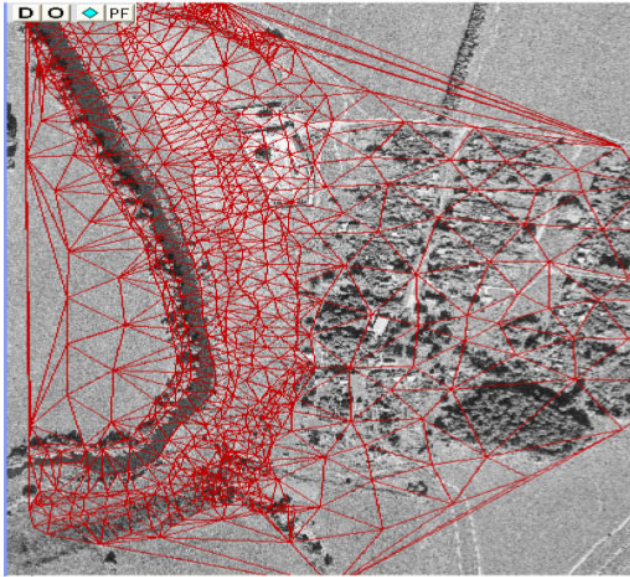


Рис. 5.12. TIN-модель рельефа

Модель TIN легко редактируется путем перемещения узлов, вставки новых, удаления имеющихся, изменения положения одного или нескольких ребер, внедрения новых структурных линий и др. Такие изменения всегда затрагивают небольшую группу смежных треугольников, не требуют перестроения всей сети и осуществляются в режиме реального времени по указанию курсором на соответствующий элемент.

5.9. Определение оптимального расстояния между высотными пикетами ЦМР

Как уже описано, при построении TIN-модели земная поверхность моделируется многогранником, каждой гранью которого является треугольник, близкий к равностороннему. Для некоторых из этих треугольников структурные линии являются сторонами.

Рассмотрим равносторонний треугольник ABC как грань полученной TIN-модели. Точки A, B, C — высотные пикеты ЦМР. Самое слабое место по высоте находится в точке, равноудаленной от его вершин, в точке K — точке пересечения серединных перпендикуляров к сторонам рассматриваемого треугольника ABC (рис. 5.13).

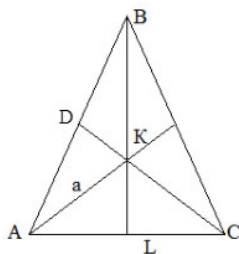


Рис. 5.13. Треугольник TIN-модели рельефа

Поставим задачу — определить оптимальную длину L стороны треугольника, при которой остаточное смещение точки K за рельеф не превзойдет допустимой величины δ_h . Пусть $AC = L$. Для нахождения длины стороны L рассмотрим равносторонний треугольник $\triangle ABC$. Как известно, в равностороннем треугольнике серединные перпендикуляры к сторонам являются также высотами, медианами и биссектрисами, а точка их пересечения делит их в отношении 1:2. Поэтому $AK = 2KD$.

$$AK = \frac{2}{3} AD, \quad (5.12)$$

где

$$AD = \sqrt{AC^2 - CD^2}. \quad (5.13)$$

После подстановки стороны L в формулу (5.13) получим:

$$AD = \sqrt{L^2 - \left(\frac{1}{2} L^2\right)}. \quad (5.14)$$

Преобразовав формулу (5.14), получим:

$$AD = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot L. \quad (5.15)$$

Тогда с учетом формулы (5.15) выражение (5.12) преобразуется в вид:

$$AK = \frac{2}{3} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} L. \quad (5.16)$$

Отсюда:

$$L = \sqrt{3} \cdot AK. \quad (5.17)$$

Допустимое смещение за рельеф на плане находят по формуле:

$$\delta_h = \frac{r \cdot h}{f \cdot M_{\text{н}}}, \quad (5.18)$$

где

r — 1/2 диагонали рабочей площади снимка.

Из выражения (5.18) выразим h :

$$h = \frac{\delta_h \cdot f \cdot M_{на}}{r} \quad (5.19)$$

Выразим превышение между точками через угол наклона местности и горизонтальное проложение L_1 линии АК (рис. 5.14).

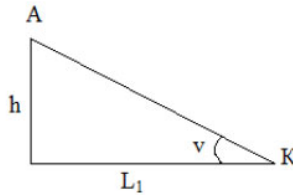


Рис. 5.14. Прямоугольный треугольник

$$h = L_1 \operatorname{tg} v, \quad (5.20)$$

приравняем правые части уравнений (5.19) и (5.20):

$$\frac{\delta_h \cdot f \cdot M_{на}}{r} = L_1 \cdot \operatorname{tg} v. \quad (5.21)$$

Из равенства (5.21) выразим горизонтальное проложение:

$$L_1 = \frac{\delta_h \cdot f \cdot M_{на}}{r \cdot \operatorname{tg} v}. \quad (5.22)$$

Тогда с учетом формулы (5.17) оптимальное расстояние между высотными пикетами ЦМР будет найдено по формуле:

$$L = \frac{\sqrt{3} \cdot \delta_h \cdot M_{на} \cdot f}{r \cdot \operatorname{tg} v}. \quad (5.23)$$

Уклон местности $\operatorname{tg} v$ при расчетах оптимального расстояния между высотными пикетами L целесообразно задавать максимальным для обрабатываемой территории. Для его определения можно использовать существующие топографические планы на эту территорию. Тогда максимальный уклон определяют с учетом минимального расстояния между горизонталями (l_{\min}), высоты сечения рельефа ($h_{\text{сеч.р.}}$) и знаменателя масштаба топографической карты (плана) ($M_{\text{карты}}$):

$$\operatorname{tg} v = \frac{h_{\text{сеч.р.}}}{l_{\min} \cdot M_{\text{карты}}}. \quad (5.24)$$

В этом случае формула (5.23) примет вид:

$$L = \frac{\sqrt{3} \cdot \delta_h \cdot f \cdot l_{\min} \cdot M_{\text{карты}} \cdot M_{на}}{r \cdot h_{\text{сеч.р.}}}. \quad (5.25)$$

Оптимальное расстояние между высотными пикетами ЦМР зависит от уклона местности, масштаба создаваемого плана, фокусного расстояния АФА, формата снимка и величины допустимого остаточного смещения за рельеф на ортофотоплане, которая не должна превышать 0,3 мм в масштабе создаваемого плана.

5.10. Определение высотной координаты точки местности по ее изображению на снимке и ЦМР

Прямое ортофототрансформирование снимков предполагает вычисление плановых геодезических координат точек местности по измеренным координатам их изображения на одиночном снимке. Эта задача решается с использованием предварительно определенных ЭВО обрабатываемого снимка и построенной ЦМР.

Определение Z_a точки местности осуществляется методом последовательных приближений.

По данным цифровой матрицы высот создают аналитическую модель рельефа:

$$Z^r = f(X^r; Y^r).$$

Для заданной точки измеряют ее координаты $(x; y)$ на обрабатываемом снимке. Затем, используя существующие планы и карты, определяют максимальную высоту Z^r на этом участке.

Присваивают этой точке местности максимально возможную для данной территории высотную координату Z^r_{max} .

Используя уравнения коллинеарности, записанные в системе координат местности, определяют плановые координаты (X_1, Y_1) точки А; исходными в этих уравнениях являются измеренные координаты $(x; y)$ точки а снимка и Z^r_{max} .

Вычисленные геодезические координаты (X_1, Y_1) используют для вычисления высотной координаты Z^r_1 в первом приближении, применяя аналитическую модель рельефа (АМР) как функцию зависимости высоты точки от ее плановых координат $Z^r = f(X^r; Y^r)$. Таким образом, вычисляют $Z^r_1 = f(X_1; Y_1)$.

На следующем этапе найденную высотную координату Z^r_1 используют в уравнениях коллинеарности для вычисления плановых геодезических координат заданной точки во втором приближении $(X_2; Y_2)$.

Вычисленные геодезические координаты $(X_2; Y_2)$ используют для вычисления по АМР высотной координаты Z_2 во втором приближении. Таким образом, заканчивается вторая итерация. На третьей и последующих итерациях происходит уточнение высотной координаты заданной точки местности. Итерационный процесс продол-

жается до тех пор, пока разность высот ΔZ , вычисленных в двух последних итерациях, не станет меньше заданной величины $\delta_{\Delta Z}$, т. е.

$$\Delta Z = Z_n - Z_{n-1} \leq \delta_{\Delta Z}$$

$\delta_{\Delta Z}$ определяют исходя из необходимой точности вычисления плановых координат точки местности (X^T ; Y^T) по построенной ЦМР.

Найденную величину Z_n принимают за высотную координату заданной точки с измеренными на снимке координатами (x ; y).

Геометрическая иллюстрация рассмотренного итерационного процесса представлена на рис. 5.15.

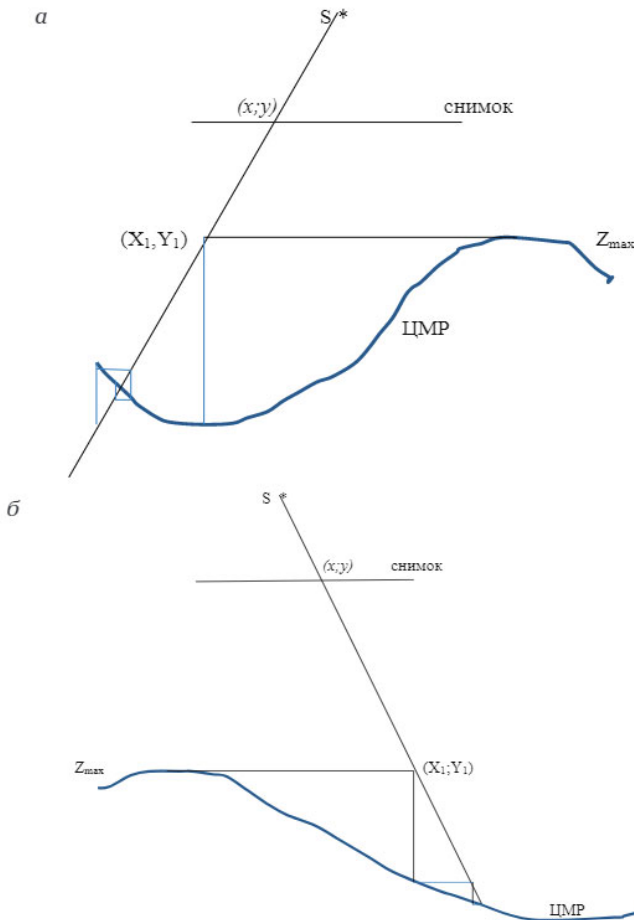


Рис. 5.15. Определение высоты Z точки местности по ее изображению на снимке с использованием ЦМР (геометрическая интерпретация):

a — при $\nu > 0$; b — при $\nu < 0$
 ν — угол наклона поверхности

5.11. Расчет параметров аэрофотосъемки при фотограмметрической обработке одиночного снимка

Выбор параметров АФС определяет прежде всего вид конечной плано-картографической продукции (контурный или топографический план) соответствующего масштаба, а также применяемая технология ее создания.

Поскольку в цифровых технологиях фотограмметрической обработки снимков основным результатом является вычисление геодезических координат точек местности, то выбор параметров АФС должен основываться на обеспечении требуемой точности их получения. Необходимая точность обусловлена типом задач, которые будут решать с помощью создаваемых плано-картографических материалов. Меньшая точность не позволит качественно решать поставленную задачу, избыточная ведет к увеличению материальных, трудовых и временных затрат.

В зависимости от выбранной технологии плано-картографическую продукцию можно изготовить на основе фотограмметрической обработки одиночного снимка либо стереофотограмметрической обработки.

Рассмотрим подробнее подход к выбору параметров АФС для каждого из этих двух способов.

Конечной продукцией могут быть цифровая модель ситуации (ЦМС) и ее производные (контурный план, фотоплан и т. п.). ЦМС не содержит информацию о рельефе, поэтому при ее создании предъявляются требования к точности плановых координат точек местности.

Использование современных типов аэрофотоплёнок с высокой разрешающей способностью и высококачественных объективов АФА позволяет применять большие коэффициенты увеличения $K = m/M$ (m — знаменатель масштаба съёмки; M — знаменатель масштаба создаваемого плана).

Большие коэффициенты увеличения дают возможность выполнять аэрофотосъёмку в масштабе мельче, чем создаваемые планы и карты. Экономически это выгодно: меньше число полученных снимков, покрывающих территорию, соответственно, сокращаются затраты на производство летно-съёмочных работ, расходы на фотоматериалы, химикаты, геодезическую привязку снимков и их фотограмметрическую обработку. Коэффициент увеличения может составлять 8 — 10 крат и более.

Таким образом, задавая масштаб создаваемого плана и возможный коэффициент увеличения, рассчитывают знаменатель масштаба аэрофотосъёмки по формуле $m = KM$.

Далее выбирают фокусное расстояние АФА и вычисляют высоту фотографирования, используя известное соотношение

$1/m = f/H$. Как видно из формулы, существует множество пар значений f и H , удовлетворяющих рассчитанному значению m . Выбирается такая пара значений, которая обеспечит получение требуемой точности определения плановых координат m_{XY} точек местности.

Для этого сначала рассчитывают значение фокусного расстояния АФА по формуле:

$$f_{расч} = hr / (2m_{XY}M), \quad (5.26)$$

где

h — перепад высот точек местности в пределах рабочей площади снимка;

r — расстояние от главной точки снимка до угла рабочей площади (при продольном перекрытии $p_x = 60\%$, поперечном перекрытии $p_y = 40\%$ и формате снимка 180×180 мм $r = 70$ мм);

m_{XY} — требуемая точность получения плановых координат, которую определяет масштаб создаваемого плана;

M — знаменатель масштаба создаваемого плана.

Значение фокусного расстояния АФА выбирают ближайшим большим к $f_{расч}$. Высоту фотографирования рассчитывают по формуле

$$H = fm,$$

при этом абсолютная высота фотографирования H_o не должна превышать потолка полета аэросъемочного самолета:

$$H_o = H + Z_{ср}$$

где

$Z_{ср}$ — среднее превышение снимаемого участка над уровнем моря.

Абсолютную высоту фотографирования используют как один из факторов, определяющих выбор типа самолета, — предельная высота полета самолета (потолок) должна быть не менее абсолютной высоты фотографирования H_o .

Пример. Рассмотрим расчет параметров аэрофотосъемки для создания кадастрового плана масштаба 1:2000 на территорию поселений с перепадом высот 15 м; допустимая точность получения плановых координат соответствует 0,3 мм в масштабе создаваемого плана; продольные и поперечные перекрытия соответственно равны $p_x = 60\%$ и $p_y = 40\%$; размер снимка 180×180 мм.

Примем возможный коэффициент увеличения $K = 5$. Таким образом, получаем знаменатель масштаба съемки $m = 5 \times 2000 = 10\,000$.

Исходя из заданных условий, вычислим фокусное расстояние $f_{расч}$ при этом будем считать, что перепад высот приходится на территорию, покрываемую одним снимком (критичный случай). Аргументы, входящие в формулу (5.26), будут равны: $h = 15$ м, $r = 70$ мм, $m_{XY} = 0,3$ мм, $M = 2000$.

Таким образом, $f_{расч} = 15 \text{ м} \times 70 \text{ мм} / (2 \times 0,3 \text{ мм} \times 2000) = 0,875 \text{ м} = 875 \text{ мм}$. Ближайшее большее стандартное значение фокусного расстояния АФА, $f = 1000 \text{ мм}$.

Зная знаменатель масштаба аэрофотосъемки и фокусное расстояние АФА, рассчитаем высоту фотографирования: $H = 1000 \text{ мм} \times 10\,000 = 10\,000 \text{ м}$.

В случае, когда рассчитанная высота фотографирования превышает потолок используемого аэрофотосъемочного самолета, необходимо либо уменьшить принятый коэффициент увеличения, либо выбрать АФА с меньшим фокусным расстоянием, а в последующей фотограмметрической обработке использовать цифровую модель рельефа.

Анализ формулы (5.26) показывает, что уменьшить $f_{расч}$ при тех же исходных данных можно, уменьшив расстояние r от главной точки снимка до угла рабочей площади (уменьшив рабочую площадь), то есть увеличив продольные и поперечные перекрытия снимков.

Если технические возможности позволяют импортировать в программу фотограмметрической обработки одиночного снимка цифровую модель рельефа, то точность используемой ЦМР должна обеспечить требуемую точность получения плановых геодезических координат точек местности m_{xy} . В этом случае минимально возможное фокусное расстояние АФА рассчитывается по формуле:

$$f_{расч} = \Delta h r / (2m_{xy}M), \quad (5.27)$$

где

Δh — точность построения ЦМР.

5.12. Технология создания векторного плана методом цифровой фотограмметрической обработки одиночного снимка (фрагмента снимка)

Фотограмметрическая обработка одиночного снимка состоит из нескольких этапов:

- подготовительные работы;
- ввод изображения;
- векторизация и корректировка векторизованного изображения;
- трансформирование векторизованного изображения;
- геометрическое объединение (сшивка) трансформированных снимков или их фрагментов;
- создание контурного плана.

Подготовительные работы включают подбор негативов, контактных снимков, существующих топографических планов и карт на объект работ. Также подбирают материалы полевой привязки

аэрофотоснимков и фототриангуляции. Кроме того, получают паспортные данные АФА (элементы внутреннего ориентирования, эталонные координаты меток и контрольных крестов, данные о дисторсии объектива) и параметры аэрофотосъемки (масштаб и высоту фотографирования). Если при производстве аэрофотосъемки на борту летательного аппарата были установлены GPS-приемники и инерциальные системы навигации, то в ходе подготовительных работ подбирают результаты обработки их показаний.

В качестве исходного изображения при фотограмметрической обработке можно использовать негативы аэрофильма, дешифрованные снимки или их увеличенные фрагменты.

Ввод изображения осуществляют преимущественно сканированием. Выбирают сканирующее устройство по ряду критериев: требуемым техническим характеристикам (разрешающая способность, позиционная точность) и соотношению цена/производительность.

Рассчитывают необходимые технические характеристики сканера следующим образом. Минимальная линейная разрешающая способность может быть определена по линейной разрешающей способности обрабатываемых снимков. Например, в случае использования снимков с разрешающей способностью $25-30 \text{ мм}^{-1}$ минимальный элемент изображения на снимке будет иметь размер $1/50-1/60 \text{ мм}$, т. е. приблизительно $0,02 \text{ мм}$. Во избежание потери информации при сканировании необходимо, чтобы на минимальный элемент изображения приходилось не менее двух пикселей. Требуемая разрешающая способность сканера в этом случае будет составлять $2 \times 25,4 \text{ мм} / 0,02 \text{ мм} = 2500 \text{ dpi}$.

Позиционная точность сканера должна быть не хуже требуемой точности измерения координат на снимке, которая составляет примерно $2-5 \text{ мкм}$. Такой высокой позиционной точностью обладают лишь дорогостоящие фотограмметрические сканеры. Однако использование программ геометрической коррекции раstra позволяет применять непрофессиональные офисные сканеры при фотограмметрической обработке снимков.

Векторизация — процесс представления результатов дешифрирования в векторной форме. Векторизацию можно осуществлять в ручном, полуавтоматическом и автоматическом режимах.

При ручной векторизации оператор курсором последовательно обходит все поворотные точки границ контуров дешифрованных объектов. Эту операцию проводят на экране монитора с помощью «мыши». При этом автоматически записываются в память компьютера координаты (x, y) этих точек. Ручную векторизацию можно выполнять в случае сканирования дешифрованного изображения, а также в случае ввода недешифрованного изображения, например, негативов аэрофильма. В таком варианте дешифрирование про-

водят на увеличенных снимках, и его результаты оператор переносит на сканированное изображение в процессе векторизации.

Полуавтоматическую векторизацию *выполняют* на дешифрированном сканированном изображении. Оператор наводит курсор на одну из точек границы контура на экране монитора. При этом автоматически записываются координаты (x, y) всех поворотных точек границы указанного контура.

При автоматической векторизации происходит автоматическое считывание координат поворотных точек границ всех дешифрированных объектов. В этом случае оператор лишь контролирует и при необходимости корректирует данный процесс.

Кроме того, при векторизации по материалам привязки или фототриангуляции на сканированное изображение переносят опорные точки. При этом осуществляется автоматическое измерение их координат. В ряде случаев на сканированном изображении указываются координатные метки.

Координатные метки позволяют перейти из системы координат монитора, в которой происходит автоматическое измерение координат точек снимка, в систему координат снимка. Такой переход не всегда обязателен. Его необходимость зависит от используемого алгоритма решения обратной фотограмметрической засечки.

Корректировка векторизованного изображения заключается в исключении погрешностей процесса векторизации. Такими погрешностями могут быть незамкнутость границ контуров, наличие двойных линий границ, выходы границ в точках пересечения и т. п. Корректировка выполняется автоматически. Оставшиеся после этого погрешности устраняет оператор.

Способы векторизации

Векторизаторы — программное обеспечение, включающее функции обработки растровых изображений, ручного ввода и полуавтоматической трассировки контуров и линий объектов.

Трассировка — интерактивная процедура, позволяющая провести векторизацию растрового изображения любого типа, выполняя растровую трассировку. Трассировка основана на технологии локального распознавания растровых геометрических примитивов, с помощью которой программа идентифицирует растровые линии как отрезок, дугу или окружность и генерирует соответствующие векторные объекты. Различают:

- *трассировку* с автоматическим определением типа объекта — программа автоматически выбирает наиболее подходящий для аппроксимации указанной растровой линии тип векторного объекта;
- *форсированную трассировку* — программа позволяет трассировать растровую графику векторными объектами заданного типа (отрезки, дуги, полилинии, окружности, символы, штриховки).

Программы, предназначенные для векторизации растра, имеют разные алгоритмы. Основные различия алгоритмов заключены в первом этапе — в выделении осевых линий. На втором этапе можно выделить следующие группы алгоритмов, основанных на:

- утончении линий;
- сопоставлении контуров;
- графах объектных штрихов;
- разбиении изображения регулярной сеткой;
- аппроксимации объектов растра площадными геометрическими фигурами и др.

Рассмотрим подробнее три группы из перечисленных алгоритмов.

Алгоритмы, основанные на утончении линий. Эти алгоритмы также называют *алгоритмами скелетизации*, или *алгоритмами приведения к центральной оси*. В результате их работы получают совокупность линий единичной длины, расположенных вдоль центральной оси исходного объекта на растре.

К операциям утончения предъявляются, как правило, три основных требования:

- связность объектов изображения и фона должна быть сохранена;
- концы средней линии должны располагаться как можно ближе к их истинному положению;
- центральные линии объектов должны быть выделены достаточно точно.

Алгоритмы данной группы, несмотря на достаточную проработанность, обладают высокой трудоемкостью и излишней детальностью при моделировании осевых линий в случае пересечений и ответвлений линий на растре (рис. 5.16).

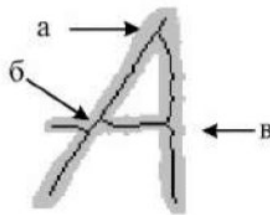


Рис. 5.16. Векторизация:

a — паразитные ответвления скелета; *б, в* — дефекты при моделировании ветвления и пересечения

Алгоритмы, основанные на сопоставлении контуров. Алгоритмы данного класса работают при предположении, что изображение содержит в основном прямые линии. Производится аппроксимация отрезками границ между объектами. Затем для каждого отрезка

делается попытка найти «вторую сторону линии» — другой, почти параллельный ему отрезок, ограничивающий область того же цвета, находящийся на расстоянии меньше заданного порога (максимальная ширина линии). После нахождения двух сторон линии строится осевая линия. В случаях ответвления линий под малым углом, либо когда одному граничному вектору можно сопоставить несколько противоположных векторов, либо когда изображение содержит изогнутые линии, алгоритмы данного класса дают неоднозначные решения.

Алгоритмы, основанные на графах объектных штрихов раstra. Основная идея данных методов заключается в том, что на основе последовательного просмотра раstra и анализа объектных пикселей в строках и столбцах раstra строится компактное векторное представление растрового изображения. Затем, просматривая это представление, создается детальная векторная модель раstra.

Для этого вводят понятие штриха как последовательности объектных пикселей, расположенных друг за другом в одном столбце или в одной строке, и ограниченной с обеих сторон фоновыми пикселями. Ортогональной координатой штриха является номер столбца, в котором расположен вертикальный штрих, либо номер строки в случае горизонтального штриха. Путем двукратного просмотра раstra находятся все объектные штрихи. После этого производится поиск объектных ребер как последовательностей смежных штрихов. Найденные объектные ребра приводятся к «скелетному» виду — к линиям одинарной толщины.

Достоинство данной методики — эффективность по времени. К недостаткам данного метода относятся неточная обработка точек ветвления и неточная обработка кривых линий.

После процесса векторизации следует процесс трансформирования. Для опорных точек создается файл их геодезических координат. Кроме того, оператор вводит при необходимости приближенные значения элементов внешнего ориентирования снимка. По известным зависимостям автоматически решается обратная фотограмметрическая засечка. Контролем решения задачи ориентирования снимка являются остаточные расхождения в геодезических координатах опорных точек. Эти расхождения в плановых координатах не должны превышать 0,2 мм в масштабе создаваемого плана, а по высоте не превышать $1/5$ высоты сечения рельефа. Недопустимые расхождения на опорных точках возникают из-за их неправильной идентификации на экране монитора, ошибок создания файла геодезических координат и файла элементов внутреннего ориентирования, а также возможных ошибок определения приближенных значений элементов внешнего ориентирования. При избыточном числе опорных точек можно не искать возникшую ошибку, а исключить из процесса обработки опорные точки с недопустимыми рас-

хождениями. Оставшиеся опорные точки должны удовлетворять необходимым требованиям для решения задачи ориентирования снимка или его фрагмента.

При допустимых расхождениях на опорных точках переходят к решению прямой фотограмметрической засечки для всех точек векторизованного изображения.

Сведения о рельефе, необходимые при решении прямой фотограмметрической засечки по одиночному снимку, могут быть получены из ЦМР, которую предварительно импортируют из других программ. В случае равнинной местности рельеф представляется либо горизонтальной плоскостью, высота которой равна среднему арифметическому из высот опорных точек, либо наклонной плоскостью, наименее удаленной по высоте от опорных точек. Уравнения этих плоскостей вычисляют по координатам опорных точек автоматически.

Полученные трансформированные снимки или их увеличенные фрагменты *объединяются* (сшиваются) в общее электронное изображение. По линиям их соединения могут возникать расхождения в плановом положении одних и тех же контуров. Расхождения считаются допустимыми, если они не превышают 1 мм в масштабе создаваемого плана. В этом случае необходимо выполнять сводку контуров по границам объединяемых изображений, аналогично процедуре сводки по планшетам при геодезической съемке.

Главная причина возникновения расхождений контуров — рельеф, а точнее, создаваемые и используемые при решении прямой фотограмметрической засечки модели рельефа. Плановые координаты одной и той же точки контура, лежащей на линии объединения двух трансформированных изображений, вычисляют, используя высоты, полученные из моделей рельефа соответственно для первого и второго снимков. Если их высоты не равны, то вычисленные координаты (X , Y) точки контура на первом и втором снимках также будут различаться. Поэтому возникает расхождение контуров на линии объединения. Различия в координатах будут тем больше, чем больше разница между высотами, полученными из двух моделей, и чем дальше точка контура находится от точек надира трансформированных снимков. Для уменьшения работ по сводке объединенных изображений линию сшивки целесообразно выбирать по возможности вдоль линейных объектов (дорог, рек, улиц в поселениях и т. п.). В результате объединения получают единое трансформированное электронное изображение на всю картографируемую территорию или ее часть.

Далее по материалам дешифрирования проводят процедуру присвоения каждому выделенному контуру условных знаков. После этого в автоматическом режиме выполняют разделение единого плана на планшеты в соответствии с государственной разграфкой, принятой для данного масштаба. В результате получают *контурный план*.

Технология создания фотоплана на территории сельских населенных пунктов (предложена профессором Б.Н. Родионовым). Данная технология базируется на теоретическом обосновании и выводах, выполненных в главе 4. Сельскими фотопланы называются потому, что они используются для организации и управления сельскохозяйственным производством, обеспечивая достаточную точность определения длин линий и площадей. Технология создания подобных фотопланов предельно проста и экономична. Они изготавливаются и передаются пользователю в кратчайшие сроки после аэрофотосъемки. Суть технологии заключается в минимизации влияния угла наклона снимка и рельефа при аэрофотографировании. Аэрофотоснимки получают с высотных реактивных самолетов, обеспечивающих без гиостабилизирующих установок углы наклона не более 1° с высоты 10 км аэрофотоаппаратами с фокусным расстоянием объектива 1000 мм. Полученные снимки увеличивают до масштаба выпускаемых сельских фотопланов, равного 1:2000. Печать осуществляется на листах бумаги размером 50×60 или 60×60 см. Один такой лист покрывает на местности участок площадью 120 или 144 га. Для большинства регионов центрально-европейской части России в пределах такой площади редко встречается перепад высот более 40 м, то есть отклонение от средней секущей плоскости не более 20 м. При таких высотах участков местности и высоте аэрофотографирования 10 км влиянием рельефа можно пренебречь. При значительном рельефе размер листа фотоплана уменьшают так, чтобы на местности, изображенной на нем, разность высот была не более заданной величины. Каждый лист масштабируется отдельно. Точность получаемых таким способом фотопланов не ниже $1/100$. На этом процесс фотограмметрической обработки заканчивается. Пользователи, а ими являются сотрудники местных администраций, кадастровых и архитектурных управлений и т. п., получают для работы материалы, соответствующие современному состоянию территории и достаточной точности.

Сельские фотопланы называют также свободными, так как они изготавливаются без опорных точек, имеющих геодезические координаты. Поэтому на них нет сетки геодезических координат и рамок трапеций государственной разграфки. Разграфку листов фотопланов проводят в соответствии с границами населенного пункта и кварталов застройки. На лицевой стороне каждого листа указывают направление на север и средний масштаб 1:2000, название населенного пункта и порядковый номер листа, если изображение населенного пункта размещается на нескольких листах. На оборотной стороне приводят схему взаимного расположения листов. Для обеспечения более высокой точности измерений следует выпускать сельские фотопланы в масштабе 1:1000 и 1:500, для чего потребуются выполнение аэрофотосъемки в более крупных масштабах. Разумеется, при этом значительно возрастут материальные и трудовые затраты.

Сельские фотопланы могут служить основой для создания кадастровых планов. При небольших навыках работы с фотоизображением с помощью сельских фотопланов сотрудники администраций могут определять линейные и площадные размеры участков, решать спорные вопросы о границах соседних земельных участков, устанавливать и восстанавливать границы, определять самозахваты земель и использование земель не по назначению, проводить инвентаризацию земель и т. п.

Технология создания базовых планов состояния и использования земель (в том числе сельских населенных пунктов) на основе обработки фрагментов увеличенных снимков. Рассмотрим два варианта данной технологии. Эти варианты различаются последовательностью выполнения этапов дешифрирования и фотограмметрических преобразований.

В *первом варианте* дешифрирование предшествует фотограмметрической обработке. Для этого после аэрофотосъемки выполняют увеличенную печать фрагментов снимков с помощью прецизионных фотоувеличителей на недеформируемой фотографической бумаге. Таким образом, дешифрирование выполняется на разномаштабных фотоизображениях. Фотограмметрические преобразования дешифрированных снимков проводят для границ дешифрированных контуров в векторной форме.

Во *втором варианте* аэроснимки (негативы) сканируют, полученные растровые изображения трансформируют, выводят на печать с помощью картографических плоттеров. После этого производят дешифрирование одномасштабных изображений.

Остановимся на содержании отдельных видов работ данной технологической схемы.

На подготовительном этапе осуществляется сбор планово-картографических материалов на территорию работ, изучается наличие пунктов геодезической сети, рельеф, дорожная сеть, водные объекты, природно-климатические особенности района работ и т. п. В соответствии с требуемой точностью создаваемых планов выполняется расчет параметров аэрофотосъемки, выбираются типы аэрофотоаппаратов, сроки производства аэрофотосъемочных работ.

Планы населенных пунктов изготавливают в масштабе 1:500 — 1:2000, аэрофотосъемку же производят в масштабах в 5 — 10 раз мельче. Технические характеристики отечественных аэрофотоаппаратов и пленок позволяют выдерживать соотношение съемочного масштаба и плана до 5 крат. Применение съемочных средств и материалов зарубежных фирм увеличивает это соотношение до 10 и более крат. Фокусное расстояние объектива АФА выбирается возможно большим, и, соответственно, съемка выполняется с больших высот.

Документами, используемыми при составлении проектов и графиков выполнения основных видов работ, являются: договор с за-

казчиком, календарный план сдачи продукции, аэроснимки и репродукции накидного монтажа новой аэро съемки. При планировании используют схемы геодезической сети, каталоги координат пунктов геодезической сети, существующие планы и карты, материалы аэрофотосъемок прошлых лет и др. Технический проект составляется опытными высококвалифицированными специалистами. В проекте рассчитываются трудовые и денежные затраты по каждому виду камеральных и полевых работ и составляются графики их выполнения. На графиках указывают трапеции или участки и сроки выполнения работ. Графики позволяют установить взаимосвязь между отдельными видами работ, оптимально распределить специалистов, осуществлять контроль сроков выполнения и сдачи продукции заказчику.

Изготовление фрагментов увеличенных снимков производится с помощью специальных прецизионных проекционных приборов, имеющих оптические системы с высокой разрешающей способностью и малой дисторсией. В качестве таких увеличителей могут быть использованы фототрансформаторы. Увеличенные фрагменты печатают с небольшим перекрытием, обеспечивающим нахождение в них общих для фрагментов снимка опорных точек. Выбранные точки будут использованы в дальнейшей обработке для объединения изображений в единый электронный базовый план.

Привязка фрагментов увеличенных снимков имеет некоторые методические особенности. В соответствии с наставлениями по созданию базовых планов первоначально производится создание опорной межевой сети (ОМС) в данном населенном пункте. Для этого на местности закрепляют опорные межевые знаки (ОМЗ), координаты которых определяют в общегосударственной или условной системе координат. Среднеквадратическая погрешность положения межевого знака относительно пунктов государственной геодезической сети не более 0,1 мм в масштабе создаваемого плана. Средняя квадратическая погрешность взаимного положения опорных межевых знаков составляет не более 0,05 мм в масштабе создаваемого плана. К пунктам ОМЗ осуществляется геодезическая привязка фрагментов увеличенных снимков. Опорные точки располагают на увеличенных фрагментах снимков по границе изображенного на них поселения, а также в зонах перекрытия фрагментов. Для повышения точности и надежности фотограмметрической обработки снимков количество опорных точек увеличивают до 6–8. При значительных уклонах местности для учета влияния рельефа опорные точки размещают внутри участка населенного пункта, как правило, координируя углы кварталов, однозначно идентифицируемых на изображении.

В случае, когда базовые планы создают в условной системе координат и нет необходимости их перевычисления в государственную геодезическую систему координат, возможно применение камеральной привязки снимков. Для этого используют старые планы и сним-

ки новой аэрофотосъемки. Масштаб используемых планов должен обеспечить требуемую точность определения координат опорных точек. На данных материалах намечают и идентифицируют опорные точки, затем по старым планам определяют их геодезические координаты и составляют каталоги координат. Такой способ привязки снимков уступает по точности полевой привязке. Однако затраты на камеральную привязку снимков или их фрагментов существенно меньше по сравнению с полевым способом.

Технологии ввода изображения, фотограмметрической обработки одиночных снимков и фрагментов увеличенных снимков, геометрическое объединение (сшивки) снимков или фрагментов рассмотрены в соответствующих разделах.

Редактирование электронного плана предусматривает в основном устранение погрешностей ввода изображения. Ввод изображения, как уже рассмотрено ранее, осуществляется с помощью сканера. В этом случае от растрового изображения, полученного при сканировании снимков (или фрагментов), переходят к векторному. Этот процесс называют векторизацией. Первичное векторное изображение имеет пропуски, разрывы контуров, различные шумы (дублирование линий, образование малых замкнутых фигур в точках пересечения и т. п.). Для устранения погрешностей используют специальный программный редактор и ручную коррекцию. На этом же этапе по результатам полевых обмеров на экране монитора наносят не изобразившиеся при аэрофотосъемке объекты.

Перенос результатов дешифрирования заключается в следующем. Используя дешифрованные увеличенные фрагменты снимков, материалы полевого обследования (декларации, полевые журналы) и иную информацию, оператор присваивает каждому контуру электронного плана семантическую характеристику. Для этого оператор из программного классификатора вызывает обозначение определенного класса объектов, устанавливает курсор на обучаемый контур и нажатием кнопки «мыши» завершает операцию. Классифицированный контур окрашивается в соответствующий цвет или заполняется условными знаками. Выполнив подобную операцию с каждым контуром, составляют экспликацию земель в границах населенного пункта. Сумма площадей земель по классам и площадь поселения в его границах должны быть равны.

В результате выполнения рассмотренных технологических этапов создается базовый план. При сдаче заказчику базового плана оцениваются следующие показатели:

- точность метрической информации (сравниваются геодезические координаты или длины, полученные с плана и в результате полевых измерений);
- достоверность семантической информации;

- сводный баланс земель в границах поселения;
- отражение фактической ситуации в отношении сложившихся границ и использования земельных участков.

После создания базового плана приступают к организации банка (базы) земельно-кадастровой информации. Базовый план при этом является картографической основой и предназначен для пространственного размещения земельно-кадастровой информации. Перечень сведений, подлежащих сбору и отражению в информационной базе, определяется нормативно-техническими документами и (или) техническим заданием.

Результатами работ, выполняемых в соответствии с рассмотренной технологической схемой, являются:

- кадастровые планы на населенные пункты (планшеты с разграфкой в масштабах 1:500 – 1:2000);
- планы отдельных земельных участков (с указанием владельца, фактической площади, длин линий, румбов сторон участка, смежников);
- база земельно-кадастровой информации.

Материалы могут быть представлены заказчику на электронном носителе или на бумажной основе. Для исключения погрешностей при печати тиражирование на бумажном носителе выполняется с помощью прецизионных плоттеров.

Технологическая схема создания базовых планов по второму варианту имеет преимущества перед ранее рассмотренной схемой. В ней отсутствует фотографическая печать фрагментов увеличенных снимков. Камеральное дешифрирование выполняется на экране монитора, что позволяет увеличивать изображение, изменять его контрастность, повышая проработку деталей в тенях, и более надежно идентифицировать поворотные точки границ земельных участков. При полевом дешифрировании используется одномасштабное частично дешифрированное фотографическое изображение, полученное в результате компьютерного увеличения цифрового изображения. Одномасштабность изображения позволяет точнее наносить неизобразившиеся объекты или их элементы по данным линейных промеров. Отпадает необходимость ведения полевого журнала измерений. При создании плана по рассмотренной технологической схеме снижаются затраты и ускоряется выпуск конечной продукции.

Контрольные вопросы

1. Почему для аналитического трансформирования одиночного снимка в большинстве случаев необходимо создание ЦМР? Ответ обосновать аналитически.

2. Как расположение зоны обработки снимка (центральная, периферийная) влияет на точность построения ЦМР?
3. Можно ли решить обратную фотограмметрическую засечку с использованием только плановых опорных точек?
4. Почему при аналитическом решении некоторых фотограмметрических задач в исходные данные включают приближенные значения искомым величин?

Тесты

1. Масштаб наклонного снимка равнинной местности остается постоянным
 - а) вдоль главной вертикали;
 - б) вдоль фотограмметрических горизонталей;
 - в) по всей площади снимка.
2. Масштаб наклонного снимка равнинной местности равен главному масштабу снимка
 - а) вдоль главной вертикали;
 - б) вдоль линии неискаженных масштабов;
 - в) по всей площади снимка.
3. Что такое главная точка снимка?
 - а) точка пересечения главного луча с плоскостью снимка;
 - б) точка пересечения отвесного луча с плоскостью снимка;
 - в) точка пересечения биссектрисы угла наклона снимка с плоскостью снимка.
4. Что такое точка надира снимка?
 - а) точка пересечения главного луча с плоскостью снимка;
 - б) точка пересечения отвесного луча с плоскостью снимка;
 - в) точка пересечения биссектрисы угла наклона снимка с плоскостью снимка.
5. Что такое точка нулевых искажений?
 - а) точка пересечения главного луча с плоскостью снимка;
 - б) точка пересечения отвесного луча с плоскостью снимка;
 - в) точка пересечения биссектрисы угла наклона снимка с плоскостью снимка.
6. Смещение точек за рельеф увеличивается
 - а) с увеличением фокусного расстояния;
 - б) с уменьшением фокусного расстояния;
 - в) не зависит от фокусного расстояния.

7. Чтобы уменьшить влияние рельефа целесообразно использовать АФА
- а) с коротким фокусным расстоянием;
 - б) с длинным фокусным расстоянием;
 - в) с любым фокусным расстоянием.
8. Система координат снимка имеет начало
- а) в точке надира;
 - б) в главной точке снимка;
 - в) в точке пересечения координатных осей.
9. Что определяют элементы внутреннего ориентирования снимка?
- а) положение точки надира на снимке;
 - б) положение снимка в пространстве;
 - в) положение центра проекции в системе координат снимка.
10. Что определяют элементы внешнего ориентирования снимка?
- а) положение точки надира на снимке;
 - б) положение снимка в пространстве;
 - в) положение центра проекции в системе координат снимка.
11. Какие из перечисленных элементов ориентирования снимка являются элементами внутреннего ориентирования?
- а) $x_o; y_o; f_i$
 - б) $\alpha; \omega; \kappa;$
 - в) $X_S^T; Y_S^T; Z_S^T$
12. Какие из перечисленных элементов ориентирования снимка являются линейными элементами внешнего ориентирования?
- а) $x_o; y_o; f_i$
 - б) $\alpha; \omega; \kappa;$
 - в) $X_S^T; Y_S^T; Z_S^T$
13. Какие из перечисленных элементов ориентирования снимка являются угловыми элементами внешнего ориентирования?
- а) $x_o; y_o; f_i$
 - б) $\alpha; \omega; \kappa;$
 - в) $X_S^T; Y_S^T; Z_S^T$
14. С какой точностью определяются элементы внутреннего ориентирования снимка в процессе калибровки АФА?
- а) 1 см;
 - б) 1 мм;
 - в) 1 мкм.

15. Что такое прямая фотограмметрическая засечка?
- а) определение координат точек местности по измеренным координатам на снимке;
 - б) определение элементов внешнего ориентирования снимка по опорным точкам;
 - в) определение элементов внутреннего ориентирования снимка.
16. Что такое обратная фотограмметрическая засечка?
- а) определение координат точек местности по измеренным координатам на снимке;
 - б) определение элементов внешнего ориентирования снимка по опорным точкам;
 - в) определение элементов внутреннего ориентирования снимка.
17. Что такое цифровая модель рельефа?
- а) совокупность точек с известными геодезическими координатами;
 - б) уравнение, определяющее зависимость высотной координаты точки местности от ее плановых координат;
 - в) множество точек с известными геодезическими координатами и правило интерполирования высот между ними.
18. Для решения прямой фотограмметрической засечки по одиночному снимку необходимо: (отметить ненужное)
- а) знать элементы внешнего ориентирования снимка;
 - б) измерить координаты точки на снимке;
 - в) выполнить взаимное ориентирование снимков.
19. Для решения обратной фотограмметрической засечки необходимы
- а) связующие точки;
 - б) опорные точки;
 - в) определяемые точки.
20. Опорные точки при фотограмметрической обработке снимков
- а) точки, находящиеся в зоне двойного продольного перекрытия;
 - б) точки, находящиеся в зоне тройного продольного перекрытия;
 - в) точки на снимке с известными геодезическими координатами.
21. Связь координат точек снимка с геодезическими координатами точек местности выражается уравнениями:
- а) компланарности;
 - б) коллинеарности;
 - в) равенства масштабных коэффициентов.

Глава 6. Теория стереофотограмметрической обработки топографических снимков

Цели изучения:

- знать условия получения стереоскопического эффекта, элементы взаимного и внешнего ориентирования пары снимков, основы стереофотограмметрической обработки снимков, фототриангуляции, построения цифровой модели рельефа, иметь представление о математической основе обработки космических снимков;
- знать технологическую схему создания ортофотоплана.

6.1. Возможности зрительного аппарата человека

Метрическая информация, извлекаемая из одиночных снимков, может быть только двумерной, например, размеры объектов в плане, площадь участков и т. п., если не считать определения высот объектов косвенным путем по изображению падающих от них теней или по отображающимся иногда на краях снимка боковым элементами возвышающихся объектов.

Человек, наблюдая окружающее пространство одним глазом, воспринимает его также двумерно, не ощущая глубины пространства. О пространственном расположении объектов по глубине наблюдатель судит по изменению их размеров или перекрытию дальних объектов ближними. То же пространство, наблюдаемое двумя глазами, воспринимается объемным (трехмерным).

Глаз человека представляет собой совершенный биологический орган, сравнимый по геометрическим и оптическим параметрам с оптико-электронной съемочной системой с сенсором в виде ПЗС-матрицы. Функцию объектива в глазу выполняет хрусталик, а пиксели ПЗС-матрицы — сетчатку, дискретно реагирующую на поступающее световое излучение палочками и колбочками.

При анализе и измерении снимков человек может рассматривать их непосредственно невооруженными глазами или с помощью оптических устройств. Выделяют три вида зрения — монокулярное, бинокулярное и стереоскопическое. Монокулярным называют зрение одним глазом, бинокулярным — двумя глазами. Зрение стереоскопическое — частный случай бинокулярного зрения. Наблюдатель при этом воспринимает пространственное расположение разнородных объектов. Разделение по видам не зависит от использования (или неиспользования) при наблюдении оптических устройств.

Важнейшие характеристики зрительного аппарата:

– линейное (геометрическое) разрешение (острота зрения, разрешающая сила зрения) — способность воспринимать (обнаруживать) мелкие элементы в натуре или на снимках;

– линейная (геометрическая) разрешающая способность — возможность раздельного восприятия ряда одинаковых элементов, например линий;

– энергетическое разрешение — способность воспринимать яркостные (тоновые) контрасты на снимке.

Рассмотрим каждую из указанных характеристик. Прежде отметим, что возможности зрительного аппарата существенно меняются в зависимости от формы наблюдаемых деталей. Принято определять эти возможности отдельно для случая наблюдения малых компактных деталей (зрение первого рода) и тонких линий (зрение второго рода).

Эмпирически установлено, что *линейное разрешение монокулярного зрения* первого рода в угловой мере при наблюдении контрастных деталей равны 40" и 20" соответственно. В линейной мере эти характеристики для расстояния наилучшего видения (250 мм) составляют $d_{к,м} = 0,050$ мм, $d_{л,м} = 0,025$ мм.

При малом контрасте $K = (B - B_{\phi})/B < 0,5$ эти характеристики снижаются (здесь B и B_{ϕ} — яркости детали и фона).

Линейное разрешение бинокулярного зрения при наблюдении контрастных деталей примерно в два раза больше, чем монокулярного.

Использование при наблюдении оптических систем позволяет улучшить характеристики зрительного аппарата примерно пропорционально кратности увеличения используемой системы.

Возможности обнаружения светлых деталей на темном фоне, при прочих равных условиях, значительно большие, чем темных деталей на светлом фоне (явление иррадиации). Например, космонавты невооруженным глазом с борта космического корабля наблюдали белые катера у морского причала вопреки расчетным возможностям.

Линейная разрешающая способность — характеристика зрительного аппарата, аналогична разрешающей способности объектива, выражается она числом раздельно воспринимаемых черных линий при той же толщине белых промежутков в одном миллиметре изображения. Для благоприятных условий при монокулярном наблюдении линейная разрешающая способность $R_m = 20$ мм⁻¹, при бинокулярном — $R_b = 40$ мм⁻¹.

Остротой стереоскопического зрения первого рода называют минимальную разность паралактических углов двух точек $\gamma_B - \gamma_D = \Delta\gamma$, при которой эти точки воспринимаются разнородными. Она равна примерно 30".

Аналогичное определение имеет острота стереоскопического зрения второго рода, но наблюдаемыми деталями здесь будут две параллельные линии. Численно острота стереоскопического зрения второго рода составляет 10".

6.2. Стереозффект и условия его получения

Метод стереофотограмметрической обработки снимков при создании планов и карт основан на использовании пары перекрывающихся снимков, называемых *стереопарой*. Стереопара обладает уникальными возможностями. Первое — при определенных условиях наблюдения пары снимков возможно получение виртуального объемного изображения из двух плоских изображений в зоне перекрытия. Второе — совместная фотограмметрическая обработка стереопары позволяет получить пространственные координаты точек (X, Y, Z) , изобразившихся в зоне перекрытий снимков.

Получение виртуального объемного изображения из двух плоских называют *стереозффектом*. Принцип получения стереоскопического зрения представлен на рис. 6.1.

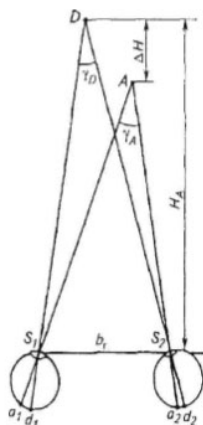


Рис. 6.1. Геометрическая интерпретация принципа стереоскопического зрения:

b_1 — глазной базис; A — точка фиксации бинокулярного взора; S_1A и S_2A — лучи; $\gamma_A = \angle S_1AS_2$ — угол конвергенции, $u_A = S_1AS_2$; H_A — расстояние от точки фиксации до глазного базиса; D — точка, расположенная от точки A по глубине на некотором расстоянии ΔH

Для получения стереоскопического эффекта необходимо выполнение следующих условий:

- наличие пары снимков, полученных с концов базиса фотографирования (пара перекрывающихся аэроснимков соответствует данному условию, так как аэрофотосъемка — частный случай стереофотосъемки);
- разномасштабность снимков не должна превышать 16%;
- базисы фотографирования снимков должны лежать на одной прямой, параллельной главному базису наблюдателя;

— условие разделения зрения: левый глаз наблюдателя должен видеть только левый снимок, правый глаз — правый снимок. Раздельное восприятие изображений достигается различными способами. Наиболее известный способ — применение оптического прибора — стереоскопа. На рис. 6.2 показана схема проектирующих лучей при наблюдении в стереоскопе.

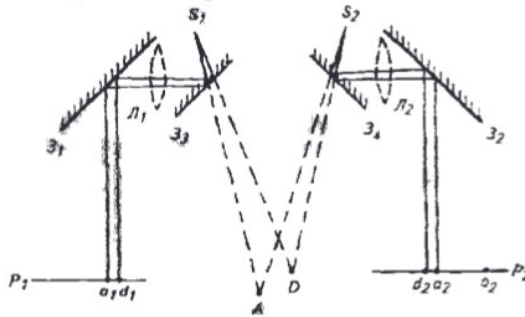


Рис. 6.2. Схема левой и правой связки проектирующих лучей в стереоскопе

При получении стереозффекта при компьютерной обработке снимков выделяют следующие способы: оптический, анаглифический, чересстрочный, переключения страниц, с помощью стереомонитора на базе двух ЖК-дисплеев.

Оптический способ стереоскопических наблюдений предполагает выводы зоны стереонаблюдений левого и правого снимков соответственно в левую и правую части экрана. Оба изображения окрашены в естественные цвета, и для их рассматривания и получения стереоскопического эффекта нужно выполнить искусственное разделение соответствующих лучей, что достигается применением специальной стереоприставки, устанавливаемой перед монитором.

Это обеспечивает возможность наблюдения стереоскопической модели местности и ее измерения, минуя неизбежные потери света (рис. 6.3).



Рис. 6.3. Оптическое стереоскопическое изображение

Однако этот метод используется довольно редко, для получения стереоизображения требуется установка перед монитором громоздких стереонасадок.

Анаглифический режим предполагает применение специальных очков. Изображение формируют следующим образом. Перекрывающиеся части левого и правого изображений, образующие зону стереоскопических наблюдений, окрашивают в дополнительные цвета спектра, например, красный и голубой, и выводят на экран либо по строкам (четные для левого снимка, а нечетные — для правого), либо путем наложения левого на правое. Полученное на экране монитора совмещенное изображение рассматривают через анаглифические очки, стекла которых окрашены в те же цвета, что и соответствующие им изображения снимков. В результате наблюдатель видит пространственную модель местности. На рис. 6.4 представлено анаглифическое изображение, которое можно рассматривать и получить объемное изображение при наличии соответствующих очков.

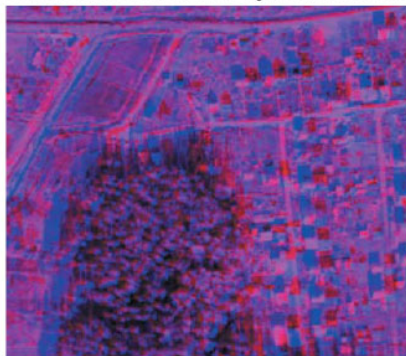


Рис. 6.4. Анаглифическое стереоскопическое изображение

Преимуществом данного метода является простота его использования. Достаточно иметь анаглифические очки и программу, формирующую анаглифическое изображение (что актуально в полевых условиях).

В большинстве фотограмметрических программ для получения стереоэффекта используют *затворный способ*, который основан на специфике представления изображения на экране монитора и предполагает применение специальных затворных (жидкокристаллических) очков с LCD-затворами (Liquid Crystal Display) различных типов. Стекла в них становятся прозрачными поочередно в соответствии со сменой видеостраниц на экране монитора. Сущность способа заключается в следующем: изображения левого и правого снимков формируются на страницах видеопамяти и поочередно выводятся на экран компьютера. Наблюдения выполняются через очки, представляющие собой пару плоскопараллельных пластин с заключенным между ними слоем

жидкого кристалла, который при воздействии на него электрического импульса может изменять интенсивность проходящего через него света так, что в каждый момент времени наблюдатель воспринимает изображение на экране монитора только одним глазом, левым или правым. Смена изображений на экране монитора при помощи специального канала связи синхронизирована с изменением прозрачности пластин затворных очков, так что каждый глаз наблюдателя видит только одно изображение. Для смены прямого стереоэффекта на обратный следует изменить последовательность вывода изображений.

В *чересстрочном режиме* стереонаблюдений на мониторе левое изображение размещается в четных строках стереоизображения, а правое — в нечетных. Как следствие, снижается разрешение изображения. В настоящее время распространены два способа разделения чересстрочного изображения для глаз.

В первом используются затворные очки и монитор с электронно-лучевой трубкой. Монитор, работающий в чересстрочном режиме, сначала выводит четные строки, а затем — нечетные. Затворные очки синхронно с вертикальной разверткой монитора открывают жидкокристаллическую шторку для левого глаза и закрывают для правого во время вывода изображения. При выводе нечетных строк прозрачность очков для глаз меняется на противоположную. Недостаток метода заключается в мигании изображения, так как частота обновления изображения для каждого глаза в два раза меньше частоты вертикальной развертки монитора. В настоящее время мониторы с электронно-лучевой трубкой сняты с производства, в связи с чем данный метод на сегодняшний день потерял свою актуальность.

Во втором способе используются пассивные поляризационные очки и специальный жидкокристаллический монитор LCD, в котором четные и нечетные строки раstra излучают поляризованный в перпендикулярных направлениях свет. Преимущество пассивных поляризационных очков по сравнению с затворными очками — отсутствие мигания изображения и провода, связывающего очки с компьютером.

Стереорежим переключения изображений (снимков) требует наличия CRT-монитора и затворных стереоочков. Суть метода заключается в поочередном выводе на монитор изображения для левого и правого глаз. Затворные очки пропускают изображение в левый глаз и не пропускают в правый во время вывода на экран левого снимка, и наоборот — для правого снимка. Основное преимущество этого режима перед чересстрочным режимом — сохранение разрешения по вертикали.

В *стереомониторе на базе двух ЖК-дисплеев* (рис. 6.5) для создания стереоэффекта совмещаются ортогонально-поляризованные изображения двух ЖК-дисплеев с помощью полупрозрачного стекла. Для разделения совмещенного изображения используют пассивные поляризационные очки.

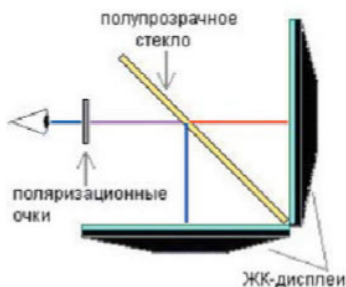


Рис. 6.5. Схема стереомонитора на базе двух ЖК-дисплеев

В качестве перспективных аппаратных решений стереонаблюдений следует выделить направление применения ЖК-мониторов с двумя матрицами, расположенными одна за другой. Для разделения изображения используют пассивные поляризационные очки. Их преимуществом по сравнению с мониторами из двух ЖК-дисплеев с полупрозрачным стеклом является компактность.

Использование стереоэффекта повышает надежность распознавания объектов, имеющих высоту, и точность нанесения их границ (здания, лесные массивы, элементы рельефа и т. п.).

6.3. Элементы внешнего ориентирования пары аэрофотоснимков

Изображения одной и той же точки местности на двух снимках стереопары называют *соответственными точками*. Проектирующие лучи, проходящие через соответственные точки, называются *соответственными лучами*.

Разность абсцисс соответственных точек стереопары называется *продольным параллаксом* p :

$$p = x_1 - x_2,$$

а разность ординат соответственных точек стереопары называется *поперечным параллаксом* q :

$$q = y_1 - y_2.$$

Элементы внешнего ориентирования пары аэрофотоснимков определяют их пространственное положение во время фотографирования. К ним относятся:

$X_{S_1}^r, Y_{S_1}^r, Z_{S_1}^r; X_{S_2}^r, Y_{S_2}^r, Z_{S_2}^r$ — геодезические координаты левого и правого центров проекции S_1 и S_2 ;

$\alpha_1, \omega_1, \kappa_1; \alpha_2, \omega_2, \kappa_2$ — углы наклона и поворота левого и правого снимков.

Таким образом, пара аэрофотоснимков имеет 12 элементов внешнего ориентирования.

Расположить пару аэрофотоснимков в геодезическом пространстве так, как она располагалась во время фотографирования, можно, используя иные 12 элементов ориентирования: 5 элементов взаимного ориентирования пары снимков и 7 элементов внешнего (геодезического) ориентирования построенной пространственной фотограмметрической модели местности.

6.4. Элементы взаимного ориентирования пары аэрофотоснимков

Элементы взаимного ориентирования — угловые элементы — определяют взаимное положение пары снимков во время фотографирования, при котором каждая пара соответственных лучей пересекается. Все множество точек пересечения соответственных лучей является пространственной *фотограмметрической моделью местности*.

В фотограмметрии используются две системы взаимного ориентирования пары снимков, которые отличаются выбором системы пространственных координат. В обеих системах началом является левый центр фотографирования S_1 . В первой системе — базисной — ось X совмещена с базисом фотографирования, главный луч левого снимка находится в плоскости XZ (рис. 6.6). Таким образом, в этой системе координат у левого снимка отсутствует поперечный угол наклона ω_1 .

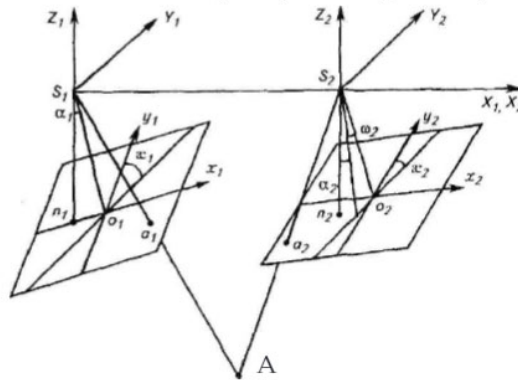


Рис. 6.6. Базисная система элементов взаимного ориентирования пары снимков

Элементами взаимного ориентирования в базисной системе являются пять углов: $\alpha_1, \kappa_1, \alpha_2, \omega_2, \kappa_2$. Суть каждого из этих углов аналогична соответствующему углу ориентирования одиночного снимка.

Во второй системе — горизонтальной — оси X, Y соответственно параллельны осям x, y левого снимка, ось Z совпадает с его главным лучом (рис. 6.7). У левого снимка в этой системе координат отсутствуют углы наклона и поворота. Угловыми элементами ориентирования правого снимка являются взаимные углы наклона снимков: $\Delta\alpha$ — продольный, $\Delta\omega$ — поперечный и $\Delta\chi$ — угол поворота снимков.

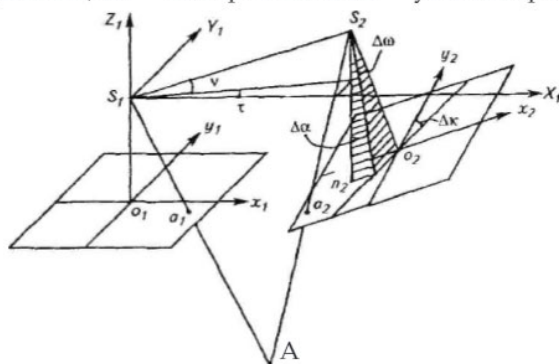


Рис. 6.7. Горизонтальная система элементов взаимного ориентирования пары снимков

Направление базиса фотографирования определяют углы τ (горизонтальный угол поворота базиса) и ν (вертикальный угол наклона базиса).

Элементы взаимного ориентирования в горизонтальной системе: $\Delta\alpha, \Delta\omega, \Delta\chi, \tau, \nu$.

6.5. Взаимное ориентирование пары аэрофотоснимков

Условие пересечения пары соответственных лучей — их принадлежность одной базисной плоскости. Если два снимка взаимно ориентированы, то любая пара соответственных точек лежит в одной базисной плоскости, т. е. четыре точки S_1, S_2, a_1, a_2 принадлежат одной плоскости (рис. 6.8). Это условие называют условием компланарности проектирующих лучей. Аналитически оно выражается в виде уравнений взаимного ориентирования. Для плановых снимков они имеют вид:

в базисной системе

$$-\frac{x_1 y_2}{f} \alpha_1 + \frac{x_2 y_1}{f} \alpha_2 + \left(f + \frac{y_1^2}{f} \right) \omega_2 - x_1 \alpha_1 + x_2 \alpha_2 - q = 0; \quad (6.1)$$

в горизонтальной системе

$$p\tau + \frac{y_1 p}{f} \nu + \frac{x_2 y_1}{f} \Delta\alpha + \left(f + \frac{y_1^2}{f} \right) \Delta\omega + x_2 \Delta\alpha - q = 0; \quad (6.2)$$

где

$x_1, y_1; x_2, y_2$ — координаты соответственных точек на левом и правом снимках стереопары в системах координат левого и правого снимков;
 p — продольный параллакс определяемой точки;
 q — поперечный параллакс той же точки.

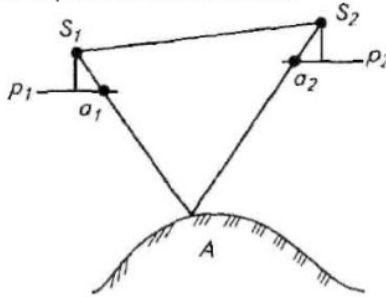


Рис. 6.8. Условие пересечения пары соответственных лучей

Как видно из уравнений (6.1) и (6.2), коэффициенты при элементах взаимного ориентирования зависят от элементов внутреннего ориентирования и измеренных координат соответственных точек на левом и правом снимках стереопары.

Уравнения (6.1) и (6.2) нестрогие и их используют для плановых снимков, углы которых не превышают 3° .

Для каждой точки местности, изобразившейся в зоне двойного перекрытия, т. е. на левом и правом снимках, можно составить одно уравнение взаимного ориентирования вида (6.1) и (6.2) с пятью неизвестными элементами.

Чтобы определить пять элементов взаимного ориентирования пары снимков, необходимо объединить в систему не менее пяти уравнений взаимного ориентирования, составленных для пяти точек из зоны перекрытия.

Это должны быть надежно идентифицируемые точки местности на левом и правом снимках. Обычно для взаимного ориентирования используют шесть стандартно расположенных точек: две вблизи главных точек левого и правого снимков и четыре по углам зоны перекрытия (рис. 6.9).

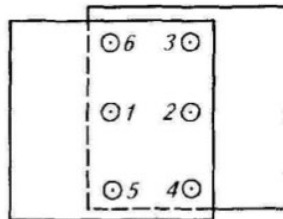


Рис. 6.9. Стандартная схема расположения точек в зоне двойного продольного перекрытия для взаимного ориентирования пары снимков

Координаты этих точек измеряют на левом и правом снимках и составляют систему из шести уравнений вида (6.1) или (6.2). При использовании шести точек систему полученных уравнений решают с контролем.

Решают систему уравнений взаимного ориентирования по способу наименьших квадратов до тех пор, пока значение свободного члена (остаточного поперечного параллакса) не будет меньше заранее заданного значения. Значение остаточного поперечного параллакса устанавливают исходя из требуемой точности конечной продукции.

Найденные элементы взаимного ориентирования пары снимков позволяют построить фотограмметрическую модель местности, являющуюся совокупностью фотограмметрических координат ее точек.

6.6. Определение пространственных фотограмметрических координат точек модели местности

Результат взаимного ориентирования пары снимков — построение пространственной фотограмметрической модели местности в произвольном масштабе и свободно ориентированной в геодезическом пространстве (рис. 6.10). Фотограмметрические координаты точек модели не являются геодезическими координатами точек местности.

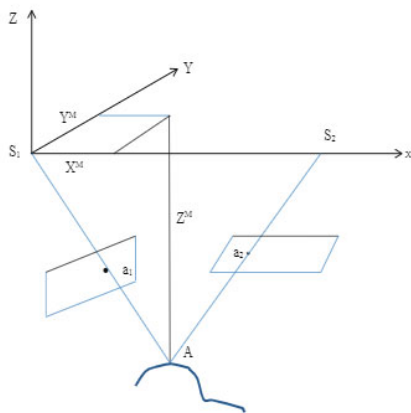


Рис. 6.10. Принцип определения пространственных координат точек фотограмметрической модели в базисной системе координат

Пространственные координаты X^M , Y^M , Z^M точек фотограмметрической модели определяют в системе координат, в которой опре-

делены элементы взаимного ориентирования (в базисной или в горизонтальной системе), по следующим формулам:

$$X^M = NX_1; \quad Y^M = NY_1; \quad Z^M = NZ_1, \quad (6.3)$$

где

X_1, Y_1, Z_1 — пространственные координаты точки левого снимка в системе координат построения модели, которые в общем случае зависят от элементов взаимного ориентирования;

N — масштабный коэффициент, определяющий масштаб построенной модели и зависящий от величины базиса проектирования b , элементов взаимного ориентирования и измеренных координат соответственных точек a_1 и a_2 стереопары.

В общем случае масштабный коэффициент N вычисляется по формуле:

$$N = \frac{\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ B_x & B_y & B_z \\ X_2 & Y_2 & Z_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ X_1 & Y_1 & Z_1 \\ X_2 & Y_2 & Z_2 \end{vmatrix}}, \quad (6.4)$$

где

B_x, B_y, B_z — проекции базиса проектирования на соответствующие оси координат;

X_1, Y_1, Z_1 — пространственные координаты точки левого снимка в системе координат построения модели;

X_2, Y_2, Z_2 — пространственные координаты точки правого снимка в той же системе координат.

В частном случае, когда левый и правый снимки горизонтальны и получены с одной высоты фотографирования, т. е. с горизонтально-го базиса, масштабный коэффициент можно вычислить по формуле:

$$N = b/p, \quad (6.5)$$

где

b — базис проектирования;

p — продольный параллакс определяемой точки.

Таким образом, для определения пространственных фотограмметрических координат точек модели местности необходимо знать элементы внутреннего ориентирования снимков, вычислить элементы их взаимного ориентирования и измерить координаты соответственных точек на левом и правом снимках.

модели известны. Для вычисления этих элементов служат эти же уравнения и опорные точки, располагающиеся в зоне перекрытия снимков. Для опорных точек по измеренным координатам их изображений на левом и правом снимках и найденным элементам взаимного ориентирования вычисляют их фотограмметрические координаты.

Таким образом, для опорных точек известны их геодезические координаты и пространственные фотограмметрические координаты. Используя эти данные, можно составить уравнения вида (6.5), в которых неизвестными величинами являются элементы внешнего ориентирования модели. Для каждой планово-высотной опорной точки можно составить все три уравнения, для плановой — первые два, для высотной — одно последнее. Полученные уравнения объединяют в систему, которую решают относительно семи неизвестных элементов внешнего ориентирования модели. Для бесконтрольного решения системы уравнений достаточно трех опорных точек, не лежащих на одной прямой: двух планово-высотных и одной высотной. Набор опорных точек может быть различным. Важно, чтобы создаваемая система содержала не менее семи уравнений со всеми семью неизвестными элементами внешнего ориентирования модели.

Рассмотренный способ определения геодезических координат точек местности по паре снимков носит название двойной обратной фотограмметрической засечки.

6.8. Прямая фотограмметрическая засечка по паре снимков

Определить геодезические координаты точек местности по паре снимков можно также на основе использования уравнений коллинеарности. Для этого необходимо знать элементы внешнего ориентирования левого и правого снимков. Тогда для любой точки местности, расположенной в зоне перекрытия, можно составить систему из четырех известных уравнений коллинеарности:

$$X^r = X_{S_1}^r + (Z^r - Z_{S_1}^r) \frac{a_1(x_1 - x_0) + a_2(y_1 - y_0) - a_3f}{c_1(x_1 - x_0) + c_2(y_1 - y_0) - c_3f};$$

$$Y^r = Y_{S_1}^r + (Z^r - Z_{S_1}^r) \frac{b_1(x_1 - x_0) + b_2(y_1 - y_0) - b_3f}{c_1(x_1 - x_0) + c_2(y_1 - y_0) - c_3f};$$

$$X^r = X_{S_2}^r + (Z^r - Z_{S_2}^r) \frac{a'_1(x_2 - x_0) + a'_2(y_2 - y_0) - a'_3f}{c'_1(x_2 - x_0) + c'_2(y_2 - y_0) - c'_3f};$$

$$Y^r = Y_{S_2}^r + (Z^r - Z_{S_2}^r) \frac{b'_1(x_2 - x_0) + b'_2(y_2 - y_0) - b'_3f}{c'_1(x_2 - x_0) + c'_2(y_2 - y_0) - c'_3f}.$$

В полученной системе уравнений искомыми величинами являются X^I, Y^I, Z^I — геодезические координаты точки местности.

Первые два уравнения выражают связь геодезических координат точки местности и плоских координат ее изображения на левом снимке. Последние два уравнения выражают ту же связь, но с использованием правого снимка.

Систему из четырех уравнений с тремя неизвестными решают с контролем при условии, что элементы внутреннего и внешнего ориентирования левого и правого снимков известны.

Для определения двенадцати элементов внешнего ориентирования снимков:

$$X_{S_1} Y_{S_1} Z_{S_1} \alpha_1 \omega_1 \varepsilon_1 X_{S_2} Y_{S_2} Z_{S_2} \alpha_2 \omega_2 \varepsilon_2$$

используют опорные точки, которые обязательно должны быть плано-высотными, но не обязательно располагаться в зоне перекрытия снимков.

Возможные схемы расположения опоры показаны на рис. 6.12.

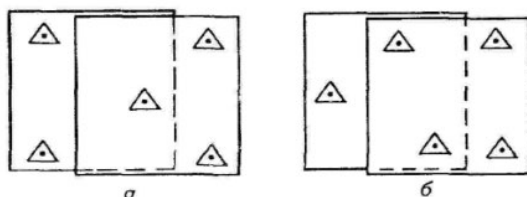


Рис. 6.12. Схема расположения опорных точек для решения прямой фотограмметрической засечки по паре снимков

Для каждой опорной точки, находящейся в зоне перекрытия, можно составить четыре уравнения коллинеарности. Опорная точка, расположенная вне зоны перекрытия, позволяет составить только два таких уравнения: либо первое и второе, либо третье и четвертое.

Таким образом, используя опору, показанную на рисунке 6.12, а, можно составить 12 уравнений коллинеарности, содержащих 12 неизвестных элементов внешнего ориентирования пары снимков, объединить их в систему и решить ее без контроля. Опора на рис. 6.12, б позволяет составить 14 уравнений коллинеарности и получить результаты решения системы уравнений с контролем.

6.9. Плано-высотная привязка аэрофотоснимков

Фотограмметрическая обработка как одиночного снимка, так и пары снимков предполагает наличие опорных точек. Опорные точки позволяют производить трансформирование одиночных снимков и геодезическое ориентирование пространственных фо-

тограмметрических моделей местности. Геодезические координаты опорных точек можно получить с помощью геодезических измерений, с планов крупного масштаба или фотограмметрическим методом.

Процесс опознавания на снимках точек местности и определение координат этих точек геодезическими методами называют *привязкой аэрофотоснимков*. В качестве опорных точек выбирают надежно идентифицируемые на снимках точки местности. Привязку, обеспечивающую каждый снимок или каждую стереопару опорными точками в количестве, необходимом для фотограмметрической обработки, называют *сплошной*. В противном случае привязку называют *разреженной*.

Если в результате привязки у каждой опорной точки определяют все три геодезические координаты, то привязку называют *планово-высотной*, если только плановые координаты — *плановой*, если только высотные координаты — *высотной*.

Привязка аэрофотоснимков состоит из нескольких этапов:

- подготовки материалов;
- составления проекта привязки;
- рекогносцировки и закрепления на местности опорных точек;
- полевых измерений;
- вычислительных работ;
- оформления материалов и сдачи работ.

Подготовка материалов включает подбор комплектов контактных или увеличенных снимков и репродукций накидного монтажа на объект работ. На репродукцию накидного монтажа переносят пункты геодезической сети с имеющихся топографических карт.

Составление проекта привязки аэрофотоснимков производят на репродукции накидного монтажа.

Как правило, при разреженной привязке опорные точки располагают рядами поперек аэрофотосъемочных маршрутов (рис. 6.13). Расстояние между опорными точками зависит от масштаба создаваемого плана, высоты сечения рельефа, параметров аэрофотосъемки и выражается количеством базисов фотографирования.

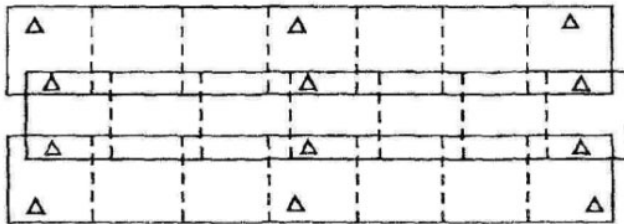


Рис. 6.13. Схема расположения опорных точек при разреженной привязке снимков

Число базисов n определяют подбором по формулам: между высотными опознаками

$$n\sqrt{n+3} = \frac{M_z p^2 y}{0,09 H f^2 \sigma_q}; \quad (6.7)$$

между плановыми опознаками

$$n\sqrt{n+3} = \frac{M_d p y}{0,17 H f \sigma_q}; \quad (6.8)$$

где M_z, M_d — средние квадратические погрешности наиболее слабо определяемых точек соответственно по высоте и в плане относительно опорных точек;

σ_q — средняя квадратическая погрешность определения поперечного параллакса (для аналитических методов 0,010–0,015 мм);

p — среднее значение продольных параллаксов (в мм), приближенно равное базису фотографирования на снимках (в мм);

y — среднее значение ординат связующих точек, расположенных на середине поперечных перекрытий.

Значения M_z и M_d выбираются из таблицы 6.1.

Таблица 6.1

Значения M_z и M_d в зависимости от масштаба плана и высоты сечения рельефа

Масштаб плана	Высота сечения рельефа, м	M_z , м	M_d , мм на плане
1:5000 – 1:10 000	1,0	0,2	0,20
1:10 000 – 1:25 000	2,0	0,4	0,20 – 0,25
1:10 000 – 1:25 000	2,5	0,5	0,20 – 0,25
1:10 000 – 1:25 000	5,0	1,2	0,20 – 0,25

Места расположения проектируемых опорных точек показывают на репродукции накидного монтажа кружками диаметром 5 мм красной тушью и на одном из перекрывающихся снимков красным карандашом. Опорные точки располагают на середине продольных и поперечных перекрытий, чтобы они изобразились на максимальном количестве снимков. Опорные точки нельзя размещать ближе 1 см от края снимка.

Если привязку снимков выполняют с помощью GPS-аппаратуры, то зоны расположения опорных точек намечают на открытых пространствах, чтобы обеспечить радиовидимость необходимого числа спутников.

В процессе *рекогносцировки и закрепления на местности* опорных точек опознают и накальвают на снимки существующие пункты триангуляции государственной сети, выбирается окончательное положение каждой опорной точки и уточняется метод ее геодезического определения. В качестве опорной точки выбирают такую точку местности, которая надежно идентифицируется на всех перекрыва-

ющихся снимках. Погрешность опознавания опорной точки на местности не должна превышать 0,1 мм в масштабе создаваемого плана.

Опознанные опорные точки закрепляют на местности кольями длиной 0,3–0,5 м и окапывают треугольником со сторонами 1,2–1,5 м. На снимках эти точки накальвают с погрешностью не более 0,1 мм и обводят двумя красными концентрическими окружностями диаметром 8 и 10 мм. Каждой опорной точке присваивают номер.

Далее проводят *геодезические измерения* с помощью современных электронных тахеометров и GPS/ГЛОНАСС-аппаратуры. Опорные точки, используемые в последующей фототриангуляции, должны иметь среднюю погрешность плановых координат не более 0,1 мм в масштабе создаваемого плана (относительно пунктов государственной геодезической сети и геодезических сетей сгущения) и 0,1 принятой высоты сечения рельефа.

В результате *вычислительных работ* получают геодезические координаты опорных точек.

Для каждой трапеции государственной разграфки, землепользования или населенного пункта формируют техническое дело, в которое входят все материалы полевых и камеральных работ: репродукции накидного монтажа, снимки с оформленными опорными точками, полевые журналы, каталоги геодезических координат и т. п.

6.10. Пространственная аналитическая фототриангуляция

Фототриангуляцией называют построение пространственной сети треугольников, у которых вершинами являются центры фотографирования и соответственные точки стереопар (рис. 6.14), а одной из сторон — базис фотографирования. Целью построения и уравнивания фототриангуляционной сети является вычисление элементов внешнего ориентирования всех снимков, включенных в обработку. Фототриангуляцию развивают по снимкам одного или нескольких маршрутов.

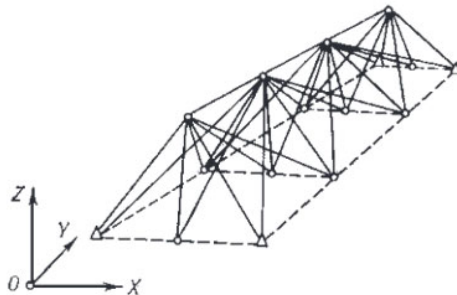


Рис. 6.14. Схема фототриангуляции

В зависимости от этого различают *одномаршрутную* (маршрутную) и *многомаршрутную* (блочную) фототриангуляцию.

В зависимости от назначения фототриангуляцию разделяют на *каркасную* и *заполняющую*. Каркасная фототриангуляция развивается по маршрутам, проложенным перпендикулярно к направлению маршрутов аэрофотосъемки, и обеспечивает опорными точками каждый маршрут. Заполняющая фототриангуляция развивается по снимкам одного маршрута для определения ЭВО каждого снимка данного маршрута.

Независимо от способа фототриангуляции при ее развитии используют три вида точек, для которых измеряют координаты на снимках. Это опорные точки, связующие и определяемые. У каждого вида точек свое назначение.

Определяемые точки — точки местности, для которых в процессе фототриангуляции вычисляются геодезические координаты. Определяемые точки в дальнейшем могут использоваться в качестве опорных при фотограмметрической обработке одиночного снимка или пары снимков.

Связующие точки — точки, расположенные в зоне тройных перекрытий снимков маршрута и надежно идентифицируемые на каждом из снимков. Они позволяют либо объединить одиночные модели местности в единую модель (способы независимых и частично зависимых моделей), либо определить элементы внешнего ориентирования всех снимков сети в единой системе координат (способ связок). Иными словами, связующие точки дают возможность восстановить взаимное положение всех снимков фототриангуляционной сети.

Опорные точки ориентируют построенный фототриангуляционный ряд или блок в геодезической системе координат.

Для правильного расположения и обеспечения необходимого количества точек каждого вида составляют проект фототриангуляции.

Составление проекта начинают с подбора снимков фототриангуляционного ряда или блока. На них отождествляют и перекальвают с материалов полевой привязки опорные точки. Затем выбирают и накальвают определяемые точки. Каждой из них присваивают свой номер. Связующие точки выбирают в зоне тройных продольных перекрытий. При развитии блочной фототриангуляции также выбирают и накальвают связующие точки в зонах поперечных перекрытий. Их желательно располагать по разные стороны от середины зоны перекрытия (рис. 6.15, а). В каждом тройном продольном перекрытии должно быть не менее трех связующих точек. Оптимальным считается выбор 6–9 связующих точек (рис. 6.15, б).

Измерение координат точек, вошедших в проект, осуществляется в цифровых фотограмметрических рабочих станциях.

Результаты измерений обрабатывают по программам аналитической пространственной фототриангуляции. Итогом является определение элементов внешнего ориентирования всех снимков, включенных в обработку, и каталог геодезических координат определяемых точек.

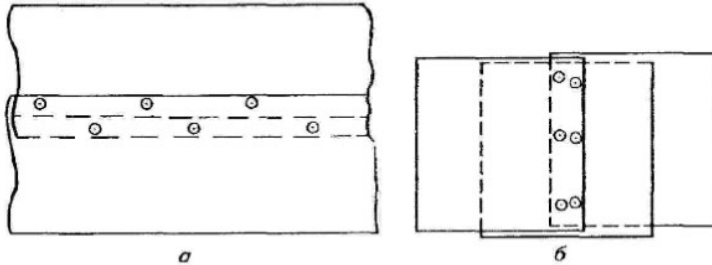


Рис. 6.15. Схема расположения связующих точек:
 а — в поперечных перекрытиях снимков;
 б — в тройных продольных перекрытиях снимков

6.11. Общая схема технологии фототриангуляции

На первом этапе фототриангуляции выполняют *внутреннее ориентирование* цифровых изображений (снимков) с целью установления соответствия между системами координат снимка и монитора и восстановления связки проектирующих лучей.

При внутреннем ориентировании снимков в соответствующий файл вводят следующие элементы съёмочной камеры:

- координаты главной точки в системе координат снимка;
- фокусное расстояние объектива;
- данные о дисторсии объектива;
- координаты координатных меток.

После внутреннего ориентирования снимков выполняют:

- 1) ввод элементов внешнего ориентирования снимков X_{st} , Y_{st} , Z_{st} , α , ω , κ (если они определены в полете с помощью глобальных навигационных и инерциальных систем);
- 2) выбор и измерение координат связующих точек в зонах поперечного и тройного продольного перекрытий, необходимых для связи смежных маршрутов и смежных моделей маршрута соответственно;
- 3) выбор и измерение координат дополнительных точек в шести стандартных зонах для повышения точности взаимного ориентирования и соединения смежных моделей;
- 4) измерение координат опорных точек не менее чем на двух снимках.

Все точки (опорные, связующие) намечают на одном снимке; а перенос их на другие снимки того же или смежного маршрута выполняют в стереорежиме или с помощью оптического коррелятора.

Используемые в настоящее время способы автоматического отождествления соответственных точек снимков основаны на строгом анализе яркостей и геометрического положения элементов изображения, и их надежность всецело определяется метрическими и изобразительными свойствами изображений, особенностями контурной нагрузки и т. п. Все это предопределяет целесообразность стереоскопического контроля положения измерительной марки после работы коррелятора.

После выбора точек выполняют взаимное ориентирование снимков. Элементами взаимного ориентирования снимков являются пять углов, определяющих взаимное положение снимков в пространстве.

Взаимное ориентирование основано на условии компланарности проектирующих лучей: любая пара соответственных лучей пересекается и находится в одной плоскости, проходящей через базис фотографирования.

Строгий способ взаимного ориентирования предполагает нахождение поправок к приближенным значениям элементов взаимного ориентирования методом итераций.

Критерием качества взаимного ориентирования является среднее квадратическое значение остаточного поперечного параллакса, величина которого не может превышать 10 мкм. Более значительные расхождения свидетельствуют о наличии ошибок, прежде всего, в отождествлении точек. Их устранение требует проверки качества отождествления и измерения точек в стереорежиме.

Существует несколько способов развития пространственной фототриангуляции: способ независимых моделей, способ частично зависимых моделей, способ связок и др.

6.12. Способ независимых моделей

В способе независимых моделей каждая модель строится независимо от других моделей в своей системе координат и в своем масштабе.

Для каждой пары снимков определяют элементы взаимного ориентирования и строят фотограмметрическую модель в своей системе координат (базисной или горизонтальной). Вычисляют фотограмметрические координаты опорных, связующих и определяемых точек на каждой из построенных моделей по формулам (6.3 и 6.4).

Одиночную модель строят чаще всего в базисной системе координат, начало которой совмещают с левым центром фотографирования, ось абсцисс — с базисом, а ось ординат размещают в главной базисной плоскости левого снимка. Элементы взаимного ориентирования определяют строгим способом из решения системы уравнений поправок по всем точкам, под условием $[pv^2] = \min$, причем веса измеренных величин устанавливают в зависимости от положения точки на снимке. Критерием сходимости итерационного процесса служат величины остаточных поперечных параллаксов, значения которых не должны превышать 0,5 размера пикселя цифрового изображения..

Созданные модели объединяют в общую модель с помощью связующих точек. Связующие точки принадлежат двум соседним моделям и поэтому имеют две тройки пространственных фотограмметрических координат, полученных в двух разных системах координат, отличающихся началом и направлением осей (рис. 6.16).

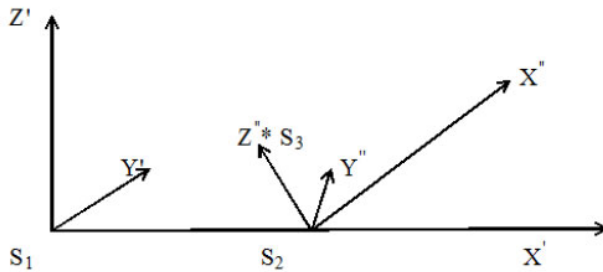


Рис. 6.16. Разворот систем координат при объединении фотограмметрических моделей

Пересчет координат точек каждой последующей модели в систему координат и масштаб предыдущей модели проводится по формулам (6.9):

$$\begin{aligned} X' &= X'_{s_2} + (a_1 X'' + a_2 Y'' + a_3 Z'') k, \\ Y' &= Y'_{s_2} + (b_1 X'' + b_2 Y'' + b_3 Z'') k, \\ Z' &= Z'_{s_2} + (c_1 X'' + c_2 Y'' + c_3 Z'') k, \end{aligned} \tag{6.9}$$

где

X', Y', Z' — фотограмметрические координаты точки предыдущей модели;

X'', Y'', Z'' — фотограмметрические координаты точки последующей модели;

$X'_{s_2}, Y'_{s_2}, Z'_{s_2}$ — фотограмметрические координаты начала последующей системы координат в системе координат предыдущей модели;

a_i, b_i, c_i — направляющие косинусы, являющиеся функциями трех углов ($\xi; \nu; \eta$) наклона и разворота последующей системы координат относительно предыдущей;

k — масштабный коэффициент, определяющий разномасштабность двух соседних моделей.

Для каждой связующей точки ранее вычислены координаты ($X'; Y'; Z'$) и ($X''; Y''; Z''$). Неизвестными параметрами в формулах (6.9) являются семь величин ($X'_{s2i}; Y'_{s2i}; Z'_{s2i}; \xi; \nu; \eta; k$). Для их нахождения требуется не менее трех связующих точек в каждом тройном перекрытии. Используя вычисленные по формулам (6.9) семь элементов ориентирования каждой последующей модели относительно предыдущей, перевычисляют фотограмметрические координаты всех точек, включенных в фототриангуляционную сеть. Таким образом, для всех точек сети — связующих, опорных и определяемых — получены координаты в одной системе координат и в одном масштабе. Общая модель построена в системе координат и в масштабе, принятых при построении первой модели маршрута.

После этого по опорным точкам выполняют внешнее ориентирование общей фотограмметрической модели.

Преобразование координат точек фотограмметрической модели в геодезические координаты точек местности производят по формулам (6.10)

$$\begin{aligned} X^G &= X_{s1}^G + (a_1 X^M + a_2 Y^M + a_3 Z^M) \cdot t, \\ Y^G &= Y_{s1}^G + (b_1 X^M + b_2 Y^M + b_3 Z^M) \cdot t, \\ Z^G &= Z_{s1}^G + (c_1 X^M + c_2 Y^M + c_3 Z^M) \cdot t. \end{aligned} \quad (6.10)$$

Построение фототриангуляционной сети в пределах маршрута или блока выполняется в автоматизированном режиме. Задача оператора на этом этапе фотограмметрической обработки сводится к выбору критериев для подготавливаемого программой отчета. Такими критериями служат расхождения исходных и найденных по результатам уравнивания координат, которые не должны превышать:

- для опорных точек, использованных для уравнивания сети — 0,2 мм в масштабе создаваемого плана в плановом положении;
- для контрольных точек — не более 0,3 мм в масштабе создаваемого плана.

Надежность уравнивания фотограмметрического блока повышается, если число использованных опорных точек в полтора-два раза превышает минимально необходимое.

При этом наиболее достоверную оценку получают по контрольным опорным точкам, координаты которых не использовались при

уравнении. Важно, чтобы эти точки располагались в наиболее слабых местах фототриангуляционной сети.

6.13. Способ частично зависимых моделей

Способ частично зависимых моделей также предполагает построение всех моделей фототриангуляционного ряда.

Для построения первой модели произвольно выбирают ЭВО левого снимка.

Определяют элементы взаимного ориентирования первой стереопары.

Вычисляют дирекционный угол и угол наклона базиса фотографирования.

Вычисляют условные ЭВО второго снимка. Длину базиса проектирования выбирают произвольно.

Вычисляют фотограмметрические координаты точек модели по найденным ЭВО левого и правого снимков прямой фотограмметрической засечкой.

Аналогично создают вторую и последующие модели. Однако за ЭВО левого снимка в каждой из них принимают ЭВО правого снимка, найденные из предыдущей модели. Масштаб каждой модели выбирают произвольно.

В отличие от предыдущего способа угловое ориентирование всех моделей произведено в единой системе координат. Различаются лишь их масштабы. Последующая модель приводится к масштабу предыдущей с помощью связующих точек (рис. 6.17).

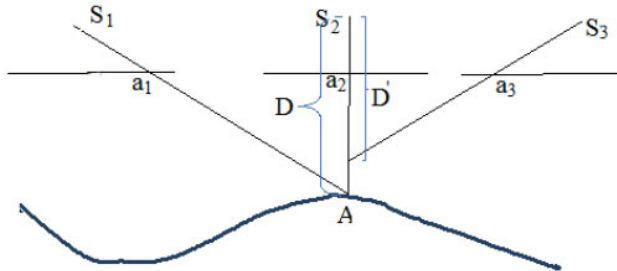


Рис. 6.17. Иллюстрация приведения двух соседних моделей к единому масштабу с помощью связующих точек

Сначала вычисляют масштабный коэффициент двух соседних моделей по формулам (6.11) – (6.13):

$$k = D/D', \tag{6.11}$$

$$D = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}, \tag{6.12}$$

$$\Delta X = X_{S_2} - X, \quad (6.13)$$

где

D — расстояние в первой модели от точки S_2 до связующей точки;

D' — расстояние во второй модели от точки S_2 до связующей точки;

$(\Delta X_{S_2}, \Delta Y_{S_2}, \Delta Z_{S_2})$ — приращения фотограмметрических координат связующих точек первой модели относительно точки S_2 ;

$(\Delta X'_{S_2}, \Delta Y'_{S_2}, \Delta Z'_{S_2})$ — приращения фотограмметрических координат связующих точек второй модели относительно точки S_2 .

Далее по формулам (6.14) – (6.15) вычисляют фотограмметрические координаты всех точек фототриангуляционной сети в единой системе координат и в едином масштабе.

$$\begin{aligned} X_{S_3} &= X_{S_2} + kB_x, \\ Y_{S_3} &= Y_{S_2} + kB_y, \\ Z_{S_3} &= Z_{S_2} + kB_z. \end{aligned} \quad (6.14)$$

$$\begin{aligned} X &= X_{S_2} + k\Delta X, \\ Y &= Y_{S_2} + k\Delta Y, \\ Z &= Z_{S_2} + k\Delta Z. \end{aligned} \quad (6.15)$$

Общую модель масштабируют и ориентируют в геодезическом пространстве по опорным точкам.

6.14. Способ связок

Способ связок отличается от первых двух тем, что фотограмметрическая сеть строится и уравнивается одновременно по всем снимкам, включенным в обработку. Для каждой точки местности, включенной в сеть, составляют $2n$ уравнений коллинеарности (n — количество снимков, на которых изобразилась данная точка местности). Все полученные уравнения для всех точек сети объединяются в единую систему уравнений, которая затем решается относительно ЭВО всех снимков, а также геодезических координат точек сети.

6.15. Способ последовательного присоединения связок

В этом способе объединены взаимное ориентирование пары снимков, внешнее ориентирование каждого снимка, масштабирование модели, перенос начала координат.

Сначала строится первая модель маршрута в условной или геодезической системе координат. На левом и правом снимках стереопары измеряются координаты стандартно расположенных точек для взаимного ориентирования. Измеряются координаты связующих, опорных и определяемых точек.

По вычисленным элементам взаимного ориентирования и заданным условным (или геодезическим) ЭВО первого снимка вычисляют условные ЭВО второго снимка маршрута по формулам (6.16).

$$\left. \begin{aligned}
 X_{S_2} &= X_{S_1} + B_X \\
 Y_{S_2} &= Y_{S_1} + B_Y \\
 Z_{S_2} &= Z_{S_1} + B_Z \\
 B_X &= B \cos v \cos t \\
 B_Y &= B \cos v \sin t \\
 B_Z &= B \sin v \\
 \alpha_2 &= \alpha_1 + \Delta\alpha \\
 \omega_2 &= \omega_1 + \Delta\omega \\
 \kappa_2 &= \kappa_1 + \Delta\kappa
 \end{aligned} \right\} (6.16)$$

Таким образом, каждому снимку присвоены условные или геодезические ЭВО.

Прямой фотограмметрической засечкой по паре снимков вычисляют фотограмметрические координаты связующих точек, расположенных в зоне тройного перекрытия первого, второго и третьего снимков. Таким образом, на третьем снимке появились точки с известными пространственными координатами. Их используют для решения обратной фотограмметрической засечки с целью нахождения ЭВО третьего снимка.

Определив ЭВО присоединяемого снимка, вычисляют фотограмметрические пространственные координаты новых точек, связывающих полученную модель со следующей связкой маршрута, решением прямой фотограмметрической засечки.

Таким образом, последовательно находят ЭВО всех снимков маршрута в условной или геодезической системе координат и в этой же системе вычисляются координаты всех точек фототриангуляционного ряда.

Вместо условий коллинеарности может использоваться условие равенства координат связующих точек, определенных в смежных моделях. Этому условию соответствует равенство масштабных коэффициентов N и N' .

Приращение координат точки A (рис. 6.17) относительно точки S_2 (правого центра фотографирования) в первой модели:

$$\begin{aligned}
 \Delta X &= NX', \\
 \Delta Y &= NY', \\
 \Delta Z &= NZ'.
 \end{aligned}$$

Приращения координат точки A относительно точки S_2 (левого центра фотографирования) во второй модели:

$$\begin{aligned} \Delta X &= N'X', \\ \Delta Y &= N'Y', \\ \Delta Z &= N'Z', \end{aligned}$$

где

(X', Y', Z') — пространственные координаты точки a_2 .

Отсюда $N = N'$.

$$N = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ B_x & B_y & B_z \\ X^1 & Y^1 & Z^1 \\ 1 & 1 & 1 \\ X & Y & Z \\ X^1 & Y^1 & Z^1 \end{vmatrix}; \quad N^1 = - \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ B_x^1 & B_y^1 & B_z^1 \\ X^1 & Y^1 & Z^1 \\ 1 & 1 & 1 \\ X^1 & Y^1 & Z^1 \\ X^{11} & Y^{11} & Z^{11} \end{vmatrix}, \quad (6.17)$$

где

B и B' — базисы смежных стереопар;

(X, Y, Z) — пространственные координаты точки a_1 ;

(X', Y', Z') — пространственные координаты точки a_2 ;

(X'', Y'', Z'') — пространственные координаты точки a_3 .

Для трех горизонтальных снимков, образующих триплет, верно:

$$B/p_i = B'/p'_i$$

где

p_i и p'_i — продольные параллаксы общих точек.

Общее число уравнений равенства масштабных коэффициентов равно количеству связующих точек.

Если построение первой модели маршрута производилось в условной системе координат, то от найденных пространственных координат точек фототриангуляционного ряда необходимо перейти к их геодезическим координатам. Фототриангуляционный ряд в этом случае можно рассматривать как единую свободно ориентированную модель в произвольном масштабе. Следовательно, необходимо выполнить геодезическое (внешнее) ориентирование построенной модели и ее масштабирование, т. е. найти семь элементов внешнего ориентирования фототриангуляционного ряда, а именно:

$$X_{0i}; Y_{0i}; Z_{0i}; \xi_i; \eta_i; \nu_i; t.$$

Они определяются с использованием опорных точек, расположенных на краях маршрута. Для решения задачи достаточно трех опорных точек (две — планово-высотные, одна — высотная). Обычно используют четыре опорные точки.

После определения элементов внешнего ориентирования фототриангуляционного ряда вычисляют геодезические координаты определяемых точек по известным формулам (6.10).

6.16. Блочная фототриангуляция

Многомаршрутная сеть развивается по снимкам, принадлежащим нескольким маршрутам, а ее элементарными звеньями могут быть одиночные связки, модели, маршруты или подблоки. Принципиально наиболее строгими являются методы, основанные на совместном ориентировании в пространстве одиночных связок, восстанавливаемых по результатам непосредственных измерений снимков.

Различают следующие способы блочной фототриангуляции:

- способ связок;
- способ независимых моделей;
- способ независимых маршрутов.

Способ связок позволяет строить и уравнивать сеть одновременно по всем снимкам, входящим в блок.

Способ независимых моделей основан на построении и соединении независимых моделей.

В способе независимых маршрутов сначала создаются свободные маршрутные сети, а затем объединяются в блок, который внешне ориентируется по опорным точкам.

Одним из важнейших требований к фототриангуляционным сетям при производстве инженерных изысканий является жесткость на стыках смежных моделей и маршрутов. Блочные фототриангуляционные сети должны обладать равноточностью внутримаршрутных и межмаршрутных связей, а соответствующие стыки на элементарных участках должны быть «плавными». Методы последовательной фототриангуляции не гарантируют выполнения этих условий. Искажения во взаимном положении смежных участков фототриангуляционной сети возникают за счет различной точности идентификации общих точек на стыках стереопар одного маршрута и снимков смежных маршрутов.

В значительной мере свободен от этих недостатков способ блочной фототриангуляции, основанный на одновременном уравнивании элементов свободной многомаршрутной сети по условиям компланарности и равенства масштабов общих точек смежных снимков сети. Эти два условия выражают основные геометрические связи между снимками и стереопарами, перекрывающимися внутри одного или смежных маршрутов, объединяемых в общую сеть.

Условия компланарности, записанные в принятой системе координат, определяют угловое ориентирование связок сети, а условия равенства масштабов — взаимное положение центров трех перекрывающихся снимков. Совместное решение таких условий позволяет уравнивать условные элементы внешнего ориентирования снимков свободной многомаршрутной сети и произвести надежную оценку точности ее построения. Задача ее геодезического ориентирования и масштабирования решается на следующем этапе по известным формулам.

Для любой точки сети, изобразившейся на трех снимках одного или смежных маршрутов, возникают два условия компланарности и условие равенства масштабов (6.18):

$$\begin{aligned}
 & \begin{pmatrix} X_{s_1} - X_{s_2} & Y_{s_1} - Y_{s_2} & Z_{s_1} - Z_{s_2} \\ X_i & Y_i & Z_i \\ X_k & Y_k & Z_k \end{pmatrix} = 0; \\
 & \begin{pmatrix} X_{s_1} - X_{s_3} & Y_{s_1} - Y_{s_3} & Z_{s_1} - Z_{s_3} \\ X_k & Y_k & Z_k \\ X_i & Y_i & Z_i \end{pmatrix} = 0; \\
 & \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ X_{s_1} - X_{s_2} & Y_{s_1} - Y_{s_2} & Z_{s_1} - Z_{s_2} \\ X_i & Y_i & Z_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ X_{s_2} - X_{s_3} & Y_{s_2} - Y_{s_3} & Z_{s_2} - Z_{s_3} \\ X_i & Y_i & Z_i \end{pmatrix} \quad (6.18) \\
 & \frac{\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ X_k & Y_k & Z_k \\ X_i & Y_i & Z_i \end{pmatrix}}{\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ X_i & Y_i & Z_i \end{pmatrix}} = \frac{\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ X_{s_2} - X_{s_3} & Y_{s_2} - Y_{s_3} & Z_{s_2} - Z_{s_3} \\ X_k & Y_k & Z_k \end{pmatrix}}{\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ X_i & Y_i & Z_i \end{pmatrix}}
 \end{aligned}$$

Использование этих условий при уравнивании предварительно построенной свободной блочной сети позволяет строить общую сеть с равнопрочными внутри- и межмаршрутными связями. Это возможно лишь при одинаковой точности идентификации общих точек на снимках одного и смежных маршрутов. Для этого измерения плоских координат связующих точек производят на внутри- и межмаршрутных стереопарах.

В результате таких измерений можно образовать жесткую систему уравнений, связывающих между собой ЭВО всех снимков, входящих в общую сеть, поскольку кроме обычных внутримаршрутных связей, выраженных условиями компланарности, возникают условия ориентирования снимков смежного маршрута.

Так, если сеть содержит 9 снимков трех маршрутов с перекрытием менее 50%, в свободной блочной сети возникает 94 условных уравнения компланарности и равенства масштабов, 66 из них выражают внутримаршрутные связи, 28 — межмаршрутные. Система уравнений переопределена, поскольку содержит $6 \times 9 = 54$ неизвестных ЭВО снимков блока.

6.17. Ортофототрансформирование снимков

Ортофототрансформирование — процесс геометрического преобразования изображения, полученного в какой-либо проекции, в ортогональную проекцию.

Современный метод цифрового трансформирования основан на процедуре фотограмметрического преобразования растровых изображений, в соответствии с которым выходное изображение формируется пиксель за пикселем, построчно.

Каждому пикселю исходного снимка необходимо поставить в соответствие пиксель трансформированного изображения в ортогональной проекции. Это соответствие описывается известными уравнениями коллинеарности. По координатам центра пикселя снимка вычисляют геодезические координаты центра соответствующей площадки на местности. Затем этой площадке необходимо присвоить фототон соответствующего пикселя снимка. Таким образом, пиксель за пикселем можно получить растровое ортотрансформированное изображение. Такое ортофототрансформирование называют прямым. При этом размер площадки, покрываемой пикселем снимка, на местности не будет постоянным для любого пикселя. Это объясняется тем, что в общем случае (глава 4) снимок разномасштабен из-за влияния угла наклона и рельефа местности. Поэтому каждый пиксель исходного снимка изображается в своем частном масштабе. Так, на возвышенности площадка, соответствующая одному пикселю снимка, будет меньше, чем в низине. Неравенство площадок, соответствующих пикселям исходного снимка, приведет к тому, что формируемое по пиксельно растровое ортотрансформированное изображение будет содержать разрывы между площадками или их наложения.

Чтобы избежать разрывов и наложений в выходном изображении, производят обратное ортотрансформирование (ретрансформирование). Его суть заключается в следующем (рис. 6.18):

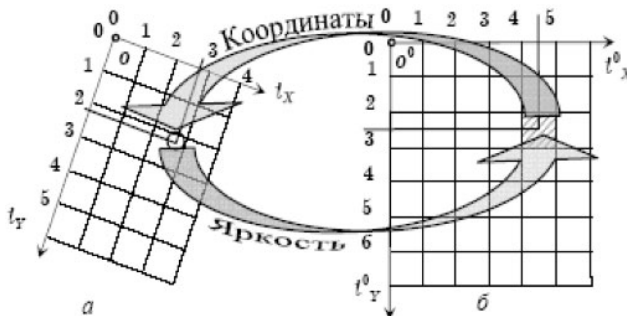


Рис. 6.18. а — исходный снимок; б — трансформированный снимок

– формируется поле $o^0 i_x^0 i_y^0$ выходного изображения в геодезической системе координат. Оно представляет собой сетку квадратов с заданным геометрическим разрешением. Как правило, сторона квадрата на местности $L = m_{cp} pix$ (m_{cp} — знаменатель среднего масштаба снимка, pix — размер пикселя на исходном снимке);

– определяются координаты (i_x^0, i_y^0) центра текущей площадки выходного (формируемого) изображения и рассчитываются соответствующие ему координаты (i_x, i_y) в системе исходного изображения;

– площадке (пикселю) выходного изображения присваивается цвет или фототон пикселя исходного изображения.

Однако ретрансформированные координаты (i_x, i_y) в общем случае не соответствуют центру пикселя исходного изображения, что не позволяет однозначно выбрать требуемый цвет (фототон). Для его создания применяют метод ближайшего соседа, билинейную, бикубическую интерполяцию и др.

Рассмотрим более подробно схему создания ортофотоизображения по снимкам многомаршрутной съемки. Действующая инструкция по фотограмметрическим работам требует построения ортотрансформированного изображения в границах рабочей площади каждого снимка, ограниченной средними линиями продольного и поперечного перекрытий. Поэтому сначала на трансформируемый снимок наносят границу рабочей площади в виде полилинии и определяют положение ее вершин на ортоизображении.

Для определения границ рабочей площади на ортоизображении необходимо вычислить плановые геодезические координаты (X, Y) каждой поворотной точки по координатам ее изображения на снимке (x, y) , элементам внешнего ориентирования снимка и цифровой модели рельефа. Эта задача решается следующим образом и включает следующие операции (рис. 6.19):

– измерение координат (x, y) поворотной точки a границы рабочей площади в системе координат снимка;

– вычисление высотной координаты Z центра пикселя ортоизображения A по измеренным координатам (x, y) и ЦМР (точнее, аналитической модели рельефа $Z = f(X, Y)$), как описано в параграфе 5.10;

– вычисление координат (X, Y) центра формируемого пикселя ортоизображения A в системе координат местности OXY по уравнениям (6.19);

$$\left. \begin{aligned} X_A &= X_s + (Z_A - Z_s) \frac{a_1 x + a_2 y - a_3 f}{c_1 x + c_2 y - c_3 f} \\ Y_A &= Y_s + (Z_A - Z_s) \frac{b_1 x + b_2 y - b_3 f}{c_1 x + c_2 y - c_3 f} \end{aligned} \right\}; \quad (6.19)$$

– присвоение пикселю ортоизображения с координатами центра X_A и Y_A цвета (фототона) пикселя исходного снимка, содержащего точку a .

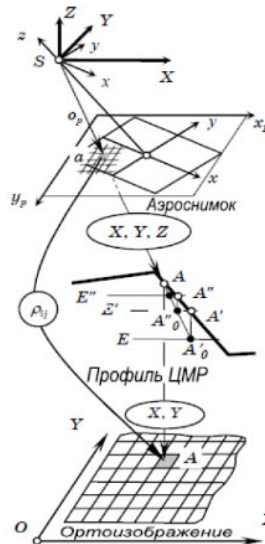


Рис. 6.19. Ортотрансформирование границы рабочей площади

Рассмотренная схема используется для расчета плановых координат вершин полилинии («линии пореза»), определяющей границу рабочей площади трансформируемого снимка и намеченной в соответствии с требованиями к ней. Полученные координаты $(X_A; Y_A)$ определяют положение центра трансформируемого пикселя в системе координат местности, в соответствии с которыми на ортоизображении формируют границы рабочей площади обрабатываемого снимка. После этого выполняется «обратное» трансформирование — заполнение матрицы ортоизображения значениями цветов (фото-тонов) соответствующих им пикселей исходного снимка (рис. 6.20):

— вычисление координат (X, Y) центра формируемого пикселя A ортоизображения в системе координат местности OXY ;

— вычисление высотной координаты Z центра пикселя ортоизображения A по вычисленным координатам (X, Y) и ЦМР (точнее, аналитической модели рельефа $Z = f(X, Y)$);

— вычисление координат (x, y) изображения a определяемой точки A на снимке по ее координатам на местности (X, Y, Z) и элементам внешнего ориентирования трансформируемого снимка $(X_S, Y_S, Z_S, \alpha, \omega, \chi)$, по формулам (6.20)

$$x = x_o - f \frac{a_1 \Delta X + b_1 \Delta Y + c_1 \Delta Z}{a_3 \Delta X + b_3 \Delta Y + c_3 \Delta Z},$$

$$y = y_o - f \frac{a_2 \Delta X + b_2 \Delta Y + c_2 \Delta Z}{a_3 \Delta X + b_3 \Delta Y + c_3 \Delta Z},$$
(6.20)

где

$$\Delta X = X - X_S; \Delta Y = Y - Y_S; \Delta Z = Z - Z_S;$$

– расчет растровых координат (i_x, i_y) центра пикселя ортоизображения по его координатам (x, y) в системе снимка и элементам внутреннего ориентирования;

– идентификация пикселя с точкой a исходного снимка и расчет цвета (фототона) пикселя ортоизображения с точкой A .

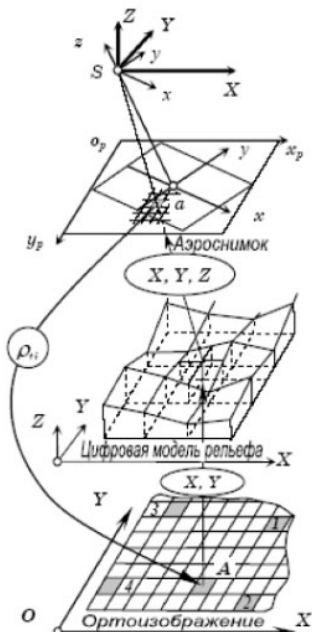


Рис. 6.20. Обратное трансформирование рабочей площади снимка

Таким образом, фотограмметрическая часть технологической схемы создания ортофотоплана включает следующие этапы:

1. Сканирование аналоговых аэрофотоснимков.
2. Построение пространственной фототриангуляционной сети и определение ЭВО всех снимков, включенных в обработку.
3. Построение цифровой модели рельефа на всю обрабатываемую территорию фотограмметрическим способом.
4. Выделение рабочих площадей на всех обрабатываемых снимках.
5. Прямое ортотрансформирование поворотных точек границы рабочей площади.
6. Задание геометрического разрешения (размера пикселя) выходного изображения.

7. Обратное ортофототрансформирование каждого пикселя внутри рабочей площади исходного снимка.
8. Фотометрическая коррекция полученного ортофотоизображения.
9. Нарезка ортоизображений на планшеты заданного масштаба и их зарамочное оформление.

6.18. Геометрическое объединение цифровых ортотрансформированных изображений местности

При создании цифровых ортофотопланов на территорию, превышающую площадь одного снимка, производится ортофототрансформирование рабочих площадей всех снимков, включенных в обработку. Далее следует процесс геометрического объединения всех ортотрансформированных изображений.

Необходимость этого процесса вызвана следующими причинами. Для точек, находящихся на границе рабочей площади, геодезические плановые координаты вычислены дважды — при ортофототрансформировании левого и правого снимков. Эти координаты, как правило, не совпадают из-за погрешностей исходных данных процесса ортофототрансформирования:

- погрешностей измерения координат контурных точек, вызванных физическими факторами;
- погрешностей определения ЭВО в процессе фототриангуляции;
- погрешностей построения ЦМР.

Для устранения расхождений в плановых геодезических координатах идентичных точек используют различные способы. Так, например, в цифровой фотограмметрической системе ImageStation 6800 фирмы «Интерграф» используют способ притрансформирования одного изображения к другому (image to image). Его суть заключается в следующем.

Из всех ортотрансформированных перекрывающихся изображений выбирается базовое. В зоне его перекрытия с соседними снимками выбираются общие контурные точки. Эти точки имеют две пары плановых геодезических координат. Координаты с базового изображения принимаются за безошибочные. Преобразование координат точек соседнего изображения производится с использованием параметрической функции (обычно степенным полиномом). Например, полным полиномом третьей степени (6.21).

$$X' = a_0 + a_1X + a_2Y + a_3XY + a_4X^2 + a_5Y^2 + a_6X^3 + a_6X^2Y + a_7XY^2 + a_8Y^3, \quad (6.21)$$

$$Y' = b_0 + b_1X + b_2Y + b_3XY + b_4X^2 + b_5Y^2 + b_6X^3 + b_6X^2Y + b_7XY^2 + b_8Y^3,$$

где

(X', Y') — геодезические координаты общей точки на базовом ортоизображении;

(X, Y) — геодезические координаты общей точки на присоединяемом ортоизображении;

a_i, b_i — параметры связи координат.

Сначала с помощью общих контурных точек в зоне перекрытия ортотрансформированных изображений вычисляют параметры связи. Необходимое количество общих контурных точек зависит от выбора аппроксимирующей функции. Так, при использовании полного полинома третьей степени связь координат базового и присоединяемого изображений осуществляют 20 параметров (10 параметров a_i и 10 параметров b_i). Для их нахождения требуется не менее 20 уравнений связи координат вида (6.21). Для каждой общей точки можно составить 2 уравнения вида (6.21). Поэтому в рассматриваемом случае требуется 10 общих контурных точек.

После нахождения параметров связи производят перевычисление геодезических координат всех точек присоединяемого ортоизображения по формулам (6.21). Таким образом производится перетрансформирование присоединяемого ортотрансформированного изображения. В случае неудовлетворительного качества объединения скорректированных изображений (например, из-за неудачного выбора степени полинома или расположения общих точек) процедура перетрансформирования выполняется повторно.

Основными недостатками рассмотренного способа геометрического объединения ортотрансформированных изображений являются:

- невозможность одновременного геометрического объединения нескольких (более двух) ортотрансформированных изображений;
- необходимость неоднократного перетрансформирования исходных цифровых изображений, что ведет к накоплению геометрических погрешностей и снижению дешифровочных свойств цифровых ортофотопланов.

В ряде отечественных ЦФРС используется способ локальной аппроксимации, разработанный в 29 НИИ МО РФ.

Для реализации этого способа развитием пространственной фототриангуляции предварительно определяют ЭВО всех снимков, включенных в обработку. На район работ создается цифровая модель рельефа.

Далее в зоне перекрытия соседних ортотрансформированных изображений вдоль предполагаемой линии объединения выбирают k надежно идентифицируемых общих точек.

Для каждой i -й точки определяются:

- n_i — число снимков, на которых есть ее изображение;
- (X_{ij}, Y_{ij}) — геодезические плановые координаты точки местности i , определенные на ортотрансформированном снимке j ;
- P_{ij} — вес i -й точки на j -м снимке.

Для этих k точек вычисляются средневесовые координаты (X_i, Y_i) по формулам (6.22)

$$X_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} (X_{ij} P_{ij})}{\sum_{j=1}^{n_i} P_{ij}},$$

$$Y_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} (Y_{ij} P_{ij})}{\sum_{j=1}^{n_i} P_{ij}}.$$
(6.22)

Таким образом, в координаты (X_{ij}, Y_{ij}) вводятся приращения

$$dX_{ij} = X_i - X_{ij},$$

$$dY_{ij} = Y_i - Y_{ij}.$$

Далее необходимо изменить положение всех точек по линии объединаения, находящихся в заданной δ -окрестности общих точек, с соблюдением условия непрерывности результирующего ортотрансформированного изображения.

Пусть на j -м исходном ортоизображении выбраны общие точки с координатами $F_{ij} = (X_{ij}, Y_{ij})$, $i = 1; 2; \dots; k_j$, в которые в процессе ортотрансформирования должны быть введены приращения $dF_{ij} = (dX_{ij}, dY_{ij})$. Задана δ -окрестность общих точек. Требуется рассчитать приращения dF в некоторую точку j -го изображения с заданными координатами $F = (X; Y)$ по формулам (6.23).

$$dF = \frac{\sum_{i=1}^{k_j} e^{-h} dF_{ij}}{\sum_{i=1}^{k_j} e^{-h}},$$
(6.23)

где

e^{-h} — экспоненциальная функция,

$$h = \frac{\sqrt{(X - X_{ij})^2 + (Y - Y_{ij})^2}}{\delta}, \quad \delta > 0$$
(6.24)

δ — задаваемый радиус окрестности общих точек, в пределах которой будет осуществляться коррекция ортотрансформированного изображения для сводки идентичных контуров.

Для проведения геометрического объединения необходимо:

1. По формулам (6.23) и (6.24) вычислить приращения $dF = (dX; dY)$ к заданным координатам $(X; Y)$ пикселей ортотрансформированного изображения.
2. Получить скорректированные координаты
 $X' = X - dX,$
 $Y' = Y - dY.$
3. Рассчитать высотную координату Z с использованием $X'; Y'$ и ЦМР.
 $Z = f(X'; Y').$
4. Вычислить координаты $(x; y)$ точки исходного цифрового изображения по координатам $(X'; Y'; Z)$ и ЭВО снимка по формулам (6.25) и определить для этой точки оптическую плотность D на исходном цифровом снимке.

$$x = x_o - f \frac{a_1 \Delta X + b_1 \Delta Y + c_1 \Delta Z}{a_3 \Delta X + b_3 \Delta Y + c_3 \Delta Z}, \quad (6.25)$$

$$y = y_o - f \frac{a_2 \Delta X + b_2 \Delta Y + c_2 \Delta Z}{a_3 \Delta X + b_3 \Delta Y + c_3 \Delta Z},$$

где

$$\Delta X = X' - X_s; \Delta Y = Y' - Y_s; \Delta Z = Z - Z_s.$$

5. Присвоить значение D пикселю ортотрансформированного изображения с координатами $(X; Y)$.

При задании значения δ на уровне среднего расстояния между общими точками снимков погрешность сводки идентичных контуров на линии объединения составляет не более 1 – 2 пикселей.

6.19. Контроль построения ортофотоизображения

Точностные характеристики созданного ортофотоизображения должны соответствовать, в зависимости от характера его последующего использования, требованиям действующих нормативных документов или техническому заданию на производство работ. Эти характеристики устанавливаются по расхождениям контуров на границе рабочей площади и координат контрольных точек, полученных непосредственно по ортофотоизображению и в результате полевых измерений или построения сети пространственной фототриангуляции.

Современные цифровые фотограмметрические системы позволяют выполнить априорную оценку точности ортофотоизображения по контрольным точкам еще до его создания. Для этого измеряют их координаты x, y в прямоугольной системе координат

снимка, по известным элементам внутреннего, внешнего ориентирования снимка и цифровой модели рельефа, определяют их координаты X , Y в системе координат местности. Далее находят ΔX , ΔY , M по формулам:

$$\begin{aligned} \Delta X &= X^T - X, \\ \Delta Y &= Y^T - Y, \\ M &= \sqrt{\frac{\sum (\Delta X^2 + \Delta Y^2)}{n}}, \end{aligned} \quad (6.26)$$

где

X^T , Y^T — истинные координаты опорных точек;

X , Y — координаты тех же точек, полученные фотограмметрическим способом;

M — СКП плановых координат.

M — СКП плановых координат — в соответствии с требованиями технического задания не должно превышать заданных значений.

Возможной причиной несоответствия результатов априорной оценки точности требованиям нормативных документов являются недопустимые погрешности определения высот по цифровой модели рельефа или построения сети пространственной фототриангуляции.

6.20. Расчет параметров аэрофотосъемки при стереофотограмметрической обработке снимков

При стереофотограмметрической обработке определяют планово-высотные координаты точек местности. Решение разных задач с использованием получаемого планово-картографического материала требует различной его точности.

Так, при составлении проекта противоэрозионной организации территории используют планы в масштабе 1:10 000 с сечением рельефа 5 м (в хозяйствах со сложным рельефом с сечением 1 м или 2,5 м). Проект размещения оросительной сети составляют в том же масштабе 1:10 000 с сечением рельефа 0,5 — 1,0 м. В том и другом случае требуемая точность получения плановых координат будет одинаковой, точность получения высот — различной. Следовательно, разными должны быть и параметры съемки, обеспечивающие эту точность.

При выборе параметров АФС прежде всего вычисляют максимально допустимую высоту фотографирования:

$$H_{max} = pm_h / (m_{\Delta p}), \quad (6.27)$$

где

p — среднее значение продольных параллаксов точек стереопары, приближенно равное базису фотографирования в масштабе снимка. При продольном перекрытии $p_x = 60\%$ и формате снимков 180×180 мм $p = 70$ мм;

m_h — допустимая погрешность определения высотных координат точек местности, зависящая от высоты сечения рельефа h , $m_h = 1/3 - 1/5 h$;

$m_{\Delta p}$ — погрешность определения разности продольных параллаксов точек стереопары. В цифровых технологиях ее значение принимают 0,5 размера пикселя цифрового изображения.

Таким образом, для аэрофотосъемки с продольным перекрытием 60% и при формате снимков 180×180 мм максимальная высота фотографирования $H_{max} = 7000 m_h \div 5000 m_h$.

Далее рассчитывают знаменатель масштаба съемки по формуле

$$m \leq Mm_{na} / m_{cn} \quad (6.28)$$

где

m_{na} — допустимая погрешность координат точки на плане;

m_{cn} — погрешность отождествления и измерения координат точки на снимке.

Выбрав H_{max} и m , можно вычислить фокусное расстояние АФА по известной формуле

$$f_{расч} = H/m.$$

Стандартное фокусное расстояние АФА выбирают ближайшим меньшим к расчетному. Затем вычисляют окончательное значение масштаба фотографирования.

Пример. Рассчитать параметры АФС для создания топографического плана масштаба 1:2000 с сечением рельефа 1 м; погрешность определения высотных координат точек при этом примем 1/5 от высоты сечения рельефа, т. е. $m_h = 0,2$ м. Аэрофотосъемку выполнить с перекрытиями $p_x = 60\%$ и $p_y = 30\%$, размер снимка 180×180 мм.

При таких исходных данных высота аэрофотографирования будет определяться исходя из следующих величин, входящих в формулу (6.27): $p = 70$ мм, $m_h = 0,2$ м, $m_{\Delta p} = 0,010$ мм.

$$H_{max} = (70 \text{ мм} \times 0,2 \text{ м}) / 0,010 \text{ мм} = 1400 \text{ м}.$$

Полагая, что $m_{na} = 0,3$ мм и $m_{cn} = 0,03$ мм, рассчитывают знаменатель масштаба съемки по формуле (6.28). $m = 0,3 \text{ мм} \times 2000 / 0,03 \text{ мм} = 20\,000$.

Используя рассчитанные значения высоты и знаменателя масштаба фотографирования, определяют расчетное фокусное расстояние АФА. $f_{расч} = 1400 / 20\,000 = 0,070$ м = 70 мм. Окончательное значение знаменателя масштаба АФС $m = 20\,000$.

6.21. Технология цифровой стереофотограмметрической обработки аэрофотоснимков

Результат цифровой стереофотограмметрической обработки снимков — создание ортофотоплана, который изготавливают на цифровых фотограмметрических рабочих станциях (ЦФРС) и персональных компьютерах, обеспеченных специализированными программами. Одновременно могут обрабатываться несколько блоков, состоящих из сотен снимков.

Ввод изображения осуществляется высокоточными фотограмметрическими сканерами. В процессе сканирования предусмотрена возможность улучшения фотографических качеств исходного изображения (увеличение или уменьшение коэффициента контрастности, проработка в тенях и светлых участках и т. п.). В современных сканерах в автоматическом режиме может быть выполнено сканирование до нескольких сотен снимков.

После ввода изображений осуществляется внутреннее ориентирование снимков путем введения в файл параметров АФА элементов внутреннего ориентирования и данных о дисторсии объектива АФА. Далее следует выполнение фототриангуляции, в процессе которой определяются элементы внешнего ориентирования. Развивают фототриангуляцию согласно составленному проекту, о котором более подробно написано в § 6.9.

Особенность стереофотограмметрической обработки снимков — необходимость измерения координат всех точек, включенных в обработку, на перекрывающихся снимках, т. е. для каждой измеряемой точки необходимо найти соответствующую точку на соседнем снимке. В современных программах стереофотограмметрической обработки снимков процесс идентификации соответственных точек автоматизирован. Как правило, оператор один раз вручную отождествляет две соответственные точки. При этом координаты (x_1, y_1) ; (x_2, y_2) этих точек на левом и правом снимках определяются автоматически. Разность абсцисс можно принять за средний продольный параллакс p точек стереопары, а разность ординат — за средний поперечный параллакс q тех же точек. В дальнейшем оператор курсором отмечает измеряемые точки лишь на левом снимке стереопары. Для них автоматически определяются координаты (x_1, y_1) на левом снимке и вычисляются приближенные координаты (x_2, y_2) соответственных точек на правом снимке:

$$\begin{aligned}x_2 &= x_1 - p; \\y_2 &= y_1 - q.\end{aligned}$$

Далее работает программа сравнения цифровых изображений левого и правого снимков вблизи соответственных точек. Участок

левого снимка с центром в точке (x_1, y_1) сравнивается с участком правого снимка с центром в точке (x_2, y_2) . В окрестностях точки (x_2, y_2) на правом снимке автоматически отыскивается точка, вокруг которой оптическая плотность распределена так же, как на левом снимке вокруг точки (x_1, y_1) . Точность идентификации определяется коэффициентом корреляции: чем больше коэффициент корреляции, тем надежнее идентификация.

После развития фототриангуляции строят цифровую модель рельефа. В ЦФРС как регулярные ЦМР, так и структурные ЦМР строятся автоматически. Густота сетки пикетов для построения ЦМР задается оператором в зависимости от сложности и высоты сечения рельефа. Построение ЦМР сопровождается автоматическим проведением горизонталей. Однако полностью автоматизированное построение ЦМР в существующих ЦФРС не производится. Неизбежны ошибки при проведении горизонталей по лесным массивам, через реки, по застроенным территориям и т. п. В подобных случаях оператор корректирует построение цифровой модели рельефа при ее стереоскопическом наблюдении на экране монитора. Для этого в цифровых станциях предусмотрены режим выведения пары снимков на экран монитора и возможность получения стереоэффекта с помощью специальных очков, например, поляризационных. Одиночные цифровые модели рельефа, построенные по стереопарам, объединяются в единую цифровую модель рельефа на всю картографируемую территорию. Фрагменты единой ЦМР используются при ортофототрансформировании снимков.

При ортофототрансформировании выполняется трансформирование каждого пикселя или площадки, состоящей из нескольких смежных пикселей, как описано в § 6.16. Каждому элементу трансформирования (пикселю или площадке) присваивается высотная координата, полученная из ЦМР. При таком трансформировании наиболее полно учитывается влияние рельефа местности. В результате ортофототрансформирования получают одиночные ортофотоснимки, которые затем объединяют («сшивают») в единое изображение. Процесс геометрического объединения ортофотоснимков подробно описан в § 6.17.

Далее следует деление единого ортофотоизображения на планшеты (трапеции) принятой государственной разграфки с соответствующим зарамочным оформлением. Такую продукцию называют *ортофотопланом*.

Использование для ортофототрансформирования цифровой модели рельефа приводит к получению изображения земной поверхности в ортогональной проекции. При этом возвышающиеся над ней объекты (здания и сооружения, растительность и т. п.) сохраняют перспективные искажения в виде так называемых «завалов» (рис. 6.21).



Рис. 6.21. а — стереовекторизация высотных объектов; б — внесение поправок в положение высотных объектов на ортофотоизображении; в — определение зон невидимости (геометрической тени) и их заполнение фотоизображением, например, с соседних снимков

Учет высоты возвышающихся объектов при ортофототрансформировании позволяет получить ортогональную проекцию не только земной поверхности, но и расположенных на ней объектов. Такое изображение называется *истинным ортофотоизображением* — *True Ortho* (рис. 6.22).



Рис. 6.22. Создание истинных ортофотопланов (*True Ortho*):

а — ортоизображение со смещенными крышами зданий (видны фундаменты);
 б — ортоизображение без смещения крыш зданий, заполнение зон невидимости

6.22. Аппаратные средства и программное обеспечение цифровой обработки снимков

Внедрение способов цифровой фотограмметрии и особенно ее переход на использование персональных компьютеров позволили самим пользователям осуществлять фотограмметрическую обработку снимков. Теперь нет необходимости в дорогостоящих и сложных оптико-механических приборах и высококвалифицированных кадрах для работы на них.

Основой аппаратных средств являются компьютеры, важнейшими характеристиками которых, с точки зрения потребителя, можно считать тактовую частоту процессора, емкость жесткого диска и его быстродействие. Рост значений этих характеристик увеличивает стоимость компьютера. Поэтому при выборе аппаратного сред-

ства важно найти оптимальное соотношение между его стоимостью и требуемыми функциональными возможностями. Термин «обработка снимков» вытесняется термином «работа со снимками». Этому способствуют два фактора.

Во-первых, доступность и возможности компьютерной техники позволяют выполнить весь процесс фотограмметрической обработки снимков самими пользователями, а не только немногочисленными специализированными организациями.

Во-вторых, профессиональные пакеты программ, обладая логичной структурой, удобством пользовательского интерфейса, стали доступны для работы специалистам различных прикладных областей: землеустроителям, почвоведом, кадастровым инженерам.

Фотограмметрическое программное обеспечение имеет свои специфические особенности. Это прежде всего необходимость работы с огромными по объему файлами и пространственная привязанность информации.

Для фотограмметрической обработки снимков требуется в 2–5 раз больше дискового пространства, чем занимает обрабатываемый снимок.

Для работы с большими объемами файлов используются специальные форматы данных: иерархические, блоковые и др. Иерархическая структура представляет собой пирамидные слои. Это серии цифровых изображений одного и того же снимка, полученных с различной разрешающей способностью. От слоя к слою разрешающая способность уменьшается в 2–4–8 раз и т. д. (рис. 6.23).

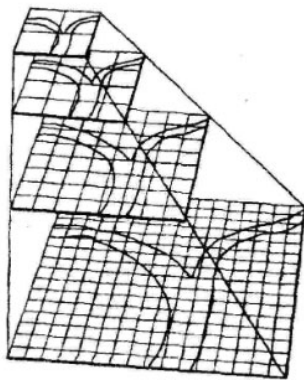


Рис. 6.23. Пирамида изображений

Сблокированная структура — совокупность блоков (небольших квадратных участков изображения с прямым доступом к каждому из них).

Использование специальных форматов данных решает одну из проблем работы с оцифрованными снимками — вывод записанного

растрового изображения на экран дисплея. Проблема возникает из-за того, что на экране обычно можно разместить 2048×1536 пикселей, размер же снимка может составлять $10\,000 \times 10\,000$ пикселей. Часто обрабатываемый снимок изображается в двух окнах. В одном окне — весь снимок с уменьшенной разрешающей способностью (прореженный), в другом окне — фрагмент (блок) оригинального снимка. Все действия оператора отображаются в обоих окнах.

Современные пакеты программ обработки снимков разработаны таким образом, чтобы хранить не результаты обработки, а исходные снимки и алгоритмы, позволяющие в нужный момент получить нужный результат.

Это объясняется следующим. Во-первых, каждое преобразование ведет к потере исходной информации, и заранее, как правило, неизвестно, насколько важна эта потеря. Во-вторых, быстроедействие современных компьютеров и высокая стоимость дисковой памяти делают экономически выгодным повторять при необходимости операции с исходным изображением, чем заполнять память преобразованными изображениями.

6.23. Критерии систем цифровой обработки аэро- и космических снимков

Выбор и использование программных средств для фотограмметрической обработки снимков обусловлен набором выполняемых технологических процедур.

Существуют следующие критерии для сравнения и классификации комплексов цифровой обработки изображений.

1. *Характеристика аппаратных средств* — вычислительная платформа, ее минимальная конфигурация, операционная система.

2. *Интеграционные свойства* — входные и выходные форматы растровых данных; совместимость с ГИС, пакетами картографических программ, информационными базами данных; возможность импорта-экспорта результатов фотограмметрических измерений и преобразований, включая результаты определений координат центров фотографирования, определяемых в полете, и т. п.

3. *Функциональность* — подразделение на системы специального назначения и полнофункциональные; первые осуществляют технологические процедуры определенного назначения, например, создание ЦМР или выполнение фототриангуляции. Как правило, подобные программы входят независимой составной частью (отдельным модулем) в общий пакет фотограмметрической системы. Полнофункциональные системы обеспечивают выполнение всех технологических операций, связанных с фотограмметрической обработкой снимков:

- управление проектом;
- сканирование аналоговых снимков с последующей коррекцией оптической плотности или цвета цифрового изображения и организация пирамид изображений;
- внутреннее ориентирование снимков в ручном или автоматическом режиме, включая учет дисторсии объектива съёмочной системы, внутренней рефракции лучей, нарушения подобия изображения при сканировании, вызванного применением сканеров с недостаточной позиционной точностью;
 - взаимное ориентирование снимков в ручном или полуавтоматическом режиме;
 - выполнение и уравнивание фототриангуляции с использованием для внешнего ориентирования опорных точек и (или) координат центров фотографирования;
 - первичное трансформирование снимков (эпиполярный разворот);
 - создание цифровой модели рельефа (в автоматическом режиме по регулярной сетке, с последующим редактированием модели, или в ручном режиме — структурной ЦМР);
 - ортофототрансформирование с последующим объединением (сшивкой) трансформированных изображений, фотограмметрической и фотометрической коррекцией по линиям объединения, созданием мозаичного ортофотоплана с зарамочным оформлением;
 - выполнение стереонаблюдений для камерального дешифрирования и переноса результатов полевого обследования.

4. *Технологические характеристики систем* — объем одновременно обрабатываемых снимков (размер блока), возможность обработки панорамных, целевых, сканерных изображений, аэро- и космических снимков, возможность преобразования изображений в различные картографические проекции, возможность работы с компрессированными (сжатыми) изображениями.

5. *Эргономичность интерфейса* — включает удобство и разнообразие функций и возможностей манипуляции с изображениями, удобство управления измерительной маркой и т. п.

6. *Точность фотограмметрических преобразований* характеризует систему величиной погрешности получения положения точки в координатном пространстве. При этом система должна обладать возможностями учета позиционной погрешности пикселя цифрового изображения, вызванной геометрическими искажениями сенсора съёмочной системы и модели построения изображения, нарушением подобия изображения при сканировании и др.

7. *Средства контроля точности* производства отдельных технологических процессов.

8. *Надежность* — устойчивость к сбоям программы, наличие опций контроля некорректности работы оператора и системы на данном технологическом этапе или операции.

9. *Адаптационные возможности* — развитие пользовательских приложений. Данный критерий может быть определяющим при экономической и производственной оценке эффективности использования системы, так как позволяет изменять приложения в соответствии с изменением требований к выходной продукции на нормативном и правовом уровнях.

При мониторинге земель дистанционными методами процедуры цифровой обработки снимков связаны с сопоставлением фондовых и новых материалов АКС. Таким образом, к рассмотренному ряду критериев выбора программных средств следует добавить следующие:

- возможность фотограмметрической обработки снимков, полученных различными типами съемочных систем;
- возможность интерпретационной обработки изображений;
- возможность хранения и фотограмметрической обработки изображений, представленных в растровой и векторной формах;
- возможность сравнения фондовых и новых растровых или векторных изображений;
- наличие программных модулей, позволяющих проведение анализа выявленных изменений.

В настоящее время разработаны тематические программные комплексы (ESRI, ERDAS Imagine, ER MAPPER, EASY SPACE и др.), предназначенные для выявления изменений исследуемых территорий по разновременным изображениям, полученным различными типами съемочных систем.

6.24. Алгоритм испытаний систем цифровой фотограмметрической обработки снимков

Существует достаточное количество систем, используемых для фотограмметрической обработки аэро- и космических снимков. Возникает проблема их оптимального выбора и оценки их функциональности. В связи с этим необходима процедура сравнения характеристик данных систем. Для оценки фотограмметрических систем используют следующий алгоритм испытаний, позволяющий сравнивать функциональные, технологические и операционные возможности тестируемых цифровых станций.

1. Выбор и подготовка исходных материалов, используемых для тестирования:

- черно-белые аэронегативы, обладающие максимально возможной разрешающей способностью; этим требованиям в настоящее время соответствуют снимки, полученные камерой RC-30 на импортной аэрофотоплёнке (AGFA, Kodak);

- количество снимков до 100, что позволяет создание фотограмметрического блока с подразделением его на подблоки. Это дает возможность более гибкой и корректной оценки стратегии фототриангуляции; кроме того, опыт работы производственных организаций показывает, что размер блока на один проект (объект) в среднем состоит из 100 снимков;

- параметры аэрофотосъемки стандартные, применяемые для выполнения производственных задач: продольное перекрытие 60 %, поперечное перекрытие 30 – 40 %, масштаб $1: m = 10\,000 - 20\,000$;

- координаты центров фотографирования определены в любой из применяемых на данный объект системе координат;

- материалы полевой плано-высотной привязки аэроснимков.

Предварительно выполняют расчет размера звена или блока фототриангуляции (расстояние между опознаками) и определяют их расположение.

2. Содержание и методика тестовых испытаний.

2.1. Преобразование аналоговых изображений в цифровые растровые.

Преобразование необходимо выполнять фотограмметрическими сканерами с разрешением 5 – 10 мкм, типа PHOTOSCAN, DSW-200, ПРОФСКАН. Уменьшение размера пикселя сканирования в настоящее время можно считать нецелесообразным по следующим причинам:

- при формировании аналогового (фотографического) снимка суммарная позиционная погрешность регистрации оптического изображения на фотозмульсионном слое достигает 10 мкм и более;

- уменьшение пикселя растрового изображения предполагает уменьшение размера элемента матрицы, что вызовет геометрические и энергетические шумы при сканировании;

- резко увеличится объем необходимой памяти обрабатывающего комплекса.

Регистрация цифровых снимков должна выполняться в формате, который поддерживается обрабатывающей программой. В настоящее время, по данным ГИС-ассоциации, в мире используют форматы DXF — 38 %, MRMD TAB — 20 %. Формат TILED TIFF, широко применяемый в РФ, в мире используется на уровне 3 %. При несовпадении форматов должна быть возможность проведения конвертирования в формат тестируемой станции.

2.2. Создание фотосхемы, пирамид изображений.

2.3. Сравнение эффективности фототриангуляции.

Главным критерием фототриангуляции являются остаточные погрешности на контрольных точках после процесса уравнивания фототриангуляционной сети. Оценивают эргономичность, временные и трудовые затраты на проведение данного технологического этапа. В ходе выполнения оценивают некоторые функциональные возможности:

– учет деформаций изображений, вызванных внутренними и внешними факторами, определяющий восстановление закона построения снимка;

– технологичность и удобство наблюдений координатных меток;

– возможность проведения самокалибровки;

– способы построения фототриангуляционного ряда или блока;

– степень автоматизации наблюдений связующих, опорных и определяемых точек, а также надежность работы оптического коррелятора при автоматической идентификации точек на соседних снимках;

– автоматическое выявление ошибок;

– возможность использования координат центров фотографирования (КЦФ), определяемых бортовыми GPS/ГЛОНАСС в полете, и угловых элементов внешнего ориентирования, измеряемых инерциальными системами навигации.

Дополнительным тестом выявляют возможность работы с разновременными и разнотипными снимками.

2.4. Сравнение способов построения стереомодели и оценка эффективности стереонаблюдений.

Для данного исследования должны быть выбраны снимки на участки местности с различным рельефом в количестве, обеспечивающем достоверность конечных результатов. Данные сравнительные испытания позволяют выявить возможности системы по следующим критериям:

– функциональность:

- автоматическое или производимое оператором эпполярное (предварительное) трансформирование снимков стереопары;
- возможность создания стереомодели по элементам внешнего ориентирования, полученным из фототриангуляции;
- активный или пассивный способы стереоскопического наблюдения модели;
- способ наведения на измеряемую точку — перемещение курсора относительно изображения или изображения относительно курсора;
- возможность обработки цветных изображений;
- возможность фотометрической коррекции изображений (изменений интегральной плотности, контраста, проработки в тенях, цветового баланса, цветового контраста и т. п.);

– эргономичность:

- утомляемость зрительного аппарата исполнителя в течение длительных наблюдений;
- удобство перемещения измерительного курсора по стереомодели;
- возможность изменения формы, размера и цвета измерительного курсора.

2.5. Сравнение эффективности автоматического создания цифровой модели рельефа.

Применение различных способов создания ЦМР и интерполирования высот, реализованных в фотограмметрических станциях, определяет стратегию автоматического построения модели рельефа. Стратегия обработки снимков должна обеспечивать требуемую точность информации о рельефе и технологичность процесса построения ЦМР. В результате автоматического построения ЦМР оцениваются следующие показатели:

- точность полученной ЦМР — оценка может быть выполнена по связующим точкам, высоты которых получены из фототриангуляции, и контрольным пикетным точкам, определяемым в полевых условиях геодезическими способами; при этом количество контрольных точек зависит от сложности рельефа на участках обработки;
- скорость автоматического построения ЦМР может характеризоваться временем, затрачиваемым на единицу наблюдения, или количеством наблюдений в единицу времени, а также временем на обработку единицы площади (стереопару);
- эффективность реализуемых в программе способов объединения ЦМР, полученных по стереопарам (так называемых локальных ЦМР), в единую модель рельефа на объект обработки;
- способы ручного редактирования, включающие скорость операций, удобство интерактивного редактирования;
- способы визуализации информации о рельефе (горизонтали, высотные точки, вертикальные профили);
- возможность представления горизонталей с заданным сечением, утолщения кратных горизонталей, нанесения берг-штрихов, выделения информации о рельефе по заданным параметрам;
- возможность экспорта ЦМР в другие системы в различных форматах.

2.6. Производство ортофототрансформирования и создание мозаичного ортофотоплана.

Система должна тестироваться по качеству ортофотоизображения, создаваемого в пределах единой ЦМР. Эффективность данного технологического этапа оценивают по следующим показателям:

- точность ортофототрансформирования и ортофотоизображения, оцениваемая по плановым контрольным точкам, количество которых определяется нормативными документами и инструкциями;
- постоянство величины разрешения по всей площади ортофотоизображений;
- точность взаимного положения контуров по линии объединения (сшивки) ортофотоизображений;
- минимизация различий оптической плотности (цвета) изображений одноименных объектов по линии сшивки;

- возможность выделения заданных фрагментов ортофотоизображения, в том числе разделение на ортофотопланы с зарамочным оформлением, соответствующим инструкциям;
- время, затраченное на ортофототрансформирование единицы площади;
- возможность экспорта конечной продукции в различные программы в растровых форматах.

2.7. Стоимость цифровых фотограмметрических станций.

Рассмотренная методика служит базовой при оценке и сравнении цифровых фотограмметрических систем, используемых для создания и обновления ортофотопланов.

6.25. Устройства ввода-вывода изображений

Цифровые технологии фотограмметрической обработки снимков предусматривают использование специального комплекса технических средств — цифровых фотограмметрических рабочих станций (ЦФРС), включающих устройства ввода-вывода изображений и вычислительный комплекс.

Поскольку исходным материалом для цифровых технологий в большинстве случаев остаются аэрофотоснимки, их необходимо преобразовать в цифровой вид — цифровать. Цифрование может производиться в двух вариантах: растровом и векторном.

Получение *растрового* изображения — поэлементная запись исходного изображения в трехмерном коде: плановые координаты точки на изображении (x , y) и закодированная оптическая плотность или цвет этой точки. Технические средства, осуществляющие растровое цифрование, — сканеры, сам процесс цифрования изображения сканером называют *сканированием*. Сканеры — сложные оптико-электронные устройства для автоматизированного цифрования изображений. Они незаменимы при вводе фотоизображений, однако требуют больших компьютерных ресурсов.

Если сканированное полутоновое изображение визуализировать на экране дисплея, то снова получают полутоновое изображение.

Сущность процесса *векторизации* описана в § 5.12. Векторизацию можно проводить вручную с помощью дигитайзеров, а также на экране монитора в ручном, полуавтоматическом или автоматическом режимах.

В зависимости от конструкции и принципа действия различают планшетные и барабанные сканеры.

Планшетные сканеры имеют следующие конструктивные особенности:

- сканируемый материал (фотоснимок) размещается на горизонтальном предметном стекле;

- приемником излучения является линейка светочувствительных элементов (ПЗС-линейка);
- объектив, строящий изображение на ПЗС-линейке, неподвижен относительно нее.

Вариант конструкции планшетного сканера показан на рисунке 6.24.

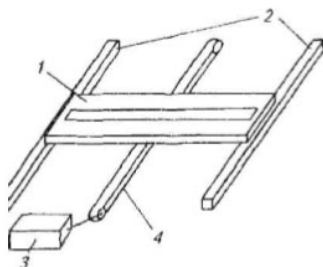


Рис. 6.24. Схема планшетного сканера:

- 1 — подвижная каретка; 2 — направляющие; 3 — механический привод;
4 — ременная передача

Сканируемый фотоснимок помещают на предметное стекло. Под стеклом может перемещаться подвижная каретка 1, на которой находится фотометрический блок. Он состоит из объектива и ПЗС-линейки. Приемник излучения одновременно регистрирует отраженную энергию от всех элементов строки изображения. Таким образом, осуществляется электронная строчная развертка. Кадровая развертка выполняется в результате пошагового движения каретки по направляющим 2 перпендикулярно сканирующей линейке. Каретку приводит в движение механический привод 3 посредством ременной передачи 4.

На каждом шаге сканирования светочувствительные элементы ПЗС-линейки считывают информацию с элементарных площадок сканируемого изображения. Центр площадки называют *точкой позиционирования*, а *растром изображения* — упорядоченное множество точек позиционирования.

Процесс формирования растра показан на рис. 6.25. ПЗС-линейка, жестко связанная с объективом, перемещается вдоль оси Y . В идеальном случае точки позиционирования располагаются в узлах регулярной сетки квадратов, и растр имеет строго прямоугольную форму. В каждой точке позиционирования кодируется среднее значение оптической плотности элементарной площадки оригинала.

На практике удается получить не идеальный, а искаженный растр. Точки позиционирования искаженного растра не лежат в узлах сетки квадратов. Приблизить реальный растр к идеальному можно двумя способами: совершенствуя конструкцию сканера, повышая точность юстировки его узлов или создавая на основе калибровки сканера математическую модель искажений, используемую в дальнейшем для коррекции растра.

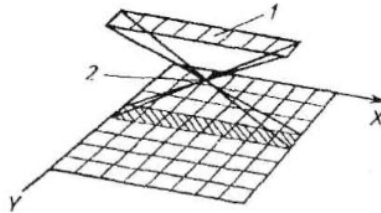


Рис. 6.25. Процесс формирования растрового изображения:

1 – ПЗС-линейка; 2 – объект

Первый путь ведет к значительному повышению стоимости сканеров (приблизительно в 10 – 40 раз). Ведущие фирмы-изготовители сканеров пошли по второму пути.

В комплекте со сканером они поставляют программное обеспечение для исправления метрических искажений раstra, так называемую коррекционную программу. Такая программа восстановления раstra позволяет учесть искажения изображения, возникшие в процессе сканирования, а также искажения, вызванные деформацией основы фотоматериала (пленки или бумаги). Для этого на снимок в момент экспонирования впечатывают контрольную сетку крестов, координаты которых известны с высокой точностью.

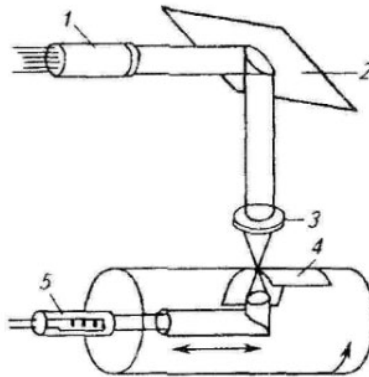


Рис. 6.26. Схема барабанного сканера:

1 – ФЭУ; 2 – зеркало; 3 – объектив; 4 – оригинал; 5 – лампа

В барабанных сканерах (рис. 6.26) в качестве приемников излучения используют фотодиоды, которые обладают лучшими фотометрическими характеристиками, чем ПЗС-линейки. Сканируемый материал закрепляют на прозрачном барабане, который вращается над неподвижным приемником излучения. Таким образом, строчная развертка в барабанных сканерах осуществляется электронным способом, а кадровая — вращением барабана.

Основные технические характеристики сканеров:

- позиционная точность;
- линейная разрешающая способность;
- энергетическая разрешающая способность.

У цветных сканеров — еще и глубина цвета.

Линейная разрешающая способность показывает размер элементарной площадки сканирования и измеряется в dpi (количество пикселей в дюйме изображения). Разрешающая способность 2000 dpi означает, что на один дюйм (25,4 мм) длины изображения приходится 2000 элементарных площадок сканирования (пикселей), т. е. размер одного пикселя 12,7 мкм.

Энергетическая разрешающая способность сканера характеризует количество ступеней серого тона от белого до черного, реально воспринимаемых сканером, измеряется в битах. Энергетическая разрешающая способность 8 бит означает, что сканер воспринимает 2^8 градаций серого тона. Энергетическая разрешающая способность зависит от вида приемника излучения. У фотодиодов она выше, чем у ПЗС-линеек.

Позиционная точность сканера характеризует степень нарушения подобия сканируемого и сканированного изображений и представляет собой СКП положения точек реального и идеального раstra. Она во многом зависит от его конструкции и измеряется в микрометрах.

Устройства, позволяющие вывести на печать цифровую информацию, называются плоттерами или принтерами. *Плоттеры* выводят изображение на широкоформатные материалы (бумагу, пленку, кальку). Для вывода малоформатных изображений используют принтеры.

По принципу построения изображения различают *векторные* и *растровые* плоттеры. В векторных плоттерах пишущими элементами являются фломастеры, рапидографы, ручки. Они перемещаются по полю выводимого изображения и рисуют различные линии. Растровые плоттеры, так же как и принтеры, формируют изображение построчно в одном направлении. Векторные плоттеры в фотограмметрии практически не применяют.

В растровых плоттерах используют различные способы печати. В связи с этим их разделяют на электростатические, термовосковые, лазерные, струйные и др. Наиболее широко применяют струйные плоттеры, печатающая система которых состоит из картриджей, заполненных чернилами, и струйной головки. Последняя имеет вид матрицы, состоящей из крохотных сопел, через которые капельки чернил из картриджа выдавливаются на носитель. Существуют два основных вида струйной печати: термopечать и пьезоэлектрическая. Термopечать осуществляется горячими чернилами, пьезоэлектрическая — холодными. В связи с этим разрешающая способность

пьезоэлектрической струйной печати достигает 1440 dpi, в то время как термопечать может обеспечить максимальную разрешающую способность 720 dpi.

6.26. Технологическая схема создания цифровых моделей местности

Технологическая схема представляет собой последовательность взаимосвязанных технических и организационных процессов, в результате выполнения которых получают цифровую модель местности. При создании моделей местности по материалам аэро- и космических съемок традиционно выполняются следующие процессы:

- разработка технико-экономического проекта;
- выполнение аэро- или космической съемки;
- геодезическая привязка снимков;
- дешифрирование снимков;
- фотограмметрическая обработка снимков и получение цифровых моделей местности.

Каждый из перечисленных процессов имеет свои особенности и способы реализации. Поэтому их сочетание приводит к многообразию вариантов технологий при создании цифровых моделей местности. На выбор технологической схемы прежде всего влияет вид конечной продукции: требуемая метрическая точность, содержание и объем семантической информации модели. Существенными факторами, определяющими выбор технологии, являются техническое обеспечение (компьютеры, программы, устройства ввода-вывода), квалификация исполнителей и сроки выполнения работ. Помимо этого учитываются физико-географические и климатические факторы района производства работ. С позиций экономики технология должна обеспечивать минимальные затраты на единицу выходящей продукции, например, затраты на создание планово-картографической продукции на один гектар или квадратный километр.

Рассмотрим некоторые технологические схемы получения информационных моделей местности.

Технологическая схема создания ортофотоплана методом цифровой стереофотограмметрической обработки снимков представлена на рис. 6.27. В данной схеме технической базой является автоматизированная система кадастрового картографирования Intergraph.

Отличительной особенностью данной технологии является использование стереоскопической обработки снимков, при которой в полной мере учитывается рельеф местности. Методы цифровой фотограмметрии позволяют организовать процесс изготовления ортофотопланов с требуемой точностью, но меньшими материаль-

ными, трудовыми и временными затратами. Рассмотрим основные этапы создания ортофотоплана.

Полевая *маркировка* представляет собой процесс установления на местности искусственных опорных знаков (опознаков). Маркировка искусственными опознаками выполняется на местности, где нет естественных контуров, уверенно опознаваемых на снимках. Эта работа выполняется до аэрофотосъемки. На местности роют неглубокие каналы, наносят линии известью или используют иные материалы. Форма опознака может быть различной: крест, квадрат, У-образная форма и т. п. Размер знака зависит от масштаба получаемых снимков. Маркировку осуществляют в заранее намеченных зонах, удовлетворяющих требованиям фотограмметрической об-

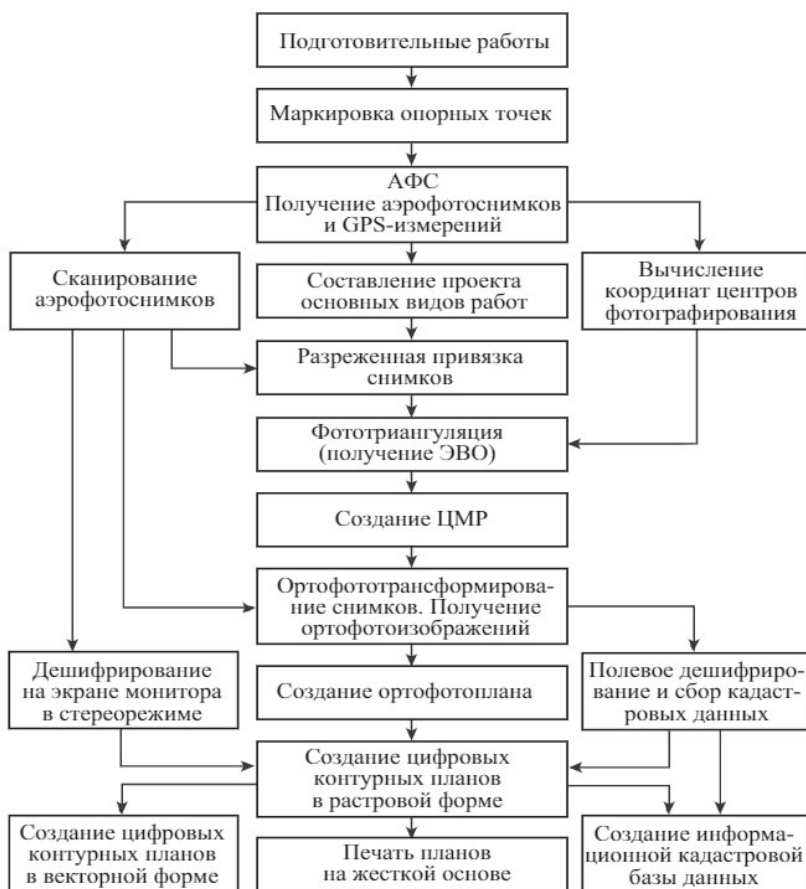


Рис. 6.27. Технологическая схема создания ортофотоплана и кадастрового плана по материалам АФС

работки снимков. Для облегчения нанесения границ маркируют сохранившиеся поворотные пункты границ землепользований. Масштаб аэрофотосъемки, высота фотографирования рассчитываются таким образом, чтобы обеспечить необходимую точность определения плановых и высотных координат.

При *разреженной привязке* снимков опорные точки располагают в углах и в центре маршрута или блока. Блок может быть составлен из 50 – 100 снимков и более.

Фотограмметрическая обработка включает: сканирование и создание библиотеки цифровых снимков, внутреннее ориентирование снимков, ввод цифровых изображений и данных, необходимых для обработки снимков, маршрутную или блочную фототриангуляцию, создание цифровой модели рельефа, ортофототрансформирование, изготовление электронного ортофотоплана. Потребителю ортофотоплан передается в растровой или векторной форме на магнитном или бумажном носителе.

В существующих технологиях фотограмметрической обработки в среде цифровых фотограмметрических станций (ЦФС) используют два вида изображений: полученные цифровыми съемочными системами и после сканирования аналоговых изображений. В последнем случае необходимо рассчитать оптимальный размер пикселя сканирования.

Согласно действующей инструкции по фотограмметрическим работам, размер пикселя рассчитывается по следующим формулам:

– для обеспечения заданной точности определения плановых координат точек местности:

$$P_s = \frac{M_{na}}{2m_c} V_s;$$

– для обеспечения заданной точности определения высот:

$$P_z = \frac{b}{2fm_c} V_s;$$

– для сохранения информационных свойств сканированного снимка размер пикселя должен быть примерно в 2,5 раза меньше линейного разрешения исходного изображения:

$$P_R = \frac{0,4}{\rho_c},$$

где

M_{na} — знаменатель масштаба создаваемого плана;

m_c — знаменатель масштаба исходного снимка;

V_s — допустимая СКП плановых координат;

V_z — допустимая СКП высотных координат;

ρ_c — линейное разрешение исходного аналогового изображения.

Контрольные вопросы

1. Какие требования предъявляют к опорной точке при ее выборе?
2. Для каких целей выполняется фототриангуляция?
3. Каковы принципиальные отличия способов производства фототриангуляции?
4. Каково назначение связующих и опорных точек при фототриангуляции?
5. Как следует выбирать параметры аэрофотосъемки, чтобы увеличить расстояние l между опознаками с целью сокращения полевых работ по привязке аэроснимков?
6. Почему применение АФА с меньшим фокусным расстоянием требует построения ЦМР при последующей фотограмметрической обработке одиночных снимков?
7. Нужны ли опорные точки при взаимном ориентировании пары снимков?
8. Какие элементы ориентирования снимков необходимо знать для построения фотограмметрической модели?
9. Почему для внешнего ориентирования фотограмметрической модели опорные точки необходимо располагать в зоне перекрытия?

Тесты

1. Что такое продольный параллакс точек стереопары?
 - а) разность абсцисс соответственных точек левого и правого снимков стереопары;
 - б) разность ординат соответственных точек левого и правого снимков стереопары;
 - в) длина базиса фотографирования в масштабе снимка.
2. Что такое поперечный параллакс точек стереопары?
 - а) разность абсцисс соответственных точек левого и правого снимков стереопары;
 - б) разность ординат соответственных точек левого и правого снимков стереопары;
 - в) длина базиса фотографирования в масштабе снимка.
3. Построение фотограмметрической модели является результатом
 - а) внутреннего ориентирования снимка;
 - б) внешнего ориентирования снимка;
 - в) взаимного ориентирования снимка.

4. Определение геодезических координат опорных точек фотограмметрическим методом называется
 - а) фототриангуляцией;
 - б) обратной фотограмметрической засечкой;
 - в) привязкой аэрофотоснимков.

5. Где используют элементы взаимного ориентирования снимков?
 - а) при построении фотограмметрической модели;
 - б) для внешнего ориентирования фотограмметрической модели;
 - в) для решения прямой фотограмметрической засечки.

6. Во избежание потери информации и геометрических искажений в процессе сканирования аналоговых снимков линейная разрешающая способность сканера должна быть
 - а) больше разрешающей способности снимка;
 - б) меньше разрешающей способности снимка;
 - в) равна разрешающей способности снимка.

7. Назначение ЦМР при фотограмметрической обработке одиночного снимка
 - а) для внутреннего ориентирования снимка;
 - б) для решения прямой фотограмметрической засечки;
 - в) для решения обратной фотограмметрической засечки.

8. В структурной ЦМР высотные пикеты располагают
 - а) в узлах сетки квадратов;
 - б) в характерных точках рельефа (на перегибах склонов, вдоль орографических линий);
 - в) на поперечниках линейных объектов.

9. В регулярной ЦМР высотные пикеты располагают
 - а) в узлах сетки квадратов;
 - б) в характерных точках рельефа (на перегибах склонов, вдоль орографических линий);
 - в) на поперечниках линейных объектов.

Глава 7. Основы фотограмметрической обработки сканерных снимков

Как рассмотрено ранее, в оптико-электронных сканерах для регистрации излучения используют сенсоры в виде ПЗС-линейки. Число элементов, образующих ПЗС-линейки, может достигать десятков тысяч. Линейное разрешение оптико-электронных съемочных систем соответствует размеру элементов, составляющих ПЗС-линейку.

Изображение (снимок) состоит из множества сканов, полученных при съемке местности. Каждый скан создается в результате поступательного движения летательного аппарата (рис. 7.1). В процессе съемки ПЗС-линейки ориентированы перпендикулярно направлению полета. Поступательное движение спутника обеспечивает развертку изображения по оси x . Снимки, полученные методом оптико-электронного сканирования, создаются путем объединения смежных сканов (строк), каждый из которых формируется из собственного центра, в соответствии с законами центрального проектирования. Каждый скан формируется в определенный, последовательный момент времени. При этом сканы (строчки будущего изображения) имеют индивидуальные элементы внешнего ориентирования, определяемые пространственным положением сканера. Для данных снимков невозможно применить методы классической фотограмметрической обработки, поскольку изображение не является единой центральной проекцией.

На рис. 7.2 показана система координат сканера с одной ПЗС-линейкой.

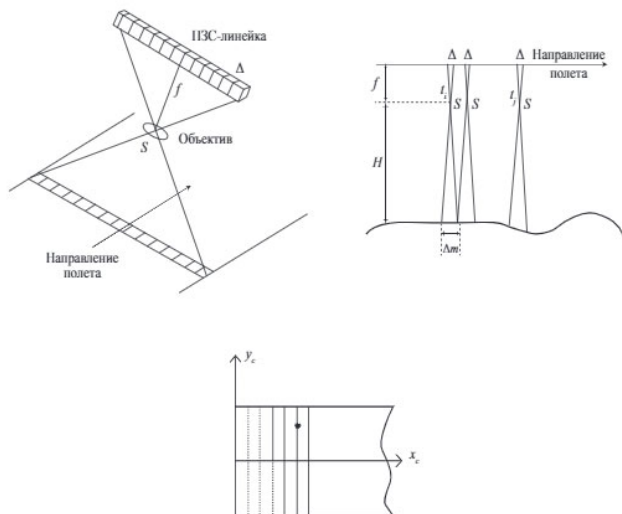


Рис. 7.1. Схема построения изображения при сканерной съемке с использованием сенсора ПЗС-линейки

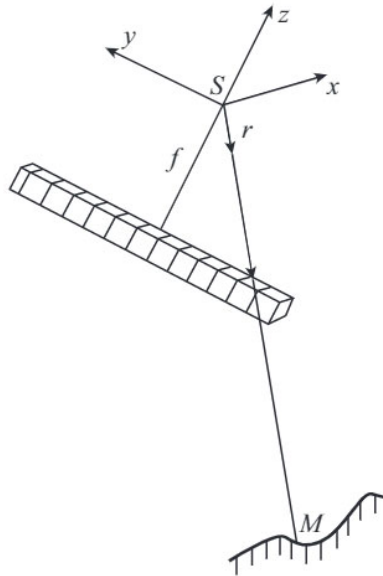


Рис. 7.2. Начало системы координат сканера $Sxyz$ совпадает с центром проекции S ; ось z проходит через центр проекции перпендикулярно линейке ПЗС; ось y параллельна линейке ПЗС; ось x дополняет систему координат до правой (совпадает с направлением полета носителя)

Геометрические особенности изображений, полученных цифровыми сканирующими съемочными системами, накладывают определенные требования к математическому аппарату и программному обеспечению, позволяющему учесть их при дальнейшей фотограмметрической обработке.

Фотограмметрическая обработка одиночных снимков, учитывающая эти особенности, в общем случае сводится к вычислению трансформированных координат x^0, y^0 , отнесенных к некоторой плоскости или поверхности, причем:

$$\begin{aligned} x^0 &= F_x(x, y, Q), \\ y^0 &= F_y(x, y, Q), \end{aligned} \tag{7.1}$$

где

F_x, F_y — вид функции;
 Q — параметры орбиты, сенсора и др.

Для создания ортофотопланов или цифровых моделей местности с точностью, близкой к разрешению исходного изображения, необходимо применять достаточно сложные модели. Среди применяемых для этой цели методов можно выделить:

- математически строгий;
- параметрический;
- аппроксимационный;
- полиномиальные.

7.1. Математически строгий метод

Данный метод предполагает фотограмметрическую обработку каждого скана, при которой восстанавливается его пространственное положение. Метод основан на определении линейных элементов внешнего ориентирования каждого скана, ориентации сенсора (угловых элементов внешнего ориентирования), а также использовании геометрической модели сенсора — элементов внутреннего ориентирования. При этом описывают съемочный процесс с использованием трех моделей:

- модель перемещения сенсора;
- модель вращения сенсора;
- модель сканирования.

Модель перемещения сенсора (орбитальная) описывается шестью элементами Кеплеровой орбиты и позволяет определять координаты мгновенных центров фотографирования для каждого скана.

Модель вращения служит для определения матрицы мгновенных поворотов съемочной системы в момент получения скана, аналогичных угловым элементам внешнего ориентирования топографического снимка. Датчики платформы фиксируют угловое положение носителя (съемочной системы) $\alpha_0; \omega_0; \varkappa_0$ в заданный момент времени. С помощью модели вращения уточняется угловое положение $\alpha, \omega, \varkappa$ изображения каждого скана. Уточненные угловые элементы вычисляются по формулам

$$\begin{aligned} \alpha &= \alpha_0 + \alpha_1 t + \alpha_2 t^2, \\ \omega &= \omega_0 + \omega_1 t + \omega_2 t^2, \\ \varkappa &= \varkappa_0 + \varkappa_1 t + \varkappa_2 t^2. \end{aligned} \quad (7.2)$$

Геометрическая модель сенсора (сканирования) определяет направление проектирующего луча при съемке. Модель основана на особенностях конструкции сканирующей системы и не может быть построена по косвенным данным. Модели сканирования представляют коммерческую тайну соответствующих фирм, что превращает обработку полученных с помощью конкретной съемочной системы изображений в сложную технологическую задачу.

Точный подход к обработке сканерных снимков основан на восстановлении связи лучей, существовавшей в момент формирования изображения каждым ПЗС-элементом, и решении уравнений коллинеарности:

$$\begin{aligned} x - x_0 &= -f \frac{a_{11}(X - X_s) + a_{12}(Y - Y_s) + a_{13}(Z - Z_s)}{a_{31}(X - X_s) + a_{32}(Y - Y_s) + a_{33}(Z - Z_s)}, \\ y - y_0 &= -f \frac{a_{21}(X - X_s) + a_{22}(Y - Y_s) + a_{23}(Z - Z_s)}{a_{31}(X - X_s) + a_{32}(Y - Y_s) + a_{33}(Z - Z_s)}, \end{aligned} \quad (7.3)$$

где

- X_s, Y_s, Z_s — координаты центра фотографирования в момент съемки;
- X, Y, Z — геодезические координаты точки;
- x, y — координаты точки на изображении;
- f — фокусное расстояние камеры;
- x_0, y_0 — координаты главной точки;
- a_{ij} — элементы матрицы поворота на углы α, ω, κ .

Решение уравнений (7.3) осложняется тем, что для каждой строки сканерного изображения элементы внешнего ориентирования $X_s, Y_s, Z_s, \alpha, \omega, \kappa$ различны и зависят от параметров съемки (для космических снимков — от значений параметров орбиты).

7.2. Параметрический метод

Метод фотограмметрической обработки основан на применении проективных или аффинных преобразований координат соответственных точек снимков и местности. Один из вариантов проективного преобразования известен как метод прямого *линейного трансформирования* DLT (Direct Linear Transformation). Он основан на применении формул связи координат соответственных точек двух взаимно проективных плоскостей:

$$\begin{aligned} x &= \frac{a_1 X + a_2 Y + a_3 Z + a_4}{c_1 X + c_2 Y + c_3 Z + 1}, \\ y &= \frac{b_1 X + b_2 Y + b_3 Z + b_4}{c_1 X + c_2 Y + c_3 Z + 1}. \end{aligned} \quad (7.4)$$

Для равнинной местности принимают $Z = const$ и используют формулы:

$$\begin{aligned} x &= \frac{a_1 X + a_2 Y + a_3}{c_1 X + c_2 Y + 1}, \\ y &= \frac{b_1 X + b_2 Y + b_3}{c_1 X + c_2 Y + 1}, \end{aligned} \quad (7.5)$$

где

x, y — координаты точки в системе координат изображения;

X, Y, Z — координаты соответствующей точки в системе координат местности;

a_i, b_i, c_i — параметры проективного преобразования.

Уравнения (7.4) и (7.5) приводят к линейному виду путем разложения в ряд Тейлора, после чего для каждой опорной точки с известными координатами составляют два уравнения поправок вида:

$$\begin{aligned} d_{1x}\delta a_1 + d_{2x}\delta a_2 + d_{3x}\delta a_3 + d_{4x}\delta a_4 + d_{5x}\delta c_1 + d_{6x}\delta c_2 + d_{7x}\delta c_3 + l_x &= v_x, \\ d_{1y}\delta b_1 + d_{2y}\delta b_2 + d_{3y}\delta b_3 + d_{4y}\delta b_4 + d_{5y}\delta c_1 + d_{6y}\delta c_2 + d_{7y}\delta c_3 + l_y &= v_y, \end{aligned} \quad (7.6)$$

где

$d_{1x}, d_{2x}, \dots, d_{7y}$ — частные производные от функций (7.4) или (7.5) по соответствующим неизвестным.

Решение уравнений (7.6) методом наименьших квадратов дает неизвестные параметры a_i, b_i, c_i преобразования координат. Недостатком метода является необходимость использования большого количества опорных точек и недостаточная устойчивость решения системы нормальных уравнений.

7.3. Аппроксимационный метод

Аппроксимационный метод фотограмметрической обработки известен как метод RPC (Rational Polynomial Coefficients или Rapid Positioning Capability), базирующийся на использовании полиномиальной модели съёмочной камеры и следующих формул связи координат точек местности и изображения:

$$\begin{aligned} x_N &= \frac{P_1(\varphi_N, \lambda_N, h_N)}{P_2(\varphi_N, \lambda_N, h_N)}, \\ y_N &= \frac{P_3(\varphi_N, \lambda_N, h_N)}{P_4(\varphi_N, \lambda_N, h_N)}, \end{aligned} \quad (7.7)$$

где в числителях и знаменателях стоят полиномы третьей степени:

$$P_q(\varphi_N, \lambda_N, h_N) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 \sum_{k=0}^3 a_{ijkq} \varphi_N^i \lambda_N^j h_N^k, \quad (7.8)$$

$$q = \overline{1, 4},$$

где

$\varphi_N, \lambda_N, h_N$ — широта, долгота и геодезическая высота искомой точки на местности;

x, y — координаты искомой точки в системе координат изображения.

Вычисление полиномиальных коэффициентов, входящих в формулы (7.7) и (7.8), требует не менее 39 опорных точек, расположенных достаточно равномерно по площади обрабатываемого участка местности.

Геометрические модели оптико-электронных съемочных систем не общедоступны и представляют коммерческую тайну соответствующих фирм, что превращает обработку полученных с их помощью материалов в достаточно сложную задачу.

7.4. Полиномиальные методы

Методы основаны на использовании полиномов различных порядков для связи координат точек снимка и местности.

Эта модель наиболее часто применяется в процессах трансформирования и задается следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} x_0 &= a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2 + \dots + a_kx^i y^j + \dots + a_n y^t, \\ y_0 &= b_0 + b_1x + b_2y + b_3x^2 + b_4xy + b_5y^2 + \dots + b_kx^i y^j + \dots + b_n y^t, \end{aligned} \quad (7.9)$$

где

x_0, y_0 — координаты точки местности;

$a_0, a_1, \dots, a_n, b_0, b_1, \dots, b_n$ — полиномиальные коэффициенты, отвечающие за сдвиг изображения, преобразования масштаба и вращение;

t — порядок полиномиального преобразования;

i, j — показатель степени, при этом $i + j \leq t$.

При использовании полиномиальных методов необходимо опорные точки располагать за границей области обработки. Также следует иметь в виду, что допустимые остаточные расхождения в плановых координатах опорных точек еще не гарантируют допустимых погрешностей планового положения остальных точек изображения. Полиномиальные методы не требуют использования цифровых моделей рельефа.

Глава 8. Наземная стереофотограмметрическая съемка

Цели изучения:

- знать теоретические основы наземной стереофотограмметрической съемки;
- знать технологию производства наземной стереофотограмметрической съемки и применение ее для решения прикладных задач.

Наземная стереофотосъемка с использованием прибора фототеодолита возникла еще в конце XIX в. как способ картографирования горных районов. В результате наземной стереофотосъемки в 1945 г. бы измерен пик Победы на Памире. В 1950 — 1960-х гг. при картографировании высокогорья на Кавказе с помощью наземной фототеодолитной съемки создавалась планово-высотная опорная сеть для обработки аэрофотоснимков. Проводились также съемки открытых рудных месторождений для определения объемов выработанной породы, осуществлялся мониторинг движения горных ледников и т. п.

В настоящее время в наземной фотограмметрии в основном используют цифровые фотокамеры.

Для выполнения наземных фотограмметрических съемок созданы метрические цифровые камеры. В этих камерах, как правило, объектив и светоприемная ПЗС-матрица жестко закреплены в корпусе камеры, обеспечивая постоянство элементов внутреннего ориентирования камеры. Элементы внутреннего ориентирования этих камер, включая параметры фотограмметрической дисторсии, определяют на заводе-изготовителе. Помимо метрических камер для фотограмметрических работ используют любительские и профессиональные цифровые съемочные камеры. Эти камеры должны быть предварительно подвергнуты процедуре фотограмметрической калибровки.

Наземную стереофотосъемку по виду ее использования можно разделить на две категории: качественная оценка форм объекта и измерительная. В первом случае главное — получение стереоэффекта как дополнение к видовым кадрам, что позволяет значительно лучше оценить формы и структуру исследуемого объекта. Стереофотосъемка для получения метрической информации требует измерения координат точек на полученных снимках и математической обработки результатов измерений.

Наземная стереофотограмметрическая съемка имеет много общего с традиционной аэрофотосъемкой, что позволяет, с учетом некоторых особенностей, применять аналогичные методы фотограмметрической обработки наземных снимков.

Сущность получения метрической информации по результатам наземной съемки заключена в следующем.

Наземная фотограмметрическая съемка основана на фотографировании местности с двух или нескольких точек (станций фотографирования). Полученные при этом стереопары в дальнейшем обрабатывают стереофотограмметрическим методом. Для фотосъемки используют, как правило, бытовые или полупрофессиональные цифровые камеры, предварительно прошедшие фотограмметрическую калибровку. В результате калибровки определяют элементы внутреннего ориентирования камеры x_o, z_o, f , размерность которых выражена в пикселях, а также дисторсию объектива съемочной камеры. По результатам фотограмметрической обработки создают цифровые модели местности, планы фасадов зданий и сооружений, топографические планы возвышающихся объектов местности (терриконов, ущелий, ледников, элементов горных участков и т. п.).

При этом точность метрической информации зависит от параметров съемки, съемочной аппаратуры, полноты учета различных деформаций наземных снимков и корректности их фотограмметрической обработки.

8.1. Основные случаи наземной стереофотосъемки

В зависимости от положения главных оптических осей объектива фотоаппарата различают следующие виды наземной стереофотосъемки: конвергентная, равноотклоненная и нормальная.

При *конвергентной стереосъемке* (рис. 8.1, а) проекции направлений оптических осей объективов фотокамер на горизонтальную плоскость пересекаются ($\gamma \neq 0$).

При *равноотклоненной стереосъемке* (рис. 8.1, б, в) оптические оси фотокамер взаимно параллельны и составляют некоторый угол с базисом фотографирования S_1S_2 .

В *нормальной стереосъемке* (рис. 8.1, г) оптические оси фотокамер взаимно параллельны и перпендикулярны базису фотографирования.

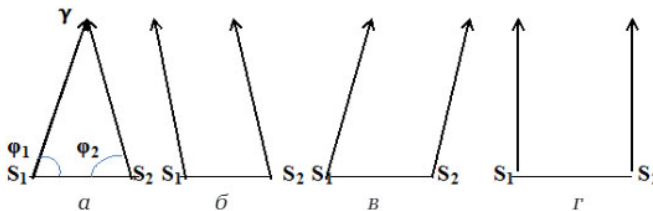


Рис. 8.1. Основные виды наземной стереофотосъемки

В общем случае стереофотосъемка может выполняться при различных направлениях оптической оси фотокамеры без строгого ориентирования снимков и при произвольном ее расположении.

Для высотных объектов фотосъемку выполняют с концов вертикальных базисов фотографирования (рис. 8.2) или при наклонном положении оптических осей (рис. 8.3).

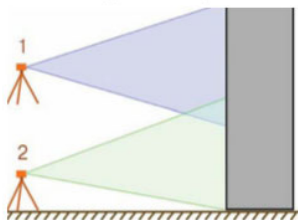


Рис. 8.2. Стереодосъемка объекта с концов вертикального базиса фотографирования

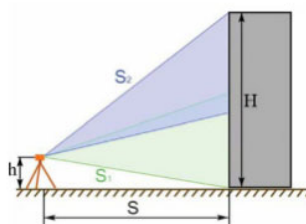


Рис. 8.3. Стереодосъемка объекта при наклонном положении оптической оси фотокамеры

Наклонное расстояние S_2 от точки фотографирования до верхней кромки здания в верхнем маршруте будет больше, чем расстояние S_1 в нижнем маршруте. Поэтому масштаб снимков верхнего маршрута будет мельче масштаба снимков нижнего маршрута.

Фотографирование производят с постоянной фокусировкой цифровой фотокамеры при каком-либо крайнем положении трансфокатора (зумера). Для получения изображения по закону центральной проекции фотокамера должна иметь центральный затвор. При наличии в фотокамере шторно-щелевого затвора съемку выполняют при максимально возможных коротких выдержках. Для минимизации смаза фотоизображения фотографировать следует со штатива.

Перед съемкой выполняют рекогносцировку для определения расположения станций фотографирования. При минимальном количестве станций необходимо обеспечить покрытие снимками всей поверхности объекта.

При нечетких элементах поверхности снимаемого объекта выполняют ее маркировку с определением пространственных координат маркированных точек.

Геодезические измерения в сравнительно небольшом объеме и закрепление точек понадобятся при съемке с двух или более базисов для определения их взаимного положения и привязки к используемой геодезической системе координат.

При выборе схемы съемки необходимо обеспечить:

- заданную точность определения координат точек объекта при минимальном количестве станций фотографирования. Для этого рассчитывают расстояние от камеры до объекта и величину базиса фотографирования;
- полное покрытие изучаемого объекта снимками при отсутствии «мертвых» зон (частей объекта, не отобразившихся на снимках);
- возможность распознавания на снимках мелких деталей объекта.

8.2. Математическая основа фотограмметрической обработки наземных снимков

Основные определения и формулы наземной фотограмметрии аналогичны определениям и формулам, используемым при фотограмметрической обработке аэрофотоснимков, полученных топографическими аэрофотоаппаратами.

Координаты точек на наземных снимках измеряют в прямоугольной системе координат $x'o'z'$, где начало системы координат o' может располагаться в точке пересечения линий, соединяющих середины сторон снимка или в точке, расположенной в левом нижнем углу цифрового снимка, ось $o'x'$ — горизонтальна, ось $o'z'$ — перпендикулярна оси $o'x'$.

Положение наземных снимков стереопары в геодезической системе координат определяют двенадцать элементов внешнего ориентирования снимков: геодезические координаты левого и правого центров фотографирования: $(X_{S1}^r, Y_{S1}^r, Z_{S1}^r)$, $(X_{S2}^r, Y_{S2}^r, Z_{S2}^r)$; дирекционные углы α_1 , α_2 и углы наклона ω_1 и ω_2 оптических осей фотокамер, а также углы поворота снимков κ_1 и κ_2 .

Между координатами точки изображения на наземном снимке и геодезическими координатами соответственной точки местности (наземного объекта) существует аналитическая зависимость, выражаемая известными уравнениями коллинеарности:

$$\left. \begin{aligned} X^r &= X_{S1}^r + (Y^r - Y_{S1}^r) \frac{a_1(x_1 - x_0) + a_2 f + a_3(z_1 - z_0)}{b_1(x_1 - x_0) + b_2 f + b_3(z_1 - z_0)}; \\ Z^r &= Z_{S1}^r + (Y^r - Y_{S1}^r) \frac{c_1(x_1 - x_0) + c_2 f + c_3(z_1 - z_0)}{b_1(x_1 - x_0) + b_2 f + b_3(z_1 - z_0)}; \\ X^r &= X_{S2}^r + (Y^r - Y_{S2}^r) \frac{a'_1(x_2 - x_0) + a'_2 f + a'_3(z_2 - z_0)}{b'_1(x_2 - x_0) + b'_2 f + b'_3(z_2 - z_0)}; \\ Z^r &= Z_{S2}^r + (Y^r - Y_{S2}^r) \frac{c'_1(x_2 - x_0) + c'_2 f + c'_3(z_2 - z_0)}{b'_1(x_2 - x_0) + b'_2 f + b'_3(z_2 - z_0)}; \end{aligned} \right\} \quad (8.1)$$

где

X^r, Y^r, Z^r — геодезические координаты точки местности;

$(X_{S1}^r, Y_{S1}^r, Z_{S1}^r), (X_{S2}^r, Y_{S2}^r, Z_{S2}^r)$ — координаты левого и правого центров фотографирования соответственно;

$a_p, b_p, c_p, a'_p, b'_p, c'_p$ — направляющие косинусы ориентирования левого и правого снимков, зависящие от углов α, ω, κ и $\alpha', \omega', \kappa'$;

(x_1, z_1) и (x_2, z_2) — измеренные координаты точки на левом и правом снимках стереопары соответственно;

x_0, z_0, f — элементы внутреннего ориентирования съемочной камеры.

Направляющие косинусы, входящие в формулы (8.1), вычисляются по формулам (8.2):

$$\begin{aligned} a_1 &= \cos\alpha \cos\kappa - \sin\alpha \sin\omega \sin\kappa; \\ a_2 &= \sin\alpha \cos\omega; \\ a_3 &= -\cos\alpha \sin\kappa - \sin\alpha \sin\omega \cos\kappa; \\ b_1 &= -\sin\alpha \cos\kappa - \cos\alpha \sin\omega \sin\kappa; \\ b_2 &= \cos\alpha \cos\omega; \\ b_3 &= \sin\alpha \sin\kappa - \cos\alpha \sin\omega \cos\kappa; \\ c_1 &= \cos\omega \sin\kappa; \\ c_2 &= \sin\omega; \\ c_3 &= \cos\omega \cos\kappa. \end{aligned} \tag{8.2}$$

8.3. Расчет параметров наземной стереофотограмметрической съемки

Заданная точность получения пространственных геодезических координат точек объекта местности по материалам наземной съемки может быть обеспечена при оптимальных параметрах ее выполнения. До начала стереофотосъемки производят расчет следующих параметров:

- предельное расстояние от базиса фотографирования до дальней границы снимаемого участка $Y_{\text{пред}}$;
- минимальное расстояние до ближней границы объекта $Y_{\text{мин}}$;
- минимальная длина базиса фотографирования.

Расчет выполняют с учетом размера пикселя ПЗС-матрицы используемой цифровой фотокамеры.

Для нормального вида съемки предельное расстояние $Y_{\text{пред}}$ (рис. 8.4) вычисляют по формуле

$$Y_{\text{пред}} = Y_0 = \frac{fm_D}{8m_p} \left(1 + 16L \frac{m_p}{fm_d} \right), \tag{8.3}$$

где

m_d — заданная средняя квадратическая погрешность (СКП) планового положения точек относительно ближайших пунктов съемочного обоснова-

ния. Для равнинной местности $m_d = 0,3$ мм в масштабе создаваемого плана, для горной местности $m_d = 0,5$ мм в масштабе плана;

m_p — СКП измерения параллаксов точек снимков, зависящая от размера пикселя сенсора фотокамеры.

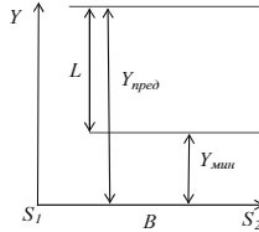


Рис. 8.4. Параметры наземной съемки (L — глубина пространства съемки)

Формула для расчета минимально допустимой длины базиса фотографирования при наземной съемке может быть выведена с использованием известной из стереофотограмметрии формулы связи превышения (h_i) и разности продольных параллаксов (Δp_i):

$$h_i = \frac{H}{p_i + \Delta p_i} \Delta p_i. \quad (8.4)$$

При малых углах наклона α и ω формула принимает рабочий вид:

$$h_i = \frac{H}{b} \Delta p_i. \quad (8.5)$$

После дифференцирования получаем зависимость погрешности определения превышения m_h от параметров съемки (8.6)

$$m_h = \frac{H}{b} m_p. \quad (8.6)$$

При наземной съемке высота фотографирования соответствует удалению объекта от фотокамеры $H=Y_D$. Формула масштаба съемки примет вид

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{Y_D}. \quad (8.7)$$

Формула (8.6) для наземных снимков принимает вид

$$m_d = \frac{Y_D}{b} \cdot m_p = \frac{Y_D m}{bm} \cdot m_p = \frac{Y_D m}{B} m_p, \quad (8.8)$$

где

$B = bm$ — базис фотографирования на местности.

Подставив значение m из формулы (8.7), получаем

$$m_d = \frac{Y_D Y_D}{Bf} m_p = \frac{Y_D^2}{Bf} m_p. \quad (8.9)$$

Из формулы (8.9) получаем формулу для расчета минимального базиса фотографирования B_{\min} :

$$B_{\min} = \frac{Y_D^2}{f m_d} m_p. \quad (8.10)$$

Рассчитанный минимальный базис фотографирования обеспечивает необходимую точность m_d определения координаты Y по направлению съемки. Это позволяет при дальнейшей фотограмметрической обработке наземных снимков вычислить координаты (X^T, Y^T, Z^T) точек местности (объекта) с заданной точностью.

Последовательность расчета расстояния до ближней границы съемки

Данный расчет используют при проектировании наземной стереофотосъемки для создания планов фасадов зданий и сооружений.

1. Известно, что точность результатов фотограмметрической обработки снимков зависит от *размера пикселя цифрового изображения*.

Поэтому первоначально требуется рассчитать необходимый размер элемента изображения (геометрического разрешения) для выбора сенсора цифровой фотокамеры или величины пикселя при сканировании аналогового снимка.

Величину элемента разрешения для определения координат (X^T, Z^T) определяют по формуле

$$p_s = \frac{M_{na}}{2m_c} V_s. \quad (8.11)$$

Для получения заданной точности *координаты Y^T* размер элемента геометрического разрешения определяют по формуле

$$p_z = \frac{b}{2f m_d} V_z, \quad (8.12)$$

где

p_z — величина элемента геометрического разрешения (пикселя);

m_c — знаменатель масштаба съемки;

V_z — СКП вычисленных высотных координат (V_z эмпирически определена в пределах от $1,5V_s$ до $2V_s$).

Для обеспечения необходимой точности пространственных координат (X^T, Y^T, Z^T) из двух рассчитанных по формулам (8.11) и (8.12) значений величины пикселя выбирают **меньшее**.

2. Расчет величины *знаменателя масштаба* наземной съемки.

При съемке фасадов зданий необходимо, главным образом, обеспечить точность получения координат X и Z . Для расчета знаменателя масштаба наземной съемки используем формулу определения геометрического разрешения (8.11)

$$m_c = \frac{M_{пл} V_S}{2p_S}. \quad (8.13)$$

Расчет *расстояния до ближайшей границы* снимаемого объекта выполняют по формуле

$$Y_{ближ} = f m_c. \quad (8.14)$$

8.4. Фотограмметрический метод в архитектуре и строительстве

Фотограмметрический метод позволяет оперативно и при малых временных и материальных затратах произвести обмер и создать планы фасадов архитектурных сооружений.

Особенно эффективен метод при создании фасадных планов и цифровых моделей зданий со сложной архитектурой, таких как культовые сооружения, памятники и т.п. (рис. 8.5).

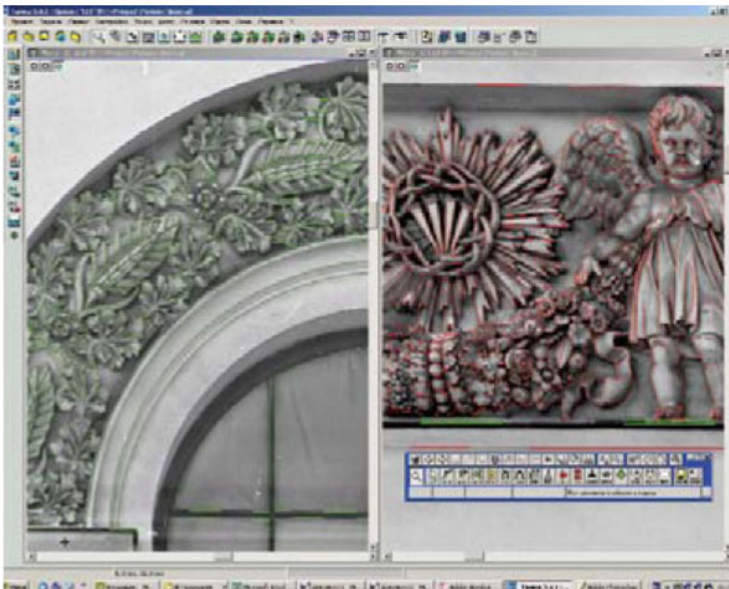


Рис. 8.5. Фрагмент сложного архитектурного элемента

В строительстве фотограмметрический метод применяют для определения деформаций инженерных сооружений, контроля точности монтажа крупных зданий, исследования моделей инженерных сооружений, определения объемов земляных работ, при иных строительных работах.

При выполнении работ по инвентаризации сооружений, в том числе аграрно-производственных комплексов (АПК), а также при реставрационных и реконструкционных работах требуется наличие фронтальных планов фасадов (фасадных планов). Фасадные планы служат основой для установления пространственно-геометрических параметров и взаимного положения элементов фасадов зданий и сооружений. Проведение фасадной съемки дает полное представление о внешнем архитектурно-планировочном решении здания или сооружения. Необходимость в фасадной съемке возникает также при разработке проектов реконструкции с изменениями внешнего вида здания, сдаче в технический надзор смонтированных элементов фасада и т. п.

По результатам съемки фасада:

- создают трехмерные цифровые модели фасадов;
- составляют исполнительные чертежи по вертикальным плоскостям здания;
- оформляют разрезы в необходимых плоскостях.

Существуют два основных способа создания фасадных планов.

Первый — измерение самого сооружения для определения пространственного положения его элементов. Его осуществляют посредством обмерных работ, геодезических измерений с помощью теодолитов или безотражательных тахеометров, лазерного сканирования.

Второй способ — получение пространственного положения элементов сооружения по его фотографическому изображению (модели). Для этого применяют фотограмметрический метод обработки наземных снимков.

В зависимости от сложности сооружения, требуемой точности получения пространственных координат элементов сооружения, материальных и трудовых затрат и т. п. выбирают оптимальный способ создания фасадного плана.

Фотограмметрический метод создания фасадных планов сооружений включает в себя 4 основных этапа:

- расчет параметров стереофотосъемки;
- полевые работы — фотографическая съемка;
- создание ортофотоплана фасада сооружения — фотограмметрическая обработка на цифровых фотограмметрических станциях (ЦФС);
- создание графического плана — преобразование цифрового растрового изображения в векторное.

Расчет параметров съемки выполняют по формулам, известным из наземной фотограмметрии: базис фотографирования в масштабе

снимка (b) и на местности (B), предельно допустимое расстояние от центра фотографирования до объекта ($Y_{\text{прег}}$), масштаб съемки. Параметры съемки должны обеспечить заданную точность определения геодезических координат элементов сооружения при минимальном количестве снимков (станций фотографирования).

Проведение фотосъемки с рассчитанными параметрами должно обеспечить покрытие снимками всей площади фасада, отсутствие «мертвых» зон, достоверность опознавания и дешифрирования элементов сооружения. Съемку проводят калиброванной цифровой камерой «с руки». Создание ортофотоплана фасада выполняют на цифровых фотограмметрических станциях (например, на отечественных ЦФС «ТАЛКА» или «ФОТОМОД»).

Точность создания фасадного плана стереофотограмметрическим методом зависит от параметров съемки: расстояния до объекта, базиса фотографирования на местности, масштаба съемки, величины перекрытия снимков, размера пикселя ПЗС-матрицы фотокамеры.

Оценку точности ортофотоплана выполняют по контрольным точкам, отмеченным на фасаде здания и достоверно идентифицированным на ортофотоплане. Пространственные координаты точек получают с помощью безотражательного тахеометра.

При фотограмметрической обработке снимков цифровую модель поверхности здания (ЦМП) создают в стереорежиме. Для удобного восприятия наблюдателем стереоэффекта при создании ЦМП стереопары получают при нормальном виде съемки и с минимальными перспективными искажениями для уменьшения разномасштабности изображения.

Общая стоимость создания фасадного плана фотограмметрическим методом меньше, чем стоимость аналогичных работ геодезическим методом и лазерным сканированием. Однако технология имеет недостатки: например, ограничение видимости из-за деревьев, значительные затраты по времени обработки материалов фотосъемки.

8.5. Расчет параметров наземной стереофотосъемки для получения трехмерной модели здания или сооружения

1. Рассчитывают минимальный базис фотографирования в масштабе съемки (b).

$$b = \frac{100 - p_x}{100} l_x, \quad (8.15)$$

где

p_x — продольное перекрытие снимков;

l_x — продольная сторона снимка.

В целях увеличения базиса фотографирования при заданном перекрытии снимков следует увеличить величину l_x . Для этого при съемке фотокамеру ориентируют так, чтобы большая сторона кадра располагалась вдоль оси X. Если в дальнейшей фотограмметрической обработке предусмотрена фототриангуляция, то продольное перекрытие снимков p_x принимают равным 60 %.

2. Рассчитывают максимально возможное расстояние (Y) от фотокамеры до объекта, съемка при котором обеспечит заданную точность определения по наземным снимкам координат (Y) точек объекта

$$m_y = \frac{Y}{b} m_p,$$

$$Y = \frac{b}{m_p} m_y, \quad (8.16)$$

где

Y — максимально возможное расстояние от камеры до объекта;
 m_y — заданная точность получения координат точек объекта;
 m_p — СКП измерения координат точек снимка; для черно-белых маркированных точек с высоким контрастом $m_p = \frac{1}{2} - \frac{3}{4}$ пикселя.

3. Вычисляют знаменатель масштаба съемки m:

$$m = \frac{Y}{f}, \quad (8.17)$$

где

f — фокусное расстояние съемочной камеры.

4. Рассчитывают длину базиса фотографирования на местности

$$B_x = m b.$$

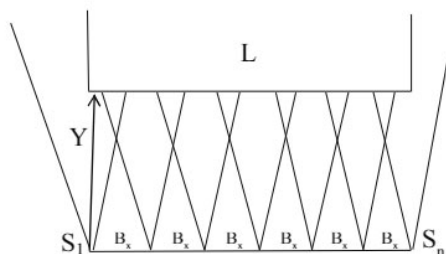


Рис. 8.6. Иллюстрация к расчету размера и числа базисов фотографирования

Рассчитывают число базисов фотографирования n (рис. 8.6), учитывая длину здания L. При этом первую станцию съемки (S_1) располагают в створной линии, перпендикулярной к фасаду здания.

$$n = \frac{L}{B}$$

Количество станций, планируемое для нормального случая съемки, равно $(n+1)$.

При $n = 1$ здание или сооружение фотографируют для получения одной стереопары способом конвергентной съемки, что обеспечивает заданную точность пространственных координат.

Варианты расчета параметров наземной стереофотосъемки для получения планов фасадов зданий и сооружений различных размеров.

Выполнение одномаршрутной фотосъемки при горизонтальном положении главного луча:

– рассчитывают базис фотографирования в масштабе снимка при заданном продольном перекрытии $p_x = 60\%$ и размере продольной стороны l_x снимка, используя формулу (8.15);

– рассчитывают максимальное расстояние до объекта по формуле (8.16);

– вычисляют базис фотографирования на местности:

$$B = \frac{Y}{f} b; \tag{8.18}$$

– оценивают возможность выполнения одномаршрутной съемки одним горизонтальным маршрутом (рис. 8.7). Для этого вычисляют зону захвата съемочной фотокамеры по вертикали по формулам (8.19).

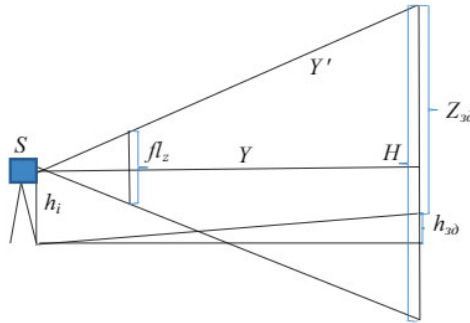


Рис. 8.7. Съемка одним маршрутом при горизонтальном положении главного луча

$$Z_{зд} = \frac{H}{2} + h_i - h_{зд},$$

$$H = l_z \frac{Y}{f}, \tag{8.19}$$

где

$Z_{3д}$ — максимально возможная высота здания при его захвате по высоте одним съемочным маршрутом;

H — захват камерой по высоте на расстоянии Y от здания;

h_i — высота инструмента;

$h_{3д}$ — превышение фундамента здания над пунктом фотографирования;

l_x — поперечная сторона снимка.

Сравнивают реальную высоту здания с максимально возможной $Z_{3д}$. Если рассчитанное $Z_{3д}$ больше реальной высоты здания, съемку выполняют одним маршрутом, в противном случае съемку проектируют несколькими маршрутами или, развернув камеру на 90° , ориентируют длинную сторону снимка по вертикали. При этом все ранее выполненные расчеты повторяют, изменяя величины l_x и l_z .

8.6. Расчет параметров при съемке фасада здания несколькими маршрутами

Как отмечено ранее, как вариант при многомаршрутной фотосъемке используют *вертикальный базис фотографирования*. Для этого применяют различные подъемные механизмы и устройства, позволяющие производить съемку с разных концов вертикальных базисов.

Последовательность расчета параметров съемки следующая:

– рассчитывают вертикальный базис (b_z) фотографирования:

$$b_z = \frac{100\% - p_z}{100\%} l_z, \quad (8.20)$$

где

p_z — поперечное перекрытие (примерно 30%);

l_z — длина поперечной стороны снимка.

– горизонтальный базис на местности рассчитывают аналогично одномаршрутной съемке.

При подобном варианте съемки центры фотографирования располагаются в узлах сетки прямоугольников (рис. 8.8). Вертикальный базис фотографирования на местности B_z определяют по формуле:

$$B_z = \frac{Y_{\max}}{f} b_z. \quad (8.21)$$

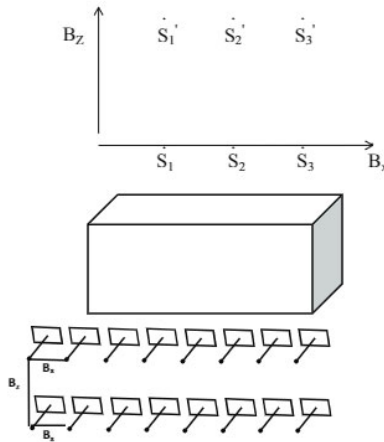


Рис. 8.8. Расположение центров фотографирования при многомаршрутной съемке с вертикальным базисом

В этом случае средний масштаб съемки для снимков разных маршрутов сохраняется постоянным.

В случае стереофотоъемки высотного объекта при наклонном положении главной оптической оси (рис. 8.9) расстояние Y' для второго и последующего маршрутов будет увеличено.

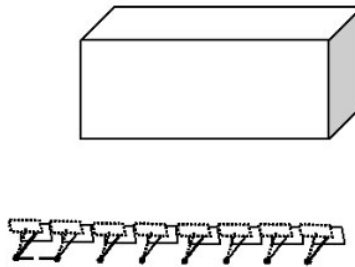


Рис. 8.9. Многомаршрутная съемка при наклонном положении главной оптической оси

Изменится средний масштаб и увеличится разномасштабность каждого снимка в этих маршрутах.

Расстояние Y' до объекта для второго маршрута рассчитывают по формуле:

$$Y' = \sqrt{\left(\frac{H}{2}\right)^2 + Y^2}, \tag{8.22}$$

где

Y — расстояние до объекта для первого маршрута,

Y' — расстояние до объекта для второго и последующих маршрутов.

Величину базиса фотографирования B_x вычисляют для каждого маршрута отдельно по формуле (8.18), подставляя в нее вместо Y расстояние Y' из формулы (8.22). При этом средний масштаб снимков верхнего маршрута будет мельче, базис фотографирования будет больше и количество снимков в верхнем маршруте будет меньше, чем в нижнем.

При выполнении наземной стереофотограмметрической съемки могут возникнуть так называемые «мертвые» зоны (участки объекта, закрытые другими его элементами и не изобразившиеся на стереопаре снимков). Для съемки этих участков производят съемку с дополнительных базисов. На рис. 8.10 «мертвые» зоны, возникающие при проведении съемки с точек фотографирования S_1, S_2, S_3 , показаны серым цветом.

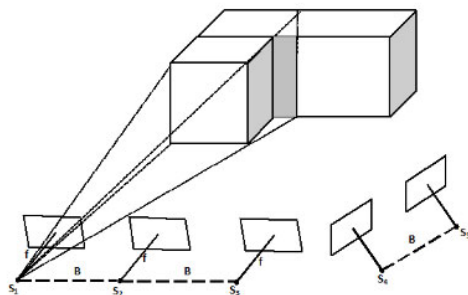


Рис. 8.10. Съемка с дополнительных базисов

Для съемки этой части объекта необходим дополнительный базис фотографирования (S_4-S_5).

Фотограмметрическая обработка одиночных и стереопар наземных снимков производится методами прямой, обратной и двойной обратной фотограмметрической засечки, связок, а также построением маршрутной и блочной фототриангуляции.

В качестве исходной информации при фотограмметрической обработке наземных снимков используют координаты опорных точек и центров проекции снимков.

В общем виде фотограмметрическая обработка наземных снимков аналогична технологии, рассмотренной в главе 6, и включает:

- внутреннее ориентирование снимков;
- построение и уравнивание фототриангуляционной сети;
- построение цифровой модели поверхности;
- ортофототрансформирование наземных снимков;
- построение цифровых моделей зданий и сооружений и элементов земной поверхности;
- оценка качества построенных цифровых моделей.

8.7. Точность наземной стереофотограмметрической съемки

Для нормального случая съемки среднюю квадратическую погрешность пространственных координат точек объекта, определяемых по наземным снимкам, рассчитывают по формулам, полученным дифференцированием основных формул аналитической связи координат соответственных точек объекта и снимка (8.23).

$$\begin{aligned} m_x &= Y \sqrt{\left(\frac{m_x}{f}\right)^2 + \left(\frac{x_1}{f} \frac{m_y}{Y}\right)^2}, \\ m_z &= Y \sqrt{\left(\frac{m_z}{f}\right)^2 + \left(\frac{z_1}{f} \frac{m_y}{Y}\right)^2}, \\ m_y &= \frac{Y^2}{B f} m_p, \end{aligned} \quad (8.23)$$

где

m_x, m_z — СКП измеренных координат на снимке;

m_y — заданная точность определения координаты Y точки объекта;

Y — расстояние от съемочной камеры (от центра фотографирования) до точки местности — аналог высоты фотографирования при аэрофотосъемке;

$x_1; z_1$ — измеренные координаты точки на левом снимке;

m_p — СКП определения продольных параллаксов, $m_p = 0,5 m_x (m_z)$.

При использовании современных цифровых фотокамер m_p зависит от размера пикселя ПЗС-матрицы. Например, если матрица состоит из 20 Мрх1 и ее размер 24×36 мм, то сторона пикселя равна 0,006 мм, или 6 мкм. В этом случае $m_x = m_z = 6$ мкм, $m_p = 3$ мкм.

Приведенные формулы (8.23) определяют характер влияния случайных погрешностей на точность измерения координат точек снимка, что снижает точность вычисления координат точек объекта. Кроме этого, действуют систематические погрешности определения элементов внутреннего (8.24) и внешнего (8.25) ориентирования снимка

$$\begin{aligned} m_x &= \left(f + \frac{x^2}{f}\right) \Delta\alpha - \frac{xz}{f} \Delta\omega + z \Delta\kappa, \\ m_z &= \frac{xz}{f} \Delta\alpha - \left(f + \frac{z^2}{f}\right) \Delta\omega - x \Delta\kappa, \end{aligned} \quad (8.24)$$

где

$\Delta\alpha, \Delta\omega, \Delta\kappa$ — погрешности определения угловых ЭВО снимков.

$$m_x = \frac{x}{f} \Delta f - \frac{x^2}{f^2} \Delta x_0 - \frac{xz}{f^2} \Delta z_0, \quad (8.25)$$

$$m_z = \frac{z}{f} \Delta f - \frac{z^2}{f^2} \Delta z_0 - \frac{xz}{f^2} \Delta x_0,$$

где

$\Delta f, \Delta x_0, \Delta z_0$ — погрешности определения элементов внутреннего ориентирования снимков.

Для получения заданной точности пространственных координат точек объекта необходимо предвычислить требуемые точности определения элементов внутреннего и внешнего ориентирования снимков по формулам (8.23, 8.24, 8.25).

8.8. Калибровка неметрических цифровых фотокамер

Неметрические цифровые камеры, используемые при стереофотограмметрической съемке наземных объектов, в том числе зданий и сооружений, должны быть калиброваны.

Калибровка камер состоит в определении значений элементов внутреннего ориентирования камеры и систематических ошибок оптической системы, вызванных, главным образом, дисторсией объектива. Как известно, результаты калибровки используют при фотограмметрической обработке снимков.

Элементами внутреннего ориентирования являются фокусное расстояние съемочной камеры f и координаты главной точки (x_0, y_0) .

Систематические ошибки оптической системы определяют отличия реальной физической системы от ее математической модели. Дисторсия объектива влияет на геометрию проектирования, что нарушает условие коллинеарности.

Для неметрических камер главная проблема — значительная дисторсия (достигает 100 мкм и более) и неперпендикулярность главного оптического луча к плоскости изображения. Поэтому при калибровке таких камер целесообразно определять не только радиальную дисторсию, но и децентрацию оптической системы.

Дисторсия объектива может быть описана различными уравнениями, например, вида (8.26) и (8.27):

$$\left. \begin{aligned} d_x &= x(r^2 k_1 + r^4 k_2 + r^6 k_3 + \dots) + (r^2 + 2x^2) p_1 + 2xzp_2 \\ d_y &= z(r^2 k_1 + r^4 k_2 + r^6 k_3 + \dots) + 2xzp_1 + (r^2 + 2z^2) p_2 \end{aligned} \right\} \quad (8.26)$$

или

$$\left. \begin{aligned} d_x &= x[(r^2 - r_0^2)k_1 + (r^4 - r_0^4)k_2 + (r^6 - r_0^6)k_3 + \dots] + (r^2 + 2x^2)p_1 + 2xzp_2 \\ d_y &= z[(r^2 - r_0^2)k_1 + (r^4 - r_0^4)k_2 + (r^6 - r_0^6)k_3 + \dots] + 2xzp_1 + (r^2 + 2z^2)p_2 \end{aligned} \right\} \quad (8.27)$$

где

- d_x, d_z — поправки в координаты точек снимка за дисторсию объектива;
- x, y — координаты точек снимка;
- k_1, k_2, k_3 — коэффициенты радиальной дисторсии;
- p_1, p_2 — коэффициенты тангенциальной дисторсии объектива;
- r_0 — радиус-вектор, соответствующий нулевой дисторсии;
- r — расстояние от главной точки с координатами (x_0, z_0) , которое можно вычислить по формуле $r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2}$.

Для описания фотограмметрической дисторсии в большинстве случаев достаточно ограничиться коэффициентами k_1 и k_2 системы уравнений (8.26).

Существует три метода калибровки камер:

- калибровка с помощью коллиматора;
- калибровка с помощью тест-объекта;
- самокалибровка.

Калибровка с помощью коллиматора позволяет определить элементы внутреннего ориентирования камеры в лабораторных условиях. Этот метод в настоящее время редко используется из-за необходимости иметь дорогостоящее оборудование.

Калибровка с помощью тест-объекта. Тест-объект представляет собой пространственный или плоский объект со множеством маркированных точек с известными координатами. Исследования производят по определенной методике, зависящей от вида тест-объекта. Тест-объект фотографируют, на снимках измеряют координаты точек в системе координат снимка и по результатам измерений вычисляют параметры фотокамеры.

Самокалибровка — это метод, позволяющий определять параметры фотокамеры в процессе фототриангуляции, выполняемой по снимкам реальной съемки.

Фототриангуляция с самокалибровкой выполняется по способу связей, который основан на использовании уравнений коллинеарности. Отличие заключается в том, что в уравнения коллинеарности добавляют параметры d_x, d_z , характеризующие систематические ошибки снимков.

При выполнении фототриангуляции с самокалибровкой рекомендуется на каждом снимке измерять не менее 30 точек, распределенных по всей площади снимка.

Методы фотограмметрической калибровки цифровых фотокамер по снимкам пространственного или плоского тест-объектов наиболее широко используются при фотограмметрической калибровке

цифровых фотокамер, применяемых при выполнении наземной фотограмметрической съемки.

Пространственный тест-объект представляет собой пространственное поле маркированных точек. Оптимальный вариант конструкции пространственного тест-объекта представлен на рисунке 8.11.

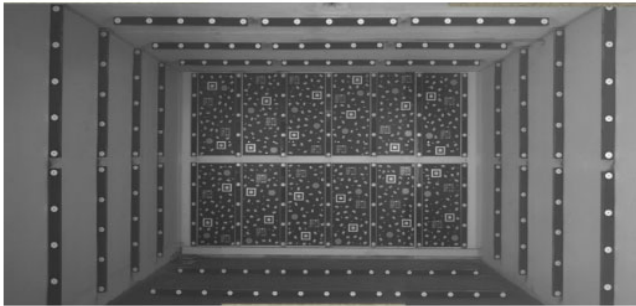


Рис. 8.11. Пространственный тест-объект

Этот тест-объект может быть смонтирован в прямоугольном помещении с размерами по осям X и Z от 2,5 до 5 м, а по оси Y — от 6 до 10 м (рис. 8.12).

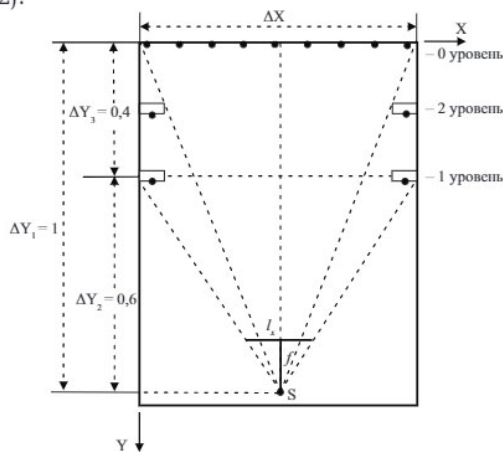


Рис. 8.12. Схема съемки пространственного тест-объекта

На дальней от съемочной камеры стене помещения жестко закрепляют равномерно расположенные маркированные точки. На верхней, нижней и боковых стенах помещения закрепляют ряды маркированных точек в сечениях стен плоскостями, параллельными плоскости дальней стены. Максимальное расстояние между маркированными точками тест-объекта вдоль оси Y должно составлять величину от 0,2 до 0,4 расстояния от дальней стены до точки фотографирования. При калибровке длиннофокусных (узкоугольных)

съемочных камер это отношение выбирается равным 0,4, а короткофокусных (широкоугольных) — 0,2. Для решения задачи калибровки необходимо располагать точки тест-объекта не менее чем в двух плоскостях. Однако для обеспечения возможности калибровки камер с различными фокусными расстояниями и повышения точности калибровки желательно располагать точки тест-объекта в 3–5 плоскостях.

На нулевом уровне марки располагаются по вертикали в 6–7 рядов, в каждом из которых по 8–10 марок.

На первом, втором и последующих уровнях марки располагаются по периферии по 8–10 марок на каждой стене, на потолке и на полу.

Марки тест-объекта должны быть выполнены в виде четких геометрических фигур, обеспечивающих максимальную точность наведения измерительной марки цифровой фотограмметрической системы при измерении координат их изображений на снимках в интерактивном и автоматическом режимах.

Координаты марок тест-объекта должны быть определены в местной прямоугольной системе координат, координатная плоскость XZ должна быть приблизительно параллельна плоскости дальней стены, а ось Y — дополнять систему координат до правой (рис. 8.12).

Координаты (x, z) марок должны быть определены со средними квадратическими погрешностями (m_x, m_z) , максимально допустимые значения которых определяются по формуле (8.28):

$$m_x = m_z = 0,05 \frac{Y_{\min}}{f} \Delta, \quad (8.28)$$

где

Y_{\min} — расстояние по оси Y от точки фотографирования до ближайшей к ней точки тест-объекта;

f — фокусное расстояние съемочной камеры;

Δ — размер пикселя светоприемной матрицы съемочной камеры.

Координаты Y марок должны быть определены со средними квадратическими погрешностями (m_y) , максимальное значение которых определяется по формуле (8.29):

$$m_y = \frac{\Delta Y}{20\,000}, \quad (8.29)$$

где

ΔY — расстояние вдоль оси Y от дальней стены до ближайшей к съемочной камере точки тест-объекта.

Определение пространственных координат марок тест-объекта целесообразно проводить методом прямой геодезической засечки с помощью электронных тахеометров, обеспечивающих измерение

горизонтальных и вертикальных углов со средними квадратическими погрешностями 3"–5".

Определение параметров внутреннего ориентирования съёмочных камер, т. е. их фотограмметрическая калибровка по снимкам пространственного тест-объекта, основано на совместном решении системы уравнений коллинеарности (8.30), составляемых для каждого измеренного на цифровом снимке изображения марки тест-объекта.

Эти уравнения имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} x_0 - f \frac{a_1 (X - X_S) + b_1 (Y - Y_S) + c_1 (Z - Z_S)}{a_2 (X - X_S) + b_2 (Y - Y_S) + c_2 (Z - Z_S)} - x + d_x &= 0 \\ z_0 - f \frac{a_3 (X - X_S) + b_3 (Y - Y_S) + c_3 (Z - Z_S)}{a_2 (X - X_S) + b_2 (Y - Y_S) + c_2 (Z - Z_S)} - z + d_z &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (8.30)$$

где

f — фокусное расстояние съёмочной камеры;

x_0, z_0 — координаты главной точки в системе координат снимка;

x, z — координаты изображения марки тест-объекта в системе координат снимка;

X, Y, Z — координаты соответствующей точки тест-объекта в системе координат объекта;

X_S, Y_S, Z_S — координаты точки фотографирования (центра проекции) в системе координат объекта;

a_i, b_i, c_i — элементы матрицы преобразования координат (направляющие косинусы), являющиеся функциями угловых элементов внешнего ориентирования съёмочной камеры α, ω, κ ;

d_x, d_z — поправки в измеренные на снимке координаты (x, z) изображения марки тест-объекта за дисторсию объектива.

Полученную систему уравнений для всех измеренных на снимке изображений марок тест-объекта решают по способу наименьших квадратов. В результате решения системы уравнений определяют элементы внешнего ориентирования снимка: $(X_S, Y_S, Z_S, \alpha, \omega, \kappa)$, элементы внутреннего ориентирования снимка (f, x_0, z_0) и коэффициенты дисторсии $(k_1, k_2, k_3, p_1, p_2)$ с оценкой точности их определения.

При решении исходные уравнения приводят к линейному виду, раскладывая их в ряд Тейлора с сохранением членов только первого порядка малости, и переходят к уравнениям поправок вида (8.31):

$$B \delta + L = V, \quad (8.31)$$

где

B — матрица коэффициентов уравнений поправок (частные производные от исходных уравнений по неизвестным) размерностью $m \times n$ (m — число уравнений, n — число неизвестных);

δ — матрица поправок к элементам внешнего ориентирования снимка и параметрам внутреннего ориентирования размерностью $1 \times n$;

L — матрица свободных членов размерностью $1 \times m$;

V — матрица поправок в измеренные координаты точек снимка размерностью $1 \times m$.

В нашем случае $m = 2k$ (где k — число марок тест-объекта с измеренными на снимке координатами), а $n = 14$ ($X_S, Y_S, Z_S, \omega, \alpha, \kappa, f, x_o, z_o, k_1, k_2, k_3, p_1, p_2$).

$$B = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{113} & a_{114} \\ b_{11} & b_{12} & b_{13} & \dots & b_{113} & b_{114} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{k1} & a_{k2} & a_{k3} & \dots & a_{k13} & a_{k14} \\ b_{k1} & b_{k2} & b_{k3} & \dots & b_{k13} & b_{k14} \end{pmatrix}; \delta = \begin{pmatrix} \delta X_S \\ \delta Y_S \\ \delta Z_S \\ \dots \\ \delta p_1 \\ \delta p_2 \end{pmatrix}; L = \begin{pmatrix} l_{x1} \\ l_{z1} \\ \dots \\ l_{xk} \\ l_{zk} \end{pmatrix}; V = \begin{pmatrix} v_{x1} \\ v_{z1} \\ \dots \\ v_{xk} \\ v_{zk} \end{pmatrix}. \quad (8.32)$$

Значения коэффициентов уравнений поправок (8.31) a_i, b_i вычисляются по известным значениям координат (x, z) изображений марок тест-объекта, измеренных на снимке, координат марок тест-объекта (X, Y, Z) и приближенным значениям элементов внешнего ориентирования снимка $X_S, Y_S, Z_S, \omega, \alpha, \kappa$ и параметров внутреннего ориентирования снимка $f, x_o, z_o, k_1, k_2, k_3, p_1, p_2$.

Свободные члены l_x, l_z вычисляются по формулам (8.31) таким же образом.

Систему линейных уравнений (8.32) решают по способу наименьших квадратов.

Таким образом, получают поправки ко всем приближенным значениям неизвестных элементов внешнего ориентирования снимка и параметрам внутреннего ориентирования камеры и вычисляют уточненные их значения по формулам (8.33):

$$\begin{aligned} X'_S &= X^o_S + \delta X'_S \\ \vdots & \quad \quad \quad \vdots \\ p'_2 &= p^o_2 + \delta p'_2. \end{aligned} \quad (8.33)$$

По уточненным значениям неизвестных снова составляют уравнения поправок и решают полученную систему уравнений по способу наименьших квадратов. Так продолжают до тех пор, пока поправки к неизвестным станут пренебрегаемо малыми величинами. В результате получают уравненные значения элементов внешнего ориентирования снимка и параметры внутреннего ориентирования камеры. В последнем приближении выполняют оценку точности определения неизвестных, т. е. вычисляют средние квадратические погрешности неизвестных (8.34), (8.35):

$$m_j = \mu \sqrt{Q_{jj}}, \quad (8.34)$$

$$\mu = \sqrt{\frac{V^T P V}{m - n}}, \quad (8.35)$$

где

- μ — средняя квадратическая ошибка единицы веса;
- Q_{jj} — диагональные элементы обратной матрицы;
- $(m - n)$ — число избыточных измерений.

С целью повышения надежности и точности определения параметров внутреннего ориентирования калибруемых камер целесообразно производить съемку тест-объекта многократно с поворотом камеры вокруг оптической оси объектива на 180° и определять искомые параметры в результате совместной обработки измерений, выполненных на всех полученных снимках.

Критерием оценки точности проведенной фотограмметрической калибровки цифровой камеры и, как следствие, критерием пригодности камеры для выполнения фотограмметрических определений являются значения остаточных погрешностей координат марок, измеренных на снимке. Их значения в зависимости от типа калибруемой съемочной камеры должны лежать в пределах от 0,15 до 0,5 пикселя.

8.9. Подготовительные работы при наземной стереофотограмметрической съемке

Подготовительные работы при наземной стереофотограмметрической съемке предусматривают составление проекта съемки и подготовку геодезических инструментов и цифровых фотокамер.

Проект съемки включает пояснительную записку и графическую часть.

Пояснительная записка содержит:

- описание района работ, представляющее собой характеристику всех физико-географических факторов, влияющих на проведение полевых работ (рельефа, гидрографической сети, путей сообщения и т. п.);
- сведения о геодезической опорной сети;
- расчеты по сгущению опорной сети;
- расчеты, связанные с наземной стереофотограмметрической съемкой.

В графическую часть проекта входят следующие схемы:

- расположения и сгущения пунктов опорной геодезической сети;

- определения положения фотостанций и контрольных точек;
- наземной стереофотограмметрической съемки, на которой указываются границы съемки с каждой станции и так называемые «мертвые» зоны.

Все схемы составляют на имеющихся планах и картах, масштаб которых в 4 – 5 раз мельче масштаба съемки.

При составлении схемы размещения фотостанций стремятся к тому, чтобы снять всю необходимую территорию с наименьшего числа станций. При этом должна быть обеспечена заданная точность получения пространственных геодезических координат.

Для этого выполняют рассмотренные ранее предрасчеты, которые выполнялись по строгим формулам.

В практике наземной стереофотограмметрической съемки применяют упрощенные формулы и методику расчета.

Прежде всего определяют предельное расстояние от базиса фотографирования до дальней границы снимаемого участка Y_{np} .

Для нормального вида съемки его вычисляют по формуле:

$$Y_{np} = fm_d / (8m_p), \quad (8.36)$$

где

m_d — заданная средняя квадратическая погрешность планового положения точек относительно ближайших пунктов съемочного обоснования. Для равнинной местности $m_d = 0,3$ мм в масштабе создаваемого плана, для горной местности $m_d = 0,5$ мм в масштабе плана;

m_p — СКП измерения параллаксов точек снимков.

Минимальную допустимую длину базиса фотографирования для нормального вида съемки определяют по формуле:

$$B_{min} = Y_{np} / 8. \quad (8.37)$$

Расстояние до ближайшей границы съемки вычисляют по формуле:

$$Y_{min} = 4B. \quad (8.38)$$

Выполненные расчеты используют при выборе местоположения станций фотографирования на плане. При этом руководствуются следующими положениями:

- точки фотографирования выбирают на возвышенных участках местности;
- угол наклона базиса фотографирования не должен превышать 10° ;
- между концами базиса должна быть прямая видимость.

Проектируемые станции фотографирования и зоны съемки с каждого базиса наносят на схему наземной съемки. Далее составляют схему геодезической привязки фотостанций. При этом для каждого базиса достаточно определить координаты только одного из его концов. Координаты второго конца базиса определяют из решения прямой геодезической задачи, используя измерения длины базиса, его угла наклона и направления.

8.10. Полевые работы при наземной стереофотограмметрической съемке

Полевые работы предусматривают выполнение следующих процессов: рекогносцировки, фотографирования, геодезических работ, дешифрирования снимков.

Рекогносцировку участка работ проводят с целью уточнения предварительного проекта наземной съемки и выноса его в натуру. При этом на местности уточняют расположение фотостанций, точек съемочного обоснования и контрольных точек и проводят их закрепление и маркирование.

Работа на фотостанции предусматривает: фотографирование участка местности; измерение длины базиса фотографирования, его угла наклона и направления, а также другие необходимые геодезические измерения. Перед фотографированием на обоих концах базиса центрируют штативы, на одном из которых устанавливают цифровой фотоаппарат, а на другом — визирную марку и измеряют высоту инструмента. Для фотографирования выбирают такое время суток, когда солнце находится сзади или сбоку от объектива.

В настоящее время при фотографировании с некоторого базиса для получения стереопары не производят строгого ориентирования цифровой камеры. Измерение длины базиса не требуется. Фотографирование производят с постоянной фокусировкой при крайнем положении трансфокатора. При фотографировании рекомендуется применять штатив для устранения смаза изображения, который возможен при съемке «с руки». Съемка может быть выполнена любым исполнителем, владеющим фотоаппаратурой.

Геодезические работы на фотостанции имеют целью определение геодезических координат второго конца данного базиса фотографирования, а также координат контрольных точек. Эти работы проводят в соответствии с ранее разработанной и уточненной схемой определений фотостанций и контрольных точек. Средняя квадратическая погрешность планового положения фотостанций и контрольных точек не должна превышать 0,1 мм в масштабе создаваемого плана, СКП высотных координат этих точек — 0,1 высоты сечения рельефа.

Для внешнего ориентирования фотограмметрической модели необходимо определить координаты опорных точек. Координаты опорных точек измеряют с помощью безотражательных электронных тахеометров. В качестве опорных точек выбирают элементы снимаемого объекта, которые хорошо опознаются на снимках. В случае съемки фасада здания для повышения точности в качестве опорных точек служат закрепленные на поверхности здания специальные марки. Если выполняется съемка с двух и более маршрутов, необходимо определить дополнительные опорные точки в зоне перекрытия маршрутов (рис. 8.13).

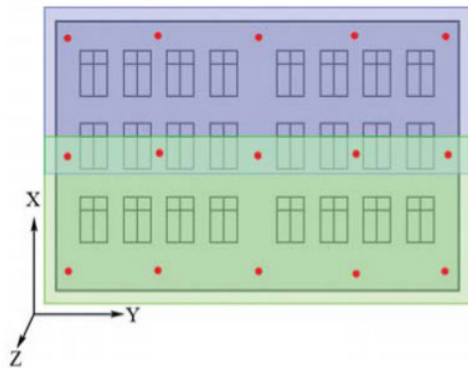


Рис. 8.13. Схема расположения опорных точек

Для определения элементов внешнего ориентирования снимков создают опорную геодезическую сеть в виде замкнутого полигона (рис. 8.14), пункты которой закрепляются на земной поверхности временными знаками, после чего определяют координаты марок на фасадах здания.

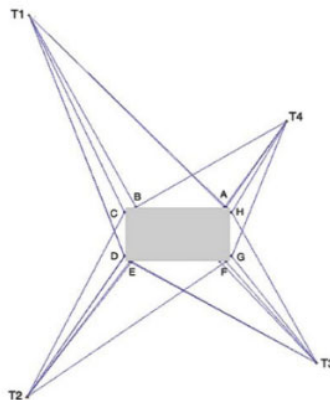


Рис. 8.14. Схема геодезической сети

При строительстве или создании планов фасадов высотных зданий в условиях существующей плотной городской застройки создание опорной геодезической сети в виде замкнутого полигона вызывает затруднения. Во-первых, практически невозможно обеспечить видимость между пунктами сети из-за наличия препятствий различного характера (здания, ограждения и т. п.). Во-вторых, достаточно сложно гарантировать сохранность закрепляемых на земной поверхности временных знаков в условиях строительной площадки. Поэтому для обеспечения заданной точности определения координат пунктов опорной геодезической сети и марок наблюдения необходимо выполнять по трехштативной схеме.

На практике используют технологию определения координат марок методом линейно-угловых засечек, образующих замкнутую пространственную сеть, без создания наземной опорной геодезической сети. Все наблюдения выполняют с произвольных, наиболее удобных для установки прибора точек, без их закрепления временными знаками. В основу геометрии построения пространственной сети положен принцип связующих точек и условие замкнутости. На каждой смежной паре станций наблюдения измерения выполняют как минимум на две одноименные марки, не лежащие на одной вертикали. На последней станции наблюдения вторично проводят измерения на первые марки для замыкания сети. Станции наблюдения выбирают так, чтобы были видны марки на двух смежных фасадах здания (рис. 8.15).

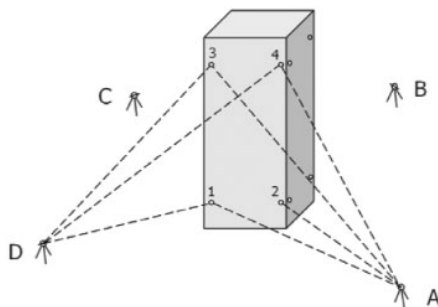


Рис. 8.15. Расположение марок 1, 2, 3 и 4, являющихся связующими для станций наблюдения A и D

Для повышения точности создания сети и обеспечения надежного контроля количество связующих марок должно составлять не менее 3–4 (не лежащих на одной вертикали), и каждую из них необходимо наблюдать по крайней мере с двух станций.

На фотоснимках или фотосхемах опознают и фиксируют все элементы ситуации, подлежащие нанесению на создаваемый план, а также маркированные пункты геодезического съемочного обосно-

вания и контрольные точки. В случае, когда элементы объектов не изобразились на снимках, выполняют досъемку известными из геодезии способами.

После окончания полевых работ проводят их контроль и приемку.

8.11. Использование метода наземной фотограмметрии при решении нетопографических задач

Основное назначение наземной стереофотограмметрической съемки — создание цифровых моделей местности в горных и высокогорных районах. Однако наземную фотограмметрию применяют и для решения нетопографических задач.

Материалы наземной стереофотосъемки используют при составлении проекта рекультивации нарушенных земель. Технологическая схема рекультивации выработанных грунтовых карьеров предусматривает работы по выравниванию поверхности. Для выполаживания откосов с целью обеспечения допустимой крутизны склонов рассчитывают объем снятого грунта, равный объему насыпного грунта.

Объем земляных работ определяют по снимкам стереофотограмметрическим способом. Для этого проводят периодическую фотосъемку ведущихся выработок грунта с закрепленных на местности базисов фотографирования.

Известны различные способы аналитического определения объемов земляных работ: способ горизонтальной сетки, вертикальной сетки, способ уступов, способы вертикальных и горизонтальных сечений и т. п. Наиболее удобен способ использования ЦМР, который заключается в следующем.

Пусть с некоторого базиса было проведено n последовательных фотосъемок с начала выработки карьера и до ее окончания. По каждой из n полученных стереопар создают цифровую модель рельефа. Таким образом получают n моделей рельефа на интересующую территорию за некоторый временной интервал. Высотные пикеты для построения ЦМР выбирают на характерных точках рельефа. Модель рельефа представляет собой многогранник, вершинами которого являются высотные пикеты, а гранями — треугольники. Объем каждой ЦМР определяют численным интегрированием. Разность объемов двух последовательных во времени ЦМР — объем земляных работ за соответствующий промежуток времени.

Наземную фотограмметрическую съемку применяют при освоении склонов с крутизной более 5° в районах интенсивного земледелия. На таких склонах в зависимости от их крутизны проектируют широкополосное, напашное или бульдозерное террасирование.

Террасы используют для выращивания высокодоходных культур (виноград, плодовые, цитрусовые). Топографический план и профили для составления проекта террасирования склонов изготавливают наземным стереофотограмметрическим методом.

Методы наземной стереофотограмметрической съемки используют для контроля хода строительства террас, составления исполнительного плана и осуществления авторского надзора. Обработывая материалы периодических наземных фотосъемок с постоянных базисов, в случае необходимости определяют степень и скорость размыва террас.

По материалам наземной стереофотограмметрической съемки ведут регулярное наблюдение за динамикой эрозионных процессов: скоростью роста оврагов, смещением оползней и т. п.

Для этого периодически производят наземные фотосъемки с постоянных, закрепленных на местности базисов.

По результатам одной съемки устанавливают ширину оврагов L , их глубину h и объем V .

Сопоставление этих значений, полученных по результатам разновременных съемок, дает возможность судить о динамике роста оврагов.

Ширину оврага L вычисляют как расстояние между его бровками в определенном поперечном сечении:

$$L = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2},$$

где

ΔX и ΔY — разности между соответствующими геодезическими координатами левой и правой бровок оврага.

Геодезические координаты точек бровок вычисляют, решая системы уравнений вида (8.1).

Глубина оврага h — разность геодезических высот точек бровки $Z_{бр}^r$ и дна оврага $Z_{гр}^r$, также определяемых из решения системы уравнений (8.1).

Для вычисления объема оврага строят несколько его сечений с различными интервалами D_i между ними, определяют площадь каждого поперечного сечения P_i как площадь полигона с вершинами в основных точках перегибов его контура, а затем объем оврага по формуле (8.39):

$$V = \sum_{i=1}^m \frac{P_i + P_{i+1}}{2} D_i. \quad (8.39)$$

Построение поперечных сечений и вычисление их площадей удобно производить на трехмерном визуализированном изображении (3D-изображении).

По сравнению с геодезическим методом и обмерными работами метод наземной стереофотограмметрической съемки более экономичный и оперативный.

Контрольные вопросы

1. Что общего и в чем различие в стереофотограмметрической обработке наземных и аэрофотоснимков?
2. Как объяснить требования к выбору местоположения станций фотографирования?
3. Нужны ли опорные точки при стереофотограмметрической обработке наземных снимков с известными элементами внешнего ориентирования?

Область применения

Настоящие термины и определения понятий в области аэро- и космической съемки, фотограмметрии, фототопографии рекомендуются для применения во всех видах документации и литературы, входящих в сферу работ по стандартизации и (или) использующих результаты этих работ, а также при изучении соответствующих учебных дисциплин, в том числе дисциплины «Фотограмметрия».

Приведенные термины и определения можно при необходимости изменять, вводя в них производные признаки, раскрывающие смысл определяемого понятия. Изменения не должны нарушать смысл и содержание понятий.

ФОТОГРАММЕТРИЯ — научное и производственное направление, изучающее методы определения метрических характеристик и пространственного положения объектов земной поверхности по их изображению на снимках, сбор информации об объекте или явлении земной поверхности с помощью регистрирующего прибора, не находящегося в непосредственном контакте с данным объектом или явлением. Термин «фотограмметрия» происходит от греческих слов *photos* (свет), *gramma* (запись) и *metreo* (измеряю), что означает измерение изображения объекта, полученного фиксированием идущих от него световых лучей.

Основное применение фотограмметрии связано с созданием по аэро- или космическим снимкам планово-картографического материала различных масштабов и тематической направленности, например, кадастровых планов, почвенных карт. Это направление называют *фототопографией*.

Второе направление связано с определением метрических характеристик объектов по наземным снимкам для решения инженерных задач.

Третье направление, называемое *ближней фотограмметрией*, связано с решением прикладных задач в различных областях науки и техники: строительстве, медицине, криминалистике, автомобилестроении и т. д.

Термины и определения

- Аэрофотограмметрия** — раздел фотограмметрии, относящийся к обработке снимков, полученных с воздушных носителей съемочной системы.
- Аэрофотоснимок топографический** — фотоснимок, полученный при топографической аэрофотосъемке.
- Аэрофотосъемка (топографическая)** — фотосъемка (фотографическая) с воздушного летательного аппарата.
- Аэрофотосъемка (топографическая) перспективная** — топографическая аэрофотосъемка, выполненная при угле отклонения оптической оси съемочной камеры от вертикали, превышающем 3° .
- Аэрофотосъемка (топографическая) плановая** — топографическая аэрофотосъемка, выполненная при угле отклонения оптической оси съемочной камеры от вертикали, не превышающем 3° .
- Местности модель геометрическая** — совокупность точек пересечения соответственных проектирующих лучей, полученная по стереопаре ориентированных топографических фотоснимков.
- Местности модель стереоскопическая** — виртуальное пространственное изображение сфотографированной местности при стереоскопическом рассмотрении пары смежных фотоснимков.
- Местности фотокарта** — карта, сочетающая тоновое фотографическое и штриховое картографическое изображение местности.
- Местности фотосхема** — фотографическое изображение местности, составленное путем монтажа нетрансформированных фотоснимков.
- Монтаж накидной (фотоснимков местности)** — результат упорядоченного размещения фотоснимков местности путем совмещения изображений на соседних перекрывающихся частях.
- Объекта модели фотограмметрической ориентирования внешнего элемент** — один из геометрических параметров, определяющих положение, ориентацию фотограмметрической модели объекта в системе координат объекта съемки и ее масштаб.
- Объекта модель фотограмметрическая** — совокупность координат точек объекта фотограмметрической съемки, определенных в результате фотограмметрической обработки снимков. *Примечание:* Фотограмметрическая модель объекта подобна объекту, может иметь произвольный масштаб и быть произвольно расположена и ориентирована относительно системы координат объекта.
- Объекта модель фотограмметрическая ориентированная** — фотограмметрическая модель объекта, координаты точек которой определены в какой-либо системе координат объекта фотограмметрической съемки.

- Опознак (опорный знак)** — точка объекта фотограмметрической съемки с известными пространственными координатами, опознанная на фотограмметрическом снимке (аналог опорной точки). *Примечание:* Опознак может быть использован в качестве опорной или контрольной точки при фотограмметрической обработке снимка.
- Ортофотоснимок** — топографический фотоснимок, полученный в результате ортофототрансформирования.
- Параллакс поперечный** — разность ординат соответственных точек топографических фотоснимков, составляющих стереопару.
- Параллакс продольный** — разность абсцисс соответственных точек топографических фотоснимков, составляющих стереопару.
- Сдвиг изображения** — смещение оптического изображения относительно сенсора (фотоплёнки) при формировании снимка за время экспонирования, вызванное поступательным или угловым перемещением съёмочной камеры или объекта съёмки.
- Сети геодезической опорной сгущение фотограмметрическое** — фотограмметрическое определение пространственных координат дополнительных точек объекта фотограмметрической съёмки, предназначенных для последующей фотограмметрической обработки фотограмметрических снимков.
- Снимка координаты точки** — координаты точки изображения в системе координат снимка.
- Снимка обработка фотограмметрическая** — совокупность технологических процессов, связанных с преобразованием метрической информации об объекте фотосъёмки, полученной в системе координат снимка, в информацию иной системы координат.
- Снимка одиночного координат точек измерение** — определение значений координат соответственных точек фотограмметрических снимков.
- Снимка оптического проектирования центр** — узловая точка объектива съёмочной камеры, используемой для съёмки. *Примечание:* Различают переднюю и заднюю узловые точки, совпадающие соответственно с центрами внешней и внутренней связок проектирующих лучей.
- Снимка плоскость** — предметная плоскость съёмочной камеры, где расположена аэрофотоплёнка, на которую проектируется оптическое изображение объекта съёмки.
- Снимка точка** — изображение точки объекта съёмки на снимке.
- Снимка точка главная** — точка пересечения плоскости снимка с оптической осью съёмочной камеры.
- Снимка точка надира** — точка пересечения плоскости снимка с отвесным лучом, проходящим через центр оптического проектирования.

- Снимка фотограмметрического метки координатные** — маркированные точки, задающие систему координат фотограмметрического снимка и расположенные на середине сторон или в углах плоскости прикладной рамки съёмочной камеры, изображение которых регистрируется на снимке одновременно с изображением объекта съёмки.
- Снимка фотограмметрического ориентирование** — определение параметров фотограмметрического снимка, характеризующих его положение и ориентацию в пространстве во время съёмки для использования их при фотограмметрической обработке снимка.
- Снимка фотограмметрического ориентирование внешнее** — ориентирование фотограмметрического снимка относительно системы координат объекта фотограмметрической съёмки.
- Снимка фотограмметрического ориентирование внутреннее** — ориентирование фотограмметрического снимка относительно его центра проектирования.
- Снимка фотограмметрического ориентирования внешнего элемент** — один из геометрических параметров фотограмметрического снимка, определяющих его положение и ориентацию в координатном пространстве.
- Снимка фотограмметрического ориентирования внешнего элемент угловой** — один из параметров, определяющих угловую ориентацию фотограмметрического снимка в системе координат объекта фотограмметрической съёмки. *Примечание:* Наиболее часто в качестве этих параметров используют продольный и поперечный углы наклона и разворота снимка.
- Снимка фотограмметрического ориентирования внешнего элементы линейные** — координаты центра оптического проектирования фотограмметрического снимка в системе координат объекта фотограмметрической съёмки.
- Снимка фотограмметрического ориентирования внутреннего элемент** — один из геометрических параметров фотограмметрического снимка, определяющих его положение относительно центра оптического проектирования фотограмметрического снимка. *Примечание:* К элементам внутреннего ориентирования относят фокусное расстояние съёмочной камеры и координаты главной точки фотограмметрического снимка в системе координат снимка.
- Снимка фотограмметрического система координат** — правая ортогональная пространственная система координат, фиксируемая на снимке изображениями координатных меток.
- Снимка фотограмметрического трансформирование** — преобразование аэро- или космических снимков, полученных в какой-либо проекции (например, центральной) в заданную картографическую проекцию местности (например, ортогональную).

- Снимков координат точек измерение стереоскопическое** — определение значений координат соответственных точек фотограмметрических снимков стереопары. *Примечание:* Под соответственными точками фотограмметрических снимков стереопары понимают изображения точки объекта съемки на этих снимках.
- Снимков перекрытие** — части двух соседних фотограмметрических снимков стереопары с изображением одного и того же участка объекта съемки. *Примечание:* При площадной съемке различают продольное перекрытие — перекрытие снимков одного маршрута и поперечное перекрытие — перекрытие снимков смежных маршрутов.
- Снимков фотограмметрических ориентирование взаимное** — ориентирование фотограмметрических снимков стереопары друг относительно друга.
- Снимков фотограмметрических ориентирования взаимного элемент** — один из геометрических параметров, определяющих положение одного фотограмметрического снимка стереопары относительно другого.
- Снимок (фотограмметрический) зональный** — фотоснимок, полученный в узком заданном интервале длин волн электромагнитного излучения.
- Снимок в видимом диапазоне** — фотоснимок, полученный в видимой области длин волн электромагнитного излучения $0,37 - 0,77$ мкм.
- Снимок инфракрасный** — снимок, полученный в интервале длин волн электромагнитного излучения $0,77 - 15$ мкм.
- Снимок кадровый** — фотограмметрический снимок, все элементы изображения которого формируются одновременно в течение заданной выдержки.
- Снимок панорамный** — сканерный снимок, элементы изображения которого формируются центральным проектированием на цилиндрической предметной поверхности.
- Снимок радиолокационный** — снимок, полученный в диапазоне радиоволн электромагнитного излучения. Основные элементы и параметры фотограмметрического снимка.
- Снимок сканерный** — фотограмметрический снимок, элементы изображения которого формируются в различные моменты времени, каждому из которых соответствуют отличные друг от друга значения элементов внешнего ориентирования. *Примечание:* Сканерные фотограмметрические снимки могут быть получены щелевыми, панорамными, оптико-механическими, оптико-электронными и радиолокационными съемочными системами.
- Снимок щелевой** — сканерное изображение местности, полученное в результате неодновременного экспонирования движущейся фотопленки через специальную щель, расположенную перпен-

дикулярно относительно направления движения летательного аппарата.

- Стереофотограмметрия** — раздел фотограмметрии, относящийся к одновременной обработке двух и более фотограмметрических снимков одного объекта фотограмметрической съемки, полученных при разных положениях центра оптического проектирования съемочной системы.
- Съемка стереотопографическая** — фототопографическая съемка, выполняемая по стереоскопической модели местности.
- Съемка топографическая** — комплекс работ, выполняемых с целью получения первичной топографической карты или плана, а также получение топографической информации в другой форме.
- Съемка фототопографическая** — 1) топографическая съемка, выполняемая по материалам топографической фотосъемки, с применением фотограмметрической обработки топографического фотоснимка; 2) фототопографическая съемка, выполняемая по материалам топографической аэрофотосъемки или космической фотосъемки.
- Съемка фототопографическая комбинированная** — фототопографическая съемка, при которой информацию о плановом положении объектов местности получают по топографическим фотоснимкам, а информацию о рельефе — путем наземных определений.
- Съемка фототопографическая наземная** — фототопографическая съемка, выполняемая по материалам наземной топографической фотосъемки.
- Съемки базис** — расстояние между центрами оптического проектирования снимков, образующих стереопару.
- Съемки объект** — местность, объект или явление, отображенные на снимке.
- Точка опорная** — контурная точка на фотоснимке, геодезические координаты которой известны и которая является исходной при фотограмметрических построениях.
- Формат снимка** — значения длин двух смежных сторон снимка, записанных как их произведение.
- Фотограмметрия** — научная дисциплина и область техники, предметом которой является определение формы, размеров и пространственного положения объектов по снимкам, полученным с помощью съемочных систем.
- Фотограмметрия аналитическая** — раздел фотограмметрии, относящийся к аналитическим методам обработки аналоговых фотограмметрических снимков.
- Фотограмметрия аналоговая** — раздел фотограмметрии, относящийся к обработке аналоговых фотограмметрических снимков, обрабатываемых на оптико-механических устройствах.

- Фотограмметрия космическая** — раздел фотограмметрии, относящийся к обработке снимков, полученных с космических носителей съёмочной системы.
- Фотограмметрия наземная** — раздел фотограмметрии, относящийся к обработке снимков, полученных с наземных пунктов или наземных носителей съёмочной системы.
- Фотограмметрия одиночного (фотограмметрического) снимка** — раздел фотограмметрии, относящийся к обработке одного снимка.
- Фотограмметрия прикладная** — раздел фотограмметрии, относящийся к получению геометрической информации об объектах фотограмметрической съёмки в инженерных или научных целях.
- Фотограмметрия топографическая** — раздел фотограмметрии, относящийся к созданию топографических карт и планов.
- Фотограмметрия цифровая** — раздел фотограмметрии, относящийся к аналитическим методам обработки снимков на цифровых фотограмметрических станциях с помощью специализированного программного обеспечения.
- Фотоплан или ортофотоплан** — фотографическое одномасштабное изображение местности, составленное из трансформированных (ортотрансформированных) топографических фотоснимков с зарачным оформлением.
- Фотоснимка топографического обработка фотограмметрическая** — совокупность технологических процессов, связанных с преобразованием метрической и фотометрической информации топографического фотоснимка в геометрическую информацию об объекте фототопографической съёмки.
- Фотоснимка топографического оптического проектирования центр** — узловая точка объектива съёмочной камеры, используемой для фототопографической съёмки.
- Фотоснимка топографического ортофототрансформирование** — процесс фотограмметрической обработки топографического фотоснимка, целью которого является преобразование топографического фотоснимка из исходной проекции в ортогональную.
- Фотоснимка топографического трансформирование** — процесс фотограмметрической обработки топографического фотоснимка, целью которого является преобразование изображения топографического фотоснимка в изображение в заданной проекции и масштабе.
- Фотоснимков топографических подготовка полевая, привязка** — технологический процесс опознавания изображений точек местности на топографических фотоснимках и определения координат опознанных точек на местности. *Примечание:* В зависимости от состава определяемых координат полевая подготовка топографических фотоснимков может быть плановой, высотной или планово-высотной.

- Фотоснимков топографических стереопара** — два перекрывающихся топографических фотоснимка одного объекта топографической фотосъемки, полученных при различных положениях их центров оптического проектирования.
- Фотоснимок (топографический) космический** — топографический фотоснимок, полученный при космической топографической фотосъемке.
- Фотоснимок (топографический) наземный** — топографический фотоснимок, полученный при наземной топографической фотосъемке.
- Фотоснимок топографический** — фотограмметрический снимок земной поверхности, полученный для создания планов и карт.
- Фотоснимок трансформированный** — топографический фотоснимок, полученный в результате трансформирования.
- Фотоснимок фотограмметрический** — изображение объекта фотограмметрической съемки, зафиксированное на материальном носителе в аналоговом или цифровом виде, используемое для целей фотограмметрической обработки.
- Фотосъемка (топографическая) конвергентная** — топографическая фотосъемка для получения стереопары снимков при значительном угле между оптическими осями съёмочных систем.
- Фотосъемка (топографическая) космическая** — топографическая фотосъемка с космического летательного аппарата.
- Фотосъемка (топографическая) наземная** — топографическая фотосъемка с наземного пункта или подвижного наземного носителя. *Примечание:* В качестве подвижного наземного носителя могут выступать любые средства передвижения, обеспечивающие достаточную стабилизацию съёмочной камеры во время фотосъемки.
- Фотосъемка топографическая** — процесс получения топографического фотоснимка.
- Фотосъемки (топографической) материалы** — фотоснимок или группа фотоснимков земной поверхности, поддающихся однозначной идентификации во времени и пространстве, с описанием технических характеристик применявшегося съёмочного оборудования и внешних условий топографической фотосъемки.
- Фототопография** — область техники, которая занимается созданием топографических карт и топографических планов с использованием материалов топографической аэро- или космической фотосъемки.
- Фототриангуляция** — метод фотограмметрического сгущения опорной геодезической сети путем построения, ориентирования и уравнивания фотограмметрической модели объекта по перекрывающимся фотограмметрическим снимкам, принадлежащим одному или нескольким маршрутам. *Примечания:* 1. Различают

маршрутную и блочную фототриангуляцию. 2. В результате фототриангуляции определяют значения координат точек объекта фотограмметрической съемки и значения элементов внешнего ориентирования фотограмметрического снимка в системе координат объекта.

Термины и определения составлены с использованием утвержденных стандартов в области аэрофотосъемки, фототопографии и фотограмметрии, разработанных ЦНИИГАиК.

А

- aberration** — аберрация
absolute orientation — внешнее ориентирование
absolute orientation parameters — элементы внешнего ориентирования
absolute stereoscopic parallax — продольный параллакс
absolute oriented model — ориентированная фотограмметрическая модель
accidental error — случайная погрешность (ошибка)
accuracy — точность, достоверность
achromatic lens — ахромат; ахроматический объектив
acquisition of aerial photos — аэрофотосъемка; аэрофотографирование
acquisition of image — получение изображения
acquisition — сбор (данных)
active liquid crystal shuttering eyewear — активные жидкокристаллические очки (для стереонаблюдений)
active system — активная система (съёмочная система)
acutance — резкость (характеристика изображения)
additive color mixing — аддитивное сложение (синтез) цвета
adjust-coordinate — наводить (измерительную марку, курсор) по высоте
adjust — уравнивать
aerial — воздушный
aerial film — аэрофильм
aerial image — аэроснимок
aerial mapping — создание карты по данным аэрофотосъемки
aerial mapping camera — топографический аэрофотоаппарат
aerial photo scale — масштаб аэрофотосъемки, масштаб аэроснимка
aerial photogrammetry — аэрофотограмметрия
aerial photograph — аэроснимок
aerial project — проект аэрофотосъемки
aerial triangulation — фототриангуляция
aerotriangulation by bundle block adjustment — блочная фототриангуляция методом независимых моделей
aerotriangulation with independent models — фототриангуляция методом независимых моделей
affine transformation — аффинное преобразование
airbase — базис фотографирования
airborne digital camera system — цифровая аэрофотосъёмочная система
airborne laser scanner — воздушный лазерный сканер
airborne lidar — лидар, установленный на аэронасители
align — ориентировать (систему координат)
ambiguity — неоднозначность
ambiguity resolution — разрешение неоднозначности
anaglyphic stereoscopic viewing method — анаглифический метод наблюдений
analog form — аналоговая форма
analytical aero triangulation — аналитическая фототриангуляция

analytical photogrammetry — фотограмметрия
angle of convergence — угол конвергенции
angular image motion — угловой сдвиг изображения
angular resolution — угловая разрешающая способность (объектива)
annotated photograph — дешифрованный снимок
area based matching — отождествление фрагментов изображения; метод отождествления точек снимков
area CCD — ПЗС-матрица
atmospheric haze — воздушная дымка (пылевая)
atmospheric refraction — атмосферная рефракция
attitude matrix — матрица направляющих косинусов
automatic 3D-city modeling — автоматическое создание трехмерной модели города
automatic DEM generation — автоматическое создание ЦММ (цифровой модели местности)
average radial measured distortion — среднее значение радиальной дисторсии
axis of homology — линия основания картинной плоскости

В

backscatter — отраженный сигнал
backscatter looking camera — камера для обратной съемки (назад)
backscatter transformation — обратное преобразование
barscale — линейный масштаб
base — базис фотографирования
base GPS receiver — ГНСС приемной базовой станции
basemap — картографическая основа
base-height ratio — отношение базиса к высоте фотографирования
Bayer pattern CCD — ПЗС с цветными фильтрами Байера
bending of the optical path — искривление оптического луча (в атмосфере); атмосферная рефракция
bias, bias error — систематическое смещение
block — блок (в блочной фототриангуляции)
block adjustment — уравнивание блока
block triangulation — блочная фототриангуляция
blunder — грубая ошибка
breakline — структурная, орографическая линия, линия излома
bridging span — участок фотограмметрической сети между рядами опорных точек (выражается числом базисов фотографирования)
brightness — яркость (значение кода яркости пикселя цифрового изображения)
building footprint — контур строения
bundle adjustment — уравнивание связок
bundle — связка (лучей)
bundle solution — уравнивание блочной сети фототриангуляции по методу связок

С

calibrate — калибровать
calibration — калибровка
calibrated focal length — калиброванное фокусное расстояние фотокамеры
calibration constants — параметры калибровки фотокамеры

- calibrator** — калибратор
camera axis — оптическая ось фотокамеры
camera body coordinate system — система координат, связанная с камерой
camera calibration — калибровка фотокамеры
camera calibration data — параметры калибровки фотокамеры
camera coordinate system — система координат фотокамеры
camera imperfections — геометрические искажения, вносимые фотокамерой (дисторсия и пр.)
camera mount — аэрофотоустановка
Cartesian coordinate system — Декартова система координат, прямоугольная система координат
case of longitudinal tilt — конвергентная съемка (наземная стереофотограмметрия)
CCD area — матрица ПЗС
CD line — линейка ПЗС
central projection camera — фотокамера с центральной проекцией
charge coupled device — прибор с зарядовой связью
check point — контрольная точка
circle of confusion — кружок нерезкости
circular error (CE) — погрешность планового положения
clear Y-parallax — устранять параллакс
clear Y-parallax — устранять поперечный параллакс
closerange photogrammetry — ближняя фотограмметрия
collimating mark — координатная метка
collinearity equations — уравнения коллинеарности
collinearity model — коллинеарная модель, условие коллинеарности
color-infrared film — инфрахроматическая фотопленка
combined block adjustment with GPS coordinates — уравнивание блочной фототриангуляции с использованием координат центров проекции
comparator — компаратор
coplanarity condition — условие компланарности
coplanarity — компланарность
computer aided — автоматизированный
configuration of control points — схема расположения опорных точек
consecutive photos — последовательные снимки
contour extraction — выделение контура (на изображении)
contour interval — высота сечения рельефа
contourline — горизонталь
control — опорные данные
control bridging — сгущение (фотограмметрической) съемочной сети
control distribution — расположение опознаков (опорных точек)
control point — опорная точка
control point pattern — схема расположения опорных точек
coordinate conversion — перевычисление координат
coordinate reference system — координатная система отсчета
coordinate system — плоская система координат снимка
coordinate transformation — трансформирование координат
correction — внесение поправок, поправка
correction equations — уравнения поправок
corrections for lens distortion — поправка за дисторсию объектива

correlation — корреляция
correlator — коррелятор
coverage — покрытие (снимками), охват
cross strip — каркасный маршрут, поперечный маршрут
cross section — поперечное сечение, профиль
cross-correlation matching — отождествление (точек) методом взаимной корреляции
curvature — кривизна

D

dangerous cylinder — цилиндр неоднозначного решения
date acquisition — сбор пространственных данных
date acquisition system — система сбора пространственных данных
date schema — структура данных
decentering distortion — ассиметричная дисторсия
default — значение по умолчанию
Delaunay triangulation — триангуляция Делоне
DEM generation — создание цифровой модели местности (ЦММ)
detection of line — обнаружение линейных деталей изображения
digital camera back — фотоприемник цифровой камеры
digital elevation model (DEM) — цифровая модель местности
digital form — цифровая форма
digital ground model — (*устар.*) цифровая модель рельефа
digital image — цифровое изображение (снимок)
digital image processing — цифровая обработка изображений
digital photogrammetric workstation — цифровая фотограмметрическая станция
digital photogrammetry — цифровая фотограмметрия
digital rectification — цифровое трансформирование (снимка)
digital surface model (DSM) — цифровая модель поверхности (ЦМП)
digital terrain elevation data (DTED) — цифровая модель рельефа (выпускаемая США)
digital terrain elevation (DTE) — цифровая модель рельефа (ЦМР)
digitization — дигитализация, преобразование в цифровую форму
digitize — цифровать
dilate — увеличивать масштаб
dilution of precision (DOP) — снижение точности
direct exterior orientation — прямое внешнее ориентирование
direct orientation system — система прямой геодезической привязки (снимков)
direct transformation — прямое трансформирование
direction cosine — направляющий косинус
direction cosine matrix (DCM) — матрица направляющих косинусов
discrete Fourier transform — дискретное преобразование Фурье
disparity error — ошибка отождествления
distinct feature — характерная деталь изображения
distinct line — характерная линейная деталь (изображения)
distinct point — характерная точка
domain — диапазон допустимых значений
drone — беспилотный летательный аппарат

DSM generation — создание цифровой модели поверхности (ЦМП)

DTE generation — создание цифровой модели рельефа (ЦМР)

Е

Earth curvature — кривизна Земли

Earth — земной эллипсоид

Earth remote sensing — дистанционное зондирование Земли

effect of Earth curvature — влияние кривизны Земли

ego motion — движение съёмочной системы (в пространстве)

electromagnetic spectrum — спектр электромагнитных волн

electro-stereoscopic viewing devices — электронное устройство стереонаблюдения

elevation — высота

elevation accuracy — точность съёмки рельефа (по высоте)

elevation post — значение высоты в узле сетки цифровой модели местности

elevation post spacing — шаг регулярной сетки модели местности

ellipsoid of reference — референц-эллипсоид; общий земной эллипсоид

emitted heat — излучение в инфракрасном (тепловом) спектральном интервале

endlap — продольное перекрытие (аэроснимков)

enhancement of image — улучшение изобразительных свойств снимка

EO sensor — оптико-электронный сенсор

epipolar axis — линия, проходящая через центры проекций пары снимков, эпполярная ось

epipolar geometric — геометрические условия получения эпполярных изображений

epipolar images — нормализованные эпполярные изображения

epipolar line — эпполярные линии (соответственные базисные линии)

epipolar plane — базисная плоскость

epipolar rays — соответственные проектирующие лучи

epipoles — соответственные точки пары снимков, эпполярные точки

erroneous points — точки, содержащие ошибки

error influence — влияние ошибки

error source — источник ошибок

error of measurement — погрешность измерений

exposure — экспозиция (количество освещения сенсора)

exposure interval — интервал экспозиций при фотосъёмке

exposure location data — данные о положении в пространстве точек фотографирования; координаты центров фотографирования

exposure station — точка фотографирования

exposure time — выдержка, время экспонирования

extension of control — ступение опорной сети

exterior orientation — внешнее ориентирование (снимка)

exterior orientation elements (parameters) — элементы внешнего ориентирования (снимка)

eye base — глазной базис

eyewear — очки

Ф

facsimile camera — камера сканирующего типа с круговой разверткой

feature — объект, деталь изображения

- feature based matching** — отождествление точек снимков
feature date — данные об объектах
feature recognition — распознавание объектов (местности)
feature snapping — примыкание (замыкание) контура объекта
fiducial — точка пересечения линий, соединяющих координатные метки
fiducial marks — координатные метки
fiducial system — плоская система координат снимка
field control surveys — полевая планово-высотная подготовка (привязка) снимков
field elevation — высота точки, полученная при полевых измерениях (высотная координата)
field of regard (FOG) — угол захвата при фотосъемке (с учетом изменения положения оптической оси съемочной камеры)
field of view (FOV) — угол поля зрения
film camera — аналоговая (сенсор-фотопленка) фотокамера
film distortion — деформация фотопленки
film flattening — выравнивание фотопленки
film magazine — кассета (аэрофотоаппарата)
film recorder — устройство вывода цифрового изображения на фотопленку
film scanner — сканер для фотопленки (фотограмметрический сканер)
film scanning — сканирование аэрофильма
flatbed scanner — сканер с плоской поверхностью
flattening — выравнивание фотопленки
flight altitude — высота полета над средней уровненной поверхностью
flight line spacing — расстояние между осями аэросъемочных маршрутов
flying height above ground — высота фотографирования (высота полета над поверхностью объекта съемки)
focal length — главное фокусное расстояние
focal-plane — фокальная плоскость
focal-plane frame — плоскость прикладной рамки
focal-plane shutter — щелевой затвор
focal-plane glass — выравнивающее стекло аэрофотокамеры
fore shortening — искажения, вызванные законом перспективы построения изображения
forward image motion — продольный сдвиг изображения
forward overlap — продольное перекрытие снимков
frame — кадр
frame aerial camera — кадровый аэрофотоаппарат
frame photograph, frame photo — кадровый фотоснимок
frame rate — временной интервал фотографирования
free network adjustment — уравнивание свободной фототриангуляционной сети

G

- gap** — разрыв; участок съемки с недопустимыми перекрытиями снимков
Gaussian distortion function — Гауссова функция дисторсии (для математического выражения радиальной дисторсии)
Gaussian distribution — нормальное распределение по Гауссу
Gauss-Krueger projection — проекция Гаусса – Крюгера
generation of DTM — создание ЦМР

- geometric calibration** — геометрическая (фотограмметрическая) калибровка
geometric resolution — пространственная разрешающая способность
geometric transformation — геометрическое преобразование (изображения)
georeferencing — геодезическая привязка
geostationary orbit — геостационарная орбита
GPS-aided inertial navigation system — инерциальная навигационная система с ГНСС-поддержкой
graphic rectification — графический способ трансформирования аэрофотоснимков
graphical stereo superposition — наложение графического изображения на стереомодель
ground control plan — проект планово-высотной подготовки снимков (проект привязки снимков)
ground distance — захват местности в продольном направлении
ground nadir point — точка надира на местности (в предметной плоскости)
ground pixel size — размер пикселя на местности
ground point — точка земной поверхности
ground resolution — разрешение на местности
ground verification point — наземная контрольная точка, точка полевого контроля
ground-to-image function — зависимость координат точки изображения от координат соответственной точки местности
gyro-stabilized mount — гиросtabilизированная аэрофотоустановка

Н

- N/V control point** — планово-высотная контрольная (опорная) точка
hard-copy photograph — аналоговый фотоснимок
hard-up digitizing — ручное цифрование (векторизация) на экране
height displacement — смещение точки на снимке, вызываемое влиянием рельефа местности
hidden ground — скрытые («мертвые») зоны местности (на снимке)
high-oblique photograph — перспективный снимок (с большим углом наклона)
high-resolution imagery — изображение высокого разрешения
Hi-res — высокое разрешение
homogenization — слияние, объединение в один массив
homography — проективная геометрия
homologue — соответственные (одноименные) точки
horizontal control — плановые опорные (контрольные) точки
horizontal controlpoint — плановая опорная точка (опознак)
horizontal postspacing — шаг регулярной сетки (для регулярной ЦМР)
hyperfocal distance — гиперфокальное расстояние
hyperspectral camera — гиперспектральная камера (съёмочная система)
hyperspectral imagery — гиперспектральная съёмка

I

- ill-conditioned** — плохо обусловленная система
image — изображение, снимок
image acquisition — получение снимка, фотографирование
image base — длина базиса фотографирования в масштабе снимка
image coordinate frame — система координат снимка

- image coordinate system** — система координат снимка
image coordinates — координаты точки на изображении
image correction — коррекция изображения
image correlation — отождествление точки на изображении
image format — формат снимка
image function — представление изображения функцией $D = f(x, y)$
image georeferencing — геодезическая (координатная) привязка изображения
image matching — отождествление соответственных точек перекрывающихся снимков
image measurement — измерение изображения (координат точек одиночного снимка)
image measurement in stereo — стереоскопическое измерение снимков (координат точек)
image mosaicking — монтаж изображений (фотоплана, фотосхемы)
image nadir point — точка надира на снимке
image plane — плоскость снимка
image point — точка снимка
image processing — обработка изображений
image pyramid — пирамида изображений
image rectification — трансформирование снимка (изображения)
image resampling — формирование нового изображения, передискретизация
image resolution — разрешающая способность изображения
image sampling — дискретизация изображения, формирование растрового цифрового изображения
image segmentation — сегментация изображения
image smear — смаз изображения
image transform — преобразование изображения
image triplet — триплет снимков
imaging chip — светочувствительная матрица ПЗС
imaging configuration — виды стереофотосъемки (нормальный, конвергентный)
imaging radar — радарное изображение (радиолокационная съемка)
imprecise — неточный
independent model — независимая модель
indirect orientation — внешнее ориентирование модели
indirect transformation — обратное трансформирование
inertial navigation system (INS) — инерциальная навигационная система (ИНС)
in-flight geometric calibration — фотограмметрическая калибровка аэрофотоаппарата по полигону (по аэроснимкам с опорными точками)
infrared image — снимок, полученный в инфракрасном спектре излучения
in-house processing — камеральная обработка
inner orientation — внутреннее ориентирование (снимка)
integrated sensor orientation — интегрированное внешнее ориентирование (с применением фототриангуляции и летных приборов ориентации)
intensity based matching — отождествление, основанное на сравнении пикселей
interest operator — оператор выделения деталей изображения
interior orientation — внутреннее ориентирование
interior orientation parameters — элементы внутреннего ориентирования

- intersection** — засечка
intersection station — точка, определяемая в результате засечки
intrinsic parameters of camera — элементы внутреннего ориентирования камеры
inverted image — перевернутое (инверторное) изображение
isocenter — точка нулевых искажений
isometric parallel — линия на снимке, на которой масштаб равен главному масштабу ($1: m = f/H$)

J

- jitter** — разброс значений

K

- keypoint** — связующая точка (в фототриангуляции)
kill process — прекратить процесс
kriging — кригинг (метод интерполирования, например, для получения пространственной информации по точкам)

L

- land surveying** — съемка земной поверхности (при межевании и кадастровых работах)
large-format digital camera — полноформатная цифровая аэрофотокамера
large-scale — крупный масштаб (крупномасштабный снимок)
lateral overlap — поперечное перекрытие
lattice — регулярная сетка (при моделировании рельефа местности)
law of error propagation — закон распределения ошибок
least square salutation — уравнивание по методу наименьших квадратов
least square based matching — отождествление деталей (точек) по методу наименьших квадратов
least squares adjustment — уравнивание по методу наименьших квадратов
lens distortion — дисторсия объектива
leveling — горизонтирование (модели)
linking of successive models — последовательное присоединение моделей (в фототриангуляции)
locating back — выравнивающая прижимная плита (в аэрофотоаппарате)
logfile — файл-протокол (процесс обработки)
long-focal-length lens — длиннофокусный объектив
longitudinal tilt — продольный наклон (продольный угол наклона)

M

- magazine** — кассета (аэрофотоаппарата)
manuscript — трансформационная основа (планшет с нанесенными трансформационными точками)
map coverage — картографическая изученность
map revision — обновление карты
map sheet — лист карты
masspoint — массив точек (для отображения и создания модели рельефа)
matching interest points — отождествление интересующих точек

- matching method** — метод отождествления (точек на снимках)
matrix of normal equations — матрица нормальных уравнений
mean error — средняя погрешность
measure dentities — измеряемые величины (в уравнении)
measurement — измерение
measurement error — ошибка измерения
merge — объединять, сшивать
metric aerial camera — метрическая (топографическая) аэрофотокамера
mis-registration — неверное определение положения (например, пикселя)
mission — полет (аэросъемочный)
mission plan — проект аэрофотосъемки
model — модель (фотограмметрическая)
model coordination — координаты точки модели
model formation — построение стереомодели
model scale — масштаб модели
model-space coordinates — координаты в пространстве модели (в системе координат модели)
monocursor tracking — наведение курсора в монорежиме
mosaic — результат монтажа (объединения трансформированных снимков)
mosaic king — монтаж, объединение (сшивка) снимков
motion blur — смаз изображения, вызванный движением летательного аппарата
mount — аэрофотоустановка
multi-camera-head digital camera system — многообъективная цифровая съемочная система
multi-frame analytical (camera) calibration — аналитическая калибровка камеры по снимкам
multi-image matching — отождествление точек на перекрывающихся снимках
multi-photospace intersection — прямая засечка по нескольким перекрывающимся снимкам
multispectral image — зональный снимок
multitemporal image — разновременное (динамическое) изображение
multitude — множество точек

N

- nadir** — надир, надирный
nadir distance — отклонение главного луча от надира
nadir image — горизонтальный снимок
nadir point — точка надира
navigation sensor — средства получения данных о положении и ориентации сенсора
near infrared (NIR) — ближняя инфракрасная зона спектра
near-vertical aerial photograph — плановый аэрофотоснимок
neat area of stereomodel — рабочая область в зоне перекрытия стереопары
net — сеть (триангуляции)
network — сеть (геодезическая, опорных точек)
n-foldtie point area — область связующих точек на n снимках
non-flatness of image — погрешность выравнивания аэрофотоплёнки (в плоскости прикладной рамки)

nonlinear image error — нелинейные искажения изображения
non-metric camera — неметрическая (нефотограмметрическая) фотокамера
normal case — нормальный вид съемки
normal case of the image pair — идеальная стереопара
normal distribution — нормальное распределение
normal equations — нормальное распределение (случайных величин)
normalized digital stereopair — пара нормализованных цифровых снимков;
 пара цифровых эпиполярных снимков
normalized digital surface model — нормализованная цифровая модель поверхности (высоты точек определяют относительно земной поверхности)
notch — координатная метка
numerical rectification — аналитическое (числовое) трансформирование снимка
numerical stereophotogrammetry — числовая (цифровая) стереофотограмметрия

О

object — объект (съемки)
object coordinate system — система координат объекта
object identification — распознавание объекта
object pixel resolution — размер пикселя на объекте
oblique — перспективный (снимок)
observation equation — уравнение поправок
occlusion — «мертвая» зона
on-the-fly rectification — трансформирование «на лету»
opening angle — угол поля зрения (аэрофотокамеры)
open-loop analytical photogrammetric system — аналитическая фотограмметрическая система
operating altitude — высота аэросъемочного полета
optical axis — главная оптическая ось
optical constraint — оптические условия фототрансформирования
orientation date — данные внешнего ориентирования (снимка)
orientation matrix — матрица ориентации, матрица направляющих косинусов
ortho-image — ортофотоснимок
ortho-image DPW — цифровая фотограмметрическая станция (ЦФС) ортофототрансформирования
orthophoto — ортофототрансформированный снимок
orthophoto mosaic — ортофотоплан
orthophoto production — создание (производство) ортофотопланов
orthorectification — ортофототрансформирование
overlap — перекрытие (снимков, полос сканирования)
overlapping photograph — перекрывающиеся снимки
overview — озорное изображение

Р

panel — маркировочный знак (для маркирования на местности)
panelpoint — маркированный опознак на снимке
parallax — параллакс
parallax angle — угловой параллакс
parallax difference — разность продольных параллаксов

- parallax free stereo model** — стереомодель, свободная от параллаксов
- passpoint** — связующая точка
- passive polarized spectacles** — пассивные поляризационные очки
- passive sensor** — пассивная съемочная система
- pattern block** — расположение снимков в блоке
- perfect lens** — идеальный объектив
- perspective center** — центр проекции, центр перспективы
- perspective image** — снимок в центральной проекции
- perspective projection** — центральная проекция
- perspective transformation** — перспективное преобразование
- photobase** — базис фотографирования
- photocenter coordinates** — координаты центра фотографирования
- photo coordinates** — координаты точки на снимке
- photo** — снимок
- photo control index map** — схема плано-высотного съемочного обоснования
- photogrammetric scanner** — фотограмметрический сканер
- photogrammetric application** — прикладная фотограмметрическая задача
- photogrammetric camera** — фотограмметрическая камера
- photogrammetric control extension** — сгущение (фотограмметрическое) съемочной сети
- photogrammetric elevation** — фотограмметрическая высота
- photogrammetric mapping** — создание карты фотограмметрическим методом
- photogrammetric network** — фотограмметрическая сеть
- photogrammetric processing** — фотограмметрическая обработка
- photogrammetric production** — фотограмметрическое производство
- photogrammetric restitution** — построение фотограмметрической модели
- photogrammetry** — фотограмметрия
- photograph scale** — масштаб снимка (масштаб фотографирования)
- photograph** — снимок
- photographic mission** — съемочный полет
- photographic survey** — фотосъемка
- photo identification** — распознавание на снимке точек
- photo index** — репродукция накидного монтажа
- photomapping** — фототопографическая съемка
- photomosaic** — фотомозаика
- phototopography** — фототопография
- phototriangulation** — фототриангуляция
- pixel** — пиксель, элемент картины (снимка, изображения)
- pixel chip** — ряд пикселей (в линейке ПЗС)
- pixel coordinate frame** — система координат пиксельного изображения (снимка)
- pixel count** — количество пикселей
- pixel size** — размер пикселя
- pixel size on the ground** — размер пикселя на местности
- pixel wise** — попиксельно
- plane coordinates** — плановые координаты
- plane image coordinates** — плоские координаты точки в системе координат снимка
- plate coordinates** — плоские координаты
- plumb point** — точка надира на снимке

point transfer — перенос точки
pointing — наведение (на точку)
pointing error — ошибка наведения
polarization stereoscopic viewing technique — поляризационный метод стереонаблюдений
polynomial rectification — полиномиальное трансформирование
positional accuracy — точность определения положения (точки), позиционная точность
precision — точность
prediction — проецирование
pre-flight — предполетный
premark — предварительное маркирование (точек)
preprocessing — первичная обработка
principal axis — главная оптическая ось
principal point — главная точка (снимка)
principal point offset — координаты главной точки
project planning — подготовка проекта
projection center of photo — центр проекции снимка
projection matrix — матрица проективных преобразований
projective transformation — проективное преобразование
pseudoscopic image — обратный стереоэффект
prugpoint — маркированная точка (на снимке)
prugging — маркирование (точек на снимке)
pull-in range — радиус области сходимости решения
pushbroom scanning — продольное сканирование

Q

quadratic mean (RMS) — среднее квадратическое значение
quantization — квантование (изображения, сигнала)
quantization step — шаг квантования
quick look processing — упрощенная оперативная обработка

R

radar — радар, радиолокационная съемочная система
radar image — радиолокационный снимок
radial distortion — радиальная дисторсия
radial distortion polynomial — полином радиальной дисторсии
radiometric accuracy — фотометрическая точность
radiometric calibration — фотометрическая калибровка
radiometric resolution — радиометрическая разрешающая способность
raster — растр, растровый
raster data file — файл растровых данных
raster format — растровый формат
raster model — растровая модель
raw image — исходный необработанный снимок (изображение)
real-time photogrammetry — фотограмметрия в реальном времени
reconstruct geometry of a bundle — восстановить связку
rectification — трансформирование
rectified photograph (image) — трансформированный снимок
reference — опорный, исходный

- reference ellipsoid** — референц-эллипсоид
reference grid — опорная регулярная сетка
reference image — эталонное изображение
referencing — привязка
refined image — исправленное (геометрически) изображение
refinement — уточнение отождествления точек
re-flight — повторный аэросъемочный полет
refraction — рефракция
registering — привязка
relative orientation — взаимное ориентирование
relative accuracy — относительная точность
relative positional accuracy — относительная точность определения
relief — рельеф
relief displacement — смещение точки за рельеф (на снимке)
relief model — модель рельефа
remote sensing — дистанционное зондирование
rendering — графическое отображение
resection — обратная засечка (фотограмметрическая)
resection in space — обратная фотограмметрическая засечка
residual — остаточное расхождение
resolution — разрешающая способность
resolving power — разрешающая способность
restitution of photogrammetric image pairs — построение стереомодели по стереопаре
rotation — угловые элементы внешнего ориентирования, вращения
rubbersheet scaling (of image) — «растягивание» (изображения)

S

- sampling** — дискретизация (сигнала, изображения)
sampling distance — шаг дискретизации
satellite image — космический снимок
satellite image acquisition — космическая фотосъемка
satellite photogrammetry — космическая фотограмметрия
scalar product — скалярное произведение
scale — масштаб
scale factor — масштабный коэффициент
scaling — масштабирование
scan — полоса сканирования, скан
scanner image — сканерный снимок
scanning pattern — характер сканирования
scene — сцена, изображение (кадр)
seam line — линия соединения (пореза) при монтаже фотосхемы, фото-плана
search image — сопоставляемое изображение
search space — область поиска
segmentation — сегментация
sensing element — чувствительный элемент
sensor — сенсор
sensor coordinate system — система координат сенсора
sensor format — размер сенсора (светочувствительной матрицы ПЗС)

- sequential estimation** — последовательное приближение (метод)
shutter — затвор (в АФА)
shutter speed — выдержка (время открытия фотозатвора)
Siemens star test chart — радиальная мира
signalized point — маркированная точка (опознак)
similarity measure — мера тождественности
singleframe analytical calibration (camera) — аналитическая калибровка камер по одиночному снимку
single image (photo) — одиночный снимок
single photo analysis — анализ (геометрический) одиночного снимка
single photo procedure — обработка (фотограмметрическая) одиночного снимка
single photo resection — обратная фотограмметрическая засечка
single image photogrammetry — фотограмметрия одиночного снимка
skeletal field control — разреженная полевая планово-высотная подготовка снимков (привязка)
slope — уклон, скат
smallscale (map, mapping, photography) — мелкомасштабное (карта, картографирование, фотографирование)
smear — смаз
smoothing of an image — сглаживание изображения
softcopy form — цифровая форма
softcopy photogrammetry — цифровая фотограмметрия
softcopy stereoplottting system — цифровая стереофотограмметрическая станция
softcopy workstation — цифровая рабочая станция
solving the normal equations — решение нормальных уравнений
space intersection — прямая засечка
space photogrammetry — космическая фотограмметрия
spatialdate — пространственные данные
spatialdate infrastructure — инфраструктура пространственных данных
spatial image coordinates — пространственные координаты точек снимка
spatial model — пространственная модель
spatial resolution — пространственная разрешающая способность
stage coordinate system — система координат объекта
standard error — средняя квадратическая погрешность
stellar calibration — калибровка по звездам
stereo cursor tracking — ведение курсора в стереорежиме
stereodate collection — стереоскопическая съемка
stereodigital date collection — стереоскопическая цифровая съемка
stereo display — стереодисплей
stereo DPW — стереофотограмметрическая цифровая станция (ЦФС)
stereoscopic overlap — перекрытие снимков стереопары
stereopair — стереопара
stereoscopic photograph — снимок стереопары
stereoscene — стереоизображение
stereoviewing device — средство (устройство) для стереонаблюдения
stereo matching — измерение в стереорежиме
stereomodel — стереомодель
stereophotogrammetric — стереофотограмметрический

stereophotogrammetry — стереофотограмметрия
stereoplotting — стереоскопическая съемка
strip — аэросъемочный маршрут
strip adjustment — уравнивание маршрутной фототриангуляции
stripwidth — ширина маршрута
sub-pixel measurement accuracy — субпиксельная точность измерений
subsampling — изменение размера пикселя при сканировании
survey mission — аэросъемочный полет
surveying — геодезия
surveyor — геодезист
swath — полоса захвата (при аэросъемке)
swathwidth — ширина полосы захвата (при аэросъемке)
swing angle — угол разворота снимка
symmetric distortion — радиальная дисторсия
symmetric matrix — симметричная матрица
synthetic aperture radar (SAR) — радиолокационная система с синтезированной апертурой
systematic error — систематическая погрешность

Т

tangential distortion — тангенциальная дисторсия
tangential distortion polynomial — полином для описания тангенциальной дисторсии
target — маркировочный знак (для опознака)
target image patch — сопоставляемый фрагмент изображения
targeting — маркирование (опознака)
temporal image separation — метод чередования изображений для стереонаблюдения
temporal image sequence — последовательность снимков во времени (разновременные снимки)
terrain — земная поверхность, рельеф
terrain coverage — покрытие местности (снимками)
terrain — высота точки над земной поверхностью
terrain point — точка земной поверхности
terrestrial — наземный
terrestrial slope — уклон местности
terrestrial image acquisition — наземная фотосъемка
terrestrial mapping camera — камера для наземной фототопографической съемки
terrestrial stereophotogrammetry — наземная стереофотограмметрия
testchart — мира
test field — тестовый объект (полигон)
testsite — тест-объект
theory of error — теория ошибок
three-dimensional — трехмерный (3D), объемный
three dimensional cursor — трехмерный курсор
three-dimensional model — трехмерная модель
three-dimensional scene — трехмерное пространство

- three-line camera** — трехлинейчатая съемочная система (сканер с тремя сенсорами)
three-line image — сканерный снимок, полученный трехлинейчатым сканером
tiepoint — связующая точка
tiling of orthophotoimage — деление ортофотоизображения на номенклатурные листы («нарезка»)
tilt angle — угол наклона снимка (картинной плоскости)
time depended sensor model — динамическая модель сенсора
timestamp — временная метка
time-laps scenes — снимки периодической съемки
tolerable — допустимый
tolerance — допуск
track — траектория движения
tracking — слежение, отслеживание
transformation — преобразование (трансформирование) снимка
translation parameters — линейные элементы внешнего ориентирования
transversal tilt — поперечный наклон
triangular irregular network (TIN) — нерегулярная сеть треугольников
triangulation — триангуляция
triangulation point — точки сети фототриангуляции
tri-bar-test chart — штриховая мира
triplet — триплет
true error — истинная погрешность

U

- uncertainty** — недостоверный, неточный
uncontrolled model span — необеспеченное опорными точками звено фотogramметрической сети
uncontrolled — фотосхема
unit weight — единица веса
unmanned aerial system (UAS) — беспилотная авиационная система
unmanned aerial vehicle — беспилотный летательный аппарат (БПЛА)
up-to-date map — актуальная карта (обновленная)
UTC time — всемирное координатное время

V

- validdata** — актуальные данные
validation — уточнение, контроль
vanishing point — точка схода
vantage point — точка расположения фотокамеры
variance — дисперсия
vector format — векторный формат
vector model — векторная модель
vector product — векторное произведение
vertical accuracy — точность по высоте
vertical aerial photo — плановый аэроснимок
vertical control — высотные опознаки
vertical database — база данных высотных точек
vertical datum — высотные данные

vertical dilution of precision (VDOP) — снижение точности определения положения по высоте (ГНСС)
vertical distance — превышение
vertical image — плановый снимок
vertical line locus — главная вертикаль (на аэрофотоснимке)
vertical photograph — плановый аэрофотоснимок
vertical photography — плановая аэрофотосъемка
viewing direction — направление съемки
visual acuity — острота зрения
visual image interpretation — визуальное дешифрирование изображения
volumetric image — объемное изображение
voxel — воксел (пиксель объемного цифрового изображения)

W

warped — деформация модели (фотограмметрической)
weight matrix — матрица весов
weight of observation — вес измеряемой величины
weight mean — среднее взвешенное
well-defined feature — четкий контур
whiskbroom scanner — оптико-механический сканер
whiskbroom scanning — поперечное сканирование (относительно направления полета)
wide-angle — широкоугольный (объектив)
width of flight coverage — ширина полосы захвата
width-height ratio — отношение между осями смежных маршрутов к высоте фотографирования
with held the point — отключить точку
workflow — технология
workseat — рабочее место
workstation — рабочая станция
World Geodetic System 1984 (WGS 84) — Мировая Геодезическая Система 1984 г.

X

x-parallax — продольный параллакс

Y

yaw — рыскание (угол разворота летательного аппарата)
y-parallax — поперечный параллакс

Z

zero matrix — нулевая матрица
zero-dimensional — точечный объект
Z-information — высотная информация, высотные данные (объектов)
zoom in — увеличение (масштаба изображения)
zoom lens — объектив с переменным фокусным расстоянием
zoom out — уменьшение (масштаба изображения)

Примечание. Англо-русский словарь и пояснения к терминам представлены в профессиональном изложении применительно к фотограмметрии. Разработаны к. т. н. С.А. Кадничанским.

ЛИТЕРАТУРА

Основная литература

1. Лобанов А.И. Фотограмметрия. М.: Недра, 1987.
2. Назаров А.С. Фотограмметрия. Минск: ТетраСистемс, 2006.
3. Обиралов А.И., Лимонов А.Н., Гаврилова Л.А. Фотограмметрия и дистанционное зондирование. М.: Колосс, 2006.

Дополнительная литература

1. Инструкция по топографическим съемкам в масштабах 1:10 000 и 1:25 000 (полевые работы). М.: Недра, 1978.
2. Инструкция по межеванию земель. Комитет Российской Федерации по земельным ресурсам и землеустройству. М.: Недра, 1996.
3. Руководство по дешифрированию аэроснимков при кадастровых работах в сельских населенных пунктах. М.: РосНИЦ, 1995.
4. Руководство по кадастровым съемкам сельских населенных пунктов фотограмметрическими методами. М.: РосНИЦ, 1994.
5. Инструкция для создания цифровых планов и карт фотограмметрическим методом. М.: ЦНИИГАиК, 2002.
6. Абрамейко С.В., Лагуновский Д.М. Обработка изображений: технология, методы, применения: Учебное пособие. М.: Амалфея, 2000.
7. Буров М.И., Краснопевцев Б.В., Михайлов Л.П. Практикум по фотограмметрии. М.: Недра, 1987.
8. Куенко Ю.П. Основы космического природоведения. М.: Картогеоцентр — Геодезиздат, 1999.
9. Кадничанский С.А. Англо-русский словарь терминов по фотограмметрии и топографии. М.: ООО «Гром», 2014.
10. Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И., Тутубалина О.В. Аэрокосмические методы в географических исследованиях. М.: Издательский центр «Академия», 2004.
11. Кучко А.С. Фотография и специальные фотографические исследования. М.: Недра, 1987.
12. Лобанов А.Я., Журкин И.Г. Автоматизация фотограмметрических процессов. М.: Недра, 1980.
13. Малявский Б.А., Жарновский А.А. Аналитическая обработка фотографической информации в инженерных целях. М.: Недра, 1990.
14. Родионов Б.И. Динамическая фотограмметрия. М.: Недра, 1993.
15. Основные положения по аэрофотосъемке, выполняемой для создания и обновления топографических карт и планов. М.: Недра, 1978.
16. Практикум по фотограмметрии и дешифрированию снимков / А. И. Обиралов, Я.И. Гебгарт, Н.Д. Ильинский и др. М.: Недра, 1990.
17. Условные знаки для топографических планов в масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 и 1:500. М.: Недра, 1989.
18. Алгоритм векторизации растровых изображений в общем виде / С.Ю. Сташевский. Автоматизированные системы обработки информации, управления и проектирования: Доклады ТУСУРа, 2004.

Лимонов Анатолий Николаевич



Кандидат технических наук, доцент, почетный работник высшего профессионального образования.

В 1973 г. окончил Московский институт инженеров землеустройства (ГУЗ). С 1994 г. А.Н. Лимонов работает заведующим кафедрой аэрофотогеодезии Государственного университета по землеустройству.

Специальность: инженер-геодезист.

Область научной деятельности: оптика ландшафта, аэро- и космическая съемка, фотограмметрия, дешифрирование, дистанционные методы мониторинга земель.

Им опубликовано более 90 научных и учебно-методических работ.

Основные публикации: соавтор четырех учебников: «Фотограмметрия» для средних специальных учебных заведений; «Фотограмметрия и дистанционное зондирование», «Научные основы фотограмметрии и дистанционного зондирования», «Научные основы фотограмметрии» для высших учебных заведений, автор трех монографий: «Дистанционные методы государственного мониторинга земель», М.: ГУЗ, 2005, «Совершенствование технологических процессов создания цифровых моделей местности по материалам аэрофотосъемки» (в соавторстве), М.: ГУЗ, 2006, «Методология мониторинга земель дистанционными методами», LAP LAMBERT Academic Publishing, Germany, 2012.

Гаврилова Лариса Анатольевна



Кандидат технических наук, доцент.

В 1983 г. Лариса Анатольевна с отличием окончила Московский институт инженеров землеустройства (ГУЗ). В настоящее время доцент кафедры аэрофотогеодезии и декан факультета «Городской кадастр».

Специальность — инженер-землеустроитель (специализация — изучение земельных ресурсов аэро- и космическими методами).

Область научной деятельности: теоретическая и прикладная фотограмметрия.

С 1983 г. работает в Государственном университете по землеустройству.

Автор более 50 опубликованных научных и научно- методических работ.

Основные публикации: в соавторстве написаны два учебника «Фотограмметрия» для средних специальных учебных и «Фотограмметрия и дистанционное зондирование» для высших учебных заведений, «Научные основы фотограмметрии и дистанционного зондирования», «Научные основы фотограмметрии» для высших учебных заведений, монография «Совершенствование технологических процессов создания цифровых моделей местности по материалам аэрофотосъемки».

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ	11
ГЛАВА 1. АЭРО- И КОСМИЧЕСКИЕ СЪЕМОЧНЫЕ СИСТЕМЫ	13
1.1. Классификация съемочных систем	13
1.2. Способы построения изображения	14
1.3. Основные критерии съемочных систем	16
Контрольные вопросы	18
ГЛАВА 2. ФОТОГРАФИЧЕСКИЕ СЪЕМОЧНЫЕ СИСТЕМЫ	19
2.1. Общие сведения	19
2.2. Кадровые топографические аэрофотоаппараты	20
2.3. Деформация изображения в кадровых аэрофотоаппаратах.	31
Влияние рефракции световых лучей в атмосфере.	33
2.4. Нетопографические аэрофотоаппараты	39
2.5. Кадровые оптико-электронные аэрофотокамеры	45
Контрольные вопросы	51
Тесты	51
ГЛАВА 3. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ПО ЛИНЕЙНОЙ ПЕРСПЕКТИВЕ	53
3.1. Центральная проекция	53
3.2. Основные элементы центральной проекции	53
Контрольные задания по теме «Линейная перспектива»	55
Задание 1. Построение перспективы точки, расположенной в предметной плоскости	57
Задание 2. Построение перспектив отрезков, расположенных в предметной плоскости	58
Задание 3. Построение перспективы вертикального отрезка ...	60
Задание 4. Построение перспективы сетки квадратов на эпюре растяжения	61
Контрольные вопросы	63
ГЛАВА 4. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СНИМКА, ПОЛУЧЕННОГО ТОПОГРАФИЧЕСКИМ АЭРОФОТОАППАРАТОМ	84
4.1. Масштаб горизонтального снимка равнинной местности	64
4.2. Смещение точек наклонного снимка	65
4.3. Масштаб наклонного снимка	67
4.4. Искажение направлений на наклонном снимке	71
4.5. Искажение площадей на наклонном снимке	73
4.6. Смещение точек горизонтального снимка, вызванное рельефом местности	75
4.7. Искажение направлений на аэрофотоснимке вследствие влияния рельефа местности	77
4.8. Изменение масштаба аэрофотоснимка вследствие влияния рельефа местности	79
4.9. Искажение длин отрезков на горизонтальном снимке вследствие влияния рельефа местности	82
4.10. Искажение площадей на горизонтальном снимке за влияние рельефа местности	84

4.11. Фотосхемы	86
Контрольные вопросы.....	89
ГЛАВА 5. ТЕОРИЯ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ОДИНОЧНОГО ТОПОГРАФИЧЕСКОГО СНИМКА	91
5.1. Системы координат, применяемые в фотограмметрии	91
5.2. Элементы ориентирования одиночного топографического снимка.....	93
5.3. Аналитическое трансформирование топографических снимков.....	94
5.4. Определение элементов внешнего ориентирования топографического аэроснимка	97
5.5. Раздельное определение элементов внешнего ориентирования снимка при фотограмметрической обработке его частей.....	98
5.6. Математический метод решения фотограмметрических задач	100
5.7. Цифровые модели рельефа	103
5.8. Построение нерегулярной цифровой модели рельефа.....	105
5.9. Определение оптимального расстояния между высотными пикетами ЦМР	108
5.10. Определение высотной координаты точки местности по ее изображению на снимке и ЦМР	111
5.11. Расчет параметров аэрофотосъемки при фотограмметрической обработке одиночного снимка.....	113
5.12. Технология создания векторного плана методом цифровой фотограмметрической обработки одиночного снимка (фрагмента снимка)	115
Контрольные вопросы.....	125
Тесты.....	126
ГЛАВА 6. ТЕОРИЯ СТЕРЕОФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ТОПОГРАФИЧЕСКИХ СНИМКОВ	129
6.1. Возможности зрительного аппарата человека.....	129
6.2. Стереозффект и условия его получения.....	131
6.3. Элементы внешнего ориентирования пары аэрофотоснимков	135
6.4. Элементы взаимного ориентирования пары аэрофотоснимков.....	136
6.5. Взаимное ориентирование пары аэрофотоснимков	137
6.6. Определение пространственных фотограмметрических координат точек модели местности	139
6.7. Внешнее ориентирование фотограмметрической модели местности	141
6.8. Прямая фотограмметрическая засечка по паре снимков.....	142
6.9. Планово-высотная привязка аэрофотоснимков.....	143
6.10. Пространственная аналитическая фототриангуляция	146
6.11. Общая схема технологии фототриангуляции	148
6.12. Способ независимых моделей	149
6.13. Способ частично зависимых моделей	152
6.14. Способ связей.....	153
6.15. Способ последовательного присоединения связей	153
6.16. Блочная фототриангуляция	156
6.17. Ортофототрансформирование снимков.....	158
6.18. Геометрическое объединение цифровых ортотрансформированных изображений местности	162
6.19. Контроль построения ортофотоизображения.....	165
6.20. Расчет параметров аэрофотосъемки при стереофотограмметрической обработке снимков	166
6.21. Технология цифровой стереофотограмметрической обработки аэрофотоснимков	168

6.22. Аппаратные средства и программное обеспечение цифровой обработки снимков	170
6.23. Критерии систем цифровой обработки аэро- и космических снимков	172
6.24. Алгоритм испытаний систем цифровой фотограмметрической обработки снимков	174
6.25. Устройства ввода-вывода изображений	178
6.26. Технологическая схема создания цифровых моделей местности....	182
Контрольные вопросы.....	185
Тесты.....	185
ГЛАВА 7. ОСНОВЫ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СКАНЕРНЫХ СНИМКОВ	187
7.1. Математически строгий метод.....	189
7.2. Параметрический метод.....	190
7.3. Аппроксимационный метод.....	191
7.4. Полиномиальные методы.....	192
ГЛАВА 8. НАЗЕМНАЯ СТЕРЕОФОТОГРАММЕТРИЧЕСКАЯ СЪЕМКА	193
8.1. Основные случаи наземной стереофотосъемки	194
8.2. Математическая основа фотограмметрической обработки наземных снимков	196
8.3. Расчет параметров наземной стереофотограмметрической съемки	197
8.4. Фотограмметрический метод в архитектуре и строительстве	200
8.5. Расчет параметров наземной стереофотосъемки для получения трехмерной модели здания или сооружения	202
8.6. Расчет параметров при съемке фасада здания несколькими маршрутами.....	205
8.7. Точность наземной стереофотограмметрической съемки.....	208
8.8. Калибровка неметрических цифровых фотокамер.....	209
8.9. Подготовительные работы при наземной стереофотограмметрической съемке.....	215
8.10. Полевые работы при наземной стереофотограмметрической съемке.....	217
8.11. Использование метода наземной фотограмметрии при решении топографических задач.....	220
Контрольные вопросы.....	222
ГЛОССАРИЙ	223
Термины и определения	224
Краткий англо-русский словарь терминов, адаптированный к фотограмметрии	232
ЛИТЕРАТУРА.....	250
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	251