

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»**

**Кафедра «Изыскания и проектирование дорог»**

**Г. М. Куновская, И. П. Дралова**

# **ГЕОДЕЗИЯ И ФОТОГРАММЕТРИЯ**

**Учебно-методическое пособие  
для студентов специальности «Организация дорожного движения»**

**Гомель 2011**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра «Изыскания и проектирование дорог»

Г. М. Куновская, И. П. Дралова И.П.

# ГЕОДЕЗИЯ И ФОТОГРАММЕТРИЯ

Учебно-методическое пособие для студентов  
специальности «Организация дорожного движения»

*Одобрено методической комиссией факультета УПП*

Гомель 2011

УДК 528+528.7(075.8)  
ББК 26.12  
К91

Рецензенты – канд. техн. наук, доцент *Е. К. Атрошко* (УО «БелГУТ»),  
главный инженер *Н. М. Юрченко* (Гомельгеодезцентра)

**Куновская, Г.М.**

К91 Геодезия и фотограмметрия : учеб.-метод. пособие для студ. спец. «Организация дорожного движения» / Г. М. Куновская, И. П. Дралова ; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2011. – 43 с.  
ISBN 987-985-468-880-0

Приведены основные понятия, термины и определения фотограмметрии и аэросъемки. Аэрокосмическая съемка представлена приборами, необходимыми для производства работ. Описан процесс дешифрирования и трансформирования снимков и алгоритм составления фотопланов, фотосхем, а также топографических планов. Освещены наземные стереофотограмметрические и сканерные съемки, методы спутниковых геодезических измерений и их погрешности.

Предназначено для студентов специальности «организация дорожного движения» при изучении дисциплин «Геодезия и фотограмметрия» и «Спецкурс по геодезии».

**УДК 528+528.7 (075.8)**  
**ББК 26.12**

**ISBN 987-985-468-880-0**

© Куновская Г. М., Дралова И. П., 2011

## **Введение**

Учебно-методическое пособие «Геодезия и фотограмметрия» составлено в соответствии с типовой и рабочей программой дисциплины «Геодезия и фотограмметрия» для студентов специальности «Организация дорожного движения» факультета «Управление процессами перевозок». Является новым и включает все вопросы фотограмметрии и геоинформатики, которые позволяют изучить автомобильное движение, определить типы двигающихся по дороге автомобилей, их распределение в потоке, рассчитать плотность, интенсивности и пропускную способности дороги, проанализировать причины заторов и дорожно-транспортных происшествий и т.п. В настоящее время фотограмметрия находит применение в самых различных сферах человеческой деятельности. Спектр приложения этой науки весьма широк: картографирование земной поверхности, геодезия, космические исследования, экология, кадастр, криминалистика, геоинформационные системы (ГИС) и т.д.

Теоретические основы геодезии освещены в ранее вышедшем учебно-методическом пособии «Курс инженерной геодезии (части I, II)» авторов Атрошко Е. К., Иванова М. М., Марендич В. Б., Ткачев А. А.

Пособие разделено на ряд разделов. В первом разделе приведены основные понятия, термины и определения фотограмметрии и аэросъемки. Второй раздел посвящен аэрокосмической съемке. В нем представлены приборы, необходимые для производства работ. Описан процесс дешифрирования и трансформирования снимков и алгоритм составления фотопланов, фотосхем, а также топографических планов. Наземные стереофотограмметрические и сканерные съемки освещены в третьем разделе пособия. В четвертом разделе изложено, какие возможности открывает аэрофотосъемка для организации безопасного дорожного движения. Методы спутниковых геодезических измерений и их погрешности рассмотрены в последнем разделе.

Авторы выражают благодарность рецензентам кандидату технических наук, доценту Атрошко Е. К. и главному инженеру Гомельгеодезцентра Юрченко Н. М. за замечания и предложения по улучшению пособия.

# **1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ АЭРОГЕОДЕЗИИ**

## **1.1 Основные понятия, термины и определения аэрогеодезии.**

### **Аэросъемка и ее виды**

**Аэрогеодезия** – это о раздел геодезии, изучающий методы измерения и преобразования изображений земной поверхности, получаемых с помощью аппаратуры, установленной на воздушных носителях. Эти изображения используют для создания по ним математических моделей местности, топографических и специальных планов, карт, многих других материалов, необходимых для решения разнообразных народнохозяйственных задач. Результаты аэрогеодезических работ являются основным средством получения исходной информации о местности для проектирования, строительства и эксплуатации сооружений.

В инженерной аэрогеодезии измерения и преобразования изображений на аэроснимках предназначены для использования при изысканиях, проектировании, строительстве, реконструкции и эксплуатации различных инженерных сооружений. Аэрогеодезия тесно связана с геологией, геоморфологией и гидрогеологией. Ее методы позволяют изучать формы рельефа, виды ландшафта, естественный покров земной поверхности. Инженерная аэрогеодезия в настоящее время нашла широкое применение в различных отраслях народного хозяйства страны и стала одним из наиболее важных технологических процессов, способствующих их дальнейшему развитию и совершенствованию.

Внедрение современных достижений в области аэрогеодезии при инженерных изысканиях обеспечивает эффективную перестройку всей технологии проектирования инженерных сооружений, дает возможность проводить изыскательские работы при минимальной зависимости их от природных и климатических условий местности и степени доступности отдельных мест.

Особенно эффективны инженерные аэрогеодезические работы при проектировании и строительстве различных линейных инженерных сооружений (автомобильных и железных дорог, каналов, трубопроводов, линий электропередач и связи) крупных мостовых и тоннельных переходов, аэропортов и аэродромов, при поиске, разведке и разработке полезных ископаемых.

В результате современных инженерных аэрогеодезических работ собирают всестороннюю информацию о местности, ее основных топографических, геологических и гидрологических объектах и их

положении в натуре. Такую информацию получают в процессе аэроизыскательских работ и специальных съемок, определения характеристик различных природных явлений и условий местности с учетом их влияния на технико-экономические и качественные показатели проектирования и строительства сооружений.

*Аэросъемкой* называется процесс получения изображений местности с летательного аппарата. Если ее ведут фотоаппаратами, то называют аэрофотосъемкой, если с помощью телевизионных или электронных сканирующих устройств, то – электронной аэросъемкой, если с помощью телевизоров в инфокрасной части спектра, – то тепловой или инфокрасной съемкой, а если радиолокаторами, при которых получают изображение в отраженных от поверхностных слоев электромагнитных радиоволнах – радиолокационной съемкой.

Изображение местности, полученное с помощью специальной аппаратуры, устанавливаемой на авиационных или космических носителях, называется аэрокосмической съемкой. На некоторых из видов аэросъемок остановимся ниже.

## **2 АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ СЪЕМКИ**

### **2.1 Приборы аэрокосмической съемки**

Съемка больших территорий в настоящее время осуществляется методами фотограмметрии, изучающей способы и технологию определения форм, размеров, положения в пространстве, количественные и качественные характеристики объектов по их изображениям.

Изображения местности получают с помощью специальной аппаратуры, устанавливаемой на авиационных или космических носителях. Для аэросъемки используют самолеты (например, АН-30, ТУ-134, ИЛ-18), сверхлегкие летательные аппараты (малые самолеты, мотодельтапланы) и вертолеты. Космическая съемка выполняется с искусственных спутников Земли, пилотируемых космических кораблей и орбитальных станций.

Среди аэрокосмических различают съемки фотографические, сканерные, тепловые инфракрасные, радиолокационные и др.

Основным видом аэрокосмической съемки является *аэрофотосъемка*, которую выполняют с помощью *аэрофотоаппаратов* (рисунок 2.1, а). Аэрофотоаппаратом изображение местности фиксируется на фотопленке – черно-белой, цветной или спектрзональной. Наиболее распространены форматы снимков: в нашей стране – 18×18 см и 30×30 см, за рубежом – 18×18 см и 23×23 см.

В аэрофотоаппаратах применяют сфокусированные на бесконечность линзовые объективы с фокусным расстоянием от 35 до 1000 мм (наиболее часто используются объективы с фокусным расстоянием 70, 100, 200 мм). Формат кадра и фокусное расстояние определяют угол поля зрения аэрофотоаппарата  $2\beta$  (рисунок 2.1, б). У узкоугольных аэрофотоаппаратов  $2\beta < 50^\circ$ , у широкоугольных – достигает  $140^\circ$ .

Возможность раздельно различать на снимке мелкие близко расположенные детали изображения называется *разрешающей способностью* снимка. В настоящее время аэрофотоснимки имеют разрешающую способность 10–40 линий на миллиметр.

При фотографировании на аэроснимке фиксируется изображение местности, а также координатные метки, которые определяют плоскую систему координат снимка (см. рисунок 2.1, б).

Аэрофотоснимок, угол наклона которого при фотографировании был равен нулю, называется *горизонтальным*, при угле наклона, не превышающем  $3^\circ$ , – *плановым*, при угле наклона более  $3^\circ$  – *перспективным*.

Различают аэрофотосъемку *одинарную* – это съемка отдельных объектов, *маршрутную* – фотографирование полосы местности вдоль заданной линии (например, железной дороги) и *площадную* – фотографирование местности несколькими параллельными маршрутами. Фотографирование выполняют так, чтобы смежные снимки одного маршрута имели продольное перекрытие не менее 60 %, а снимки соседних маршрутов – поперечное перекрытие не менее

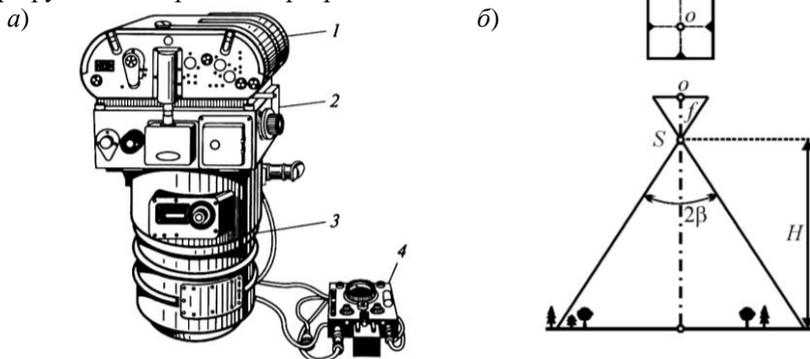


Рисунок 2.1 – Аэрофотоаппарат:

- a* – устройство: 1 – кассета; 2 – камерная часть; 3 – часть объектива; 4 – командный прибор;  
*б* – схема фотосъемки: *S* – центр проектирования снимка; *f* – фокусное расстояние;  
*H* – высота фотографирования

Аэрофотоснимок представляет собой центральную проекцию точек местности на плоскость снимка (см. рисунок 2.1, б). Масштаб горизонтального снимка

$$\frac{1}{M} = \frac{f}{H}, \quad (2.1)$$

где  $M$  – знаменатель масштаба;

$f$  – фокусное расстояние аэрофотоаппарата;

$H$  – высота полёта.

Для выполнения космических съемок используют космические фотоаппараты, являющиеся длиннофокусными модификациями аэрофотоаппаратов.

Наряду с аэрофотоаппаратами при аэросъемке стали применять цифровые электронные камеры, сканеры и другие съемочные системы, создающие цифровые изображения местности.

*Цифровая электронная камера* снабжена ПЗС-приемником (прибором с зарядовой связью). ПЗС-приемник представляет собой многоэлементный фотоэлектрический приемник излучения, состоящий из миниатюрных фотодиодов, соединенных в линейку или двумерную матрицу. Размер отдельного чувствительного элемента – меньше 0,01 мм. Лучи света от разных участков местности попадают на разные фотодиоды, создавая в совокупности изображение местности.

В отличие от бытового фотографирования, где цифровые камеры в последнее время окончательно вытеснили пленочные, в области аэрофотосъемки пока все не настолько однозначно. Наиболее широко распространенная в настоящее время гибридная технология съемки на пленку с последующим сканированием обеспечивает впечатляющую точность и разрешение. Возьмем за основу традиционный снимок формата 230×230 мм, отсканировав его на фотограмметрическом сканере с типовым разрешением 16 микрон, получаем цифровое изображение 14 375×14 375 пикселей, что составляет более 200 мегапикселей. Даже с учетом того, что реальная рабочая зона фотоснимка несколько меньше, все равно получим порядка 180 мегапикселей. А если учесть, что современные фотокамеры способны обеспечить расширение в единицы микрон, то эта цифра может вырасти еще на порядок. Собственная разрешающая способность пленки (особенно цветной) часто оказывается ниже возможностей сканеров. Исходя из этого, в реальных фотограмметрических проектах крайне редко применяют сканирование с пикселем менее 10 микрон. Учитывая то, что разрешающая способность серийно выпускаемых ПЗС-матриц едва достигает 40 мегапикселей, становится понятно, что разработчикам цифровых аэрофотокамер приходится применять довольно сложные технические решения, чтобы достигнуть разрешения соизмеримого с

пленочным. Таким образом, каждый пиксель определяет яркость лишь «своего» цветного канала, и после пересчета в «полноценное» цветное изображение общее геометрическое разрешение падает примерно в два раза. В настоящее время разрешение лучших цифровых камер превосходит 100 мегапикселей.

Конструктивно цифровые камеры разделяются на две основные группы: кадровые и сканирующие. Кадровые камеры в свою очередь, можно разделить на среднеформатные, состоящие из одной цветной ПЗС-матрицы и имеющие разрешение в 20–40 мегапикселей, и полноформатные. Они дают на выходе стандартные снимки центральной проекции, в этом случае имеют определенное преимущество. Снимок кадровой камеры не отличается от аналогового снимка после сканирования. Следовательно, для обработки таких снимков можно с успехом применять практически любое существующее программное обеспечение.

Сканирующие камеры дают на выходе изображение, которое является снимком центральной проекции только по одной оси. Вдоль оси полета изображение имеет плановую проекцию. Эта особенность является с одной стороны, недостатком, поскольку требует для фотограмметрической обработки специально адаптированного программного обеспечения. С другой стороны, за счет плановой проекции вдоль направления полета изображение оказывается максимально близким к истинному ортофото. А так как маршрут записывается в виде единого снимка, процесс триангуляции для таких изображений значительно упрощается, а часто может быть и вовсе исключен.

Сканеры бывают оптико-механические и оптико-электронные. В оптико-механическом сканере сканирующее устройство – быстро качающееся зеркало, которое, просматривая местность поперек движения носителя, посылает лучистый поток в объектив и далее на точечный фотоприемник.

В оптико-электронном сканере для регистрации излучения используется ПЗС-линейка, располагаемая перпендикулярно к направлению движения носителя аппаратуры. Периодически ПЗС-линейкой фиксируется строка изображения местности. Последовательное соединение строк формирует изображение полосы местности (рисунок 2.2).



Рисунок 2.2 – Сканерная съемка

Разрешающую способность цифровых снимков принято характеризовать числом точек на дюйм – *dpi* (от англ. *dots per inch*) и размером пикселя на местности – *PIX*. В

частности, размер пикселя в системе *TM*, установленной на ИСЗ *Landsat*, равен 30 м, а МСУ-Э/Ресурс-О – 45 м.

Сканерный метод позволяет выполнять съемки местности в течение длительного времени, передавая собираемую информацию по радиоканалам на Землю.

Лазерный сканер – сканирующий лазерный дальномер. Местность и расположенные на ней объекты отображаются множеством точек, для каждой из которых получают пространственные координаты и которые при визуализации на мониторе образуют объемное изображение объекта. Съемка местности сопровождается определением координат аэросъемочной аппаратуры с помощью спутникового приемника GPS/ГЛОНАСС, а также измерением высоты съемки радиовысотомером.

## 2.2 Понятие о космической съемке Земли

Космическая съемка поверхности Земли производится с пилотируемых космических аппаратов, орбитальных станций и искусственных спутников Земли. Съемка может выполняться космонавтами в так называемом ручном режиме или автоматически по заданной программе.

Движение космического летательного аппарата (КЛА) происходит по сложной траектории, называемой орбитой. При съемке поверхности Земли используются эллиптические, параболические и гиперболические орбиты.

Существенным недостатком съемок с КЛА, находящихся на этих орбитах, является изменение удаленности съемочной системы от снимаемой поверхности. Пропорционально изменению высоты съемки изменяется масштаб получаемых снимков. Съемка может выполняться со спутников Земли, находящихся на геостационарных орбитах. При этом варианте съемки положение спутника относительно поверхности не изменяется, так как его угловая скорость движения равна угловой скорости движения земной поверхности. При съемке с геостационарных спутников получают информацию об одной территории практически в любое время.

Наиболее приемлемыми, с точки зрения фотограмметрических преобразований, являются круговые орбиты КЛА. Круговые орбиты представляют собой окружности с центром, совпадающим с центром Земли (рисунок 2.3). Радиус

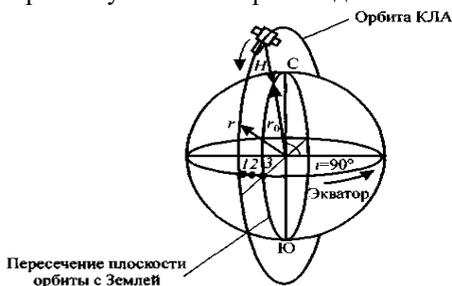


Рисунок 2.3 – Некоторые элементы круговой орбиты

таких орбит  $r$  определяется как сумма радиуса Земли  $r_0$  и высоты полета  $H$  летательного аппарата (или высоты съёмки). Средний масштаб снимков при съёмке с круговых орбит практически одинаков. Полосы снимаемой поверхности (полосы обзора), захватываемые с каждого витка летательного аппарата, также примерно одинаковы.

Плоскость орбиты КЛА пересекает плоскость экватора под некоторым углом  $i$ , который называют наклонением орбиты (см. рисунок 2.3). Если наклонение орбиты равно  $90^\circ$ , то ее плоскость проходит через полюсы Земли. Такая орбита носит название полярной. При наклонении равном  $0^\circ$  плоскость орбиты КЛА совпадает с экватором, поэтому ее называют экваториальной. Использование полярной и близполярной орбиты обеспечивает выполнение съёмки всей поверхности за счет вращения Земли вокруг своей оси. При уменьшении наклонения орбиты сокращается территория, захватываемая съёмочной аппаратурой. Периодичность (частота) съёмки одной и той же территории в зависимости от параметров полета КЛА может быть от 4 раз в сутки до 5–6 раз в месяц и реже. Регулярная повторяемость съёмки позволяет применять получаемые материалы для обновления мелкомасштабных топографических и специальных карт, а также осуществлять мониторинг больших территорий.

От параметров полета зависит время возвращения летательного аппарата в заданную точку. Это связано с тем, что при наклонении орбиты, не равном нулю ( $i > 0^\circ$ ), а также из-за вращения Земли, точка пересечения орбиты КЛА с экватором смещается. Если на данном витке КЛА прошел над некоторой точкой 1 экватора (см. рисунок 2.3), то после оборота вокруг Земли он пройдет уже над точкой 2 экватора, затем над точкой 3 и так далее. Время возврата КЛА в исходную (или заданную) точку над поверхностью Земли в зависимости от параметров полета находится в интервале от 1 до 30 дней и более. Положение КЛА, а следовательно, положение съёмочной аппаратуры, в пространстве определяют в географических координатах  $\varphi$  и  $\lambda$ . Высота полета КЛА при круговых орбитах находится в пределах от 200 до 1000 км.

В зависимости от фокусного расстояния используемой съёмочной системы и высоты полета КЛА снимки получают в масштабах от 1:100 000 до 1:10 000 000. Формат космических снимков различен – от размера 180×180 мм до 300×300 мм и более.

При космическом фотографировании поперечное перекрытие снимков обеспечивается тремя приемами. В первом случае за счет вращения Земли: при этом снимки, получаемые с последующего витка, перекрываются со снимками предыдущего витка (виток аналогичен маршруту при аэрофотосъёмке). Если съёмка выполняется при движении КЛА по

полярной или близполярной орбите, поперечное перекрытие снимков будет непостоянным. Вблизи экватора перекрытие будет минимальным, в районе полюсов – максимальным. Чтобы поперечное перекрытие находилось в заданных пределах, необходимо согласование скорости обращения КЛА со скоростью вращения Земли.

Во втором случае перекрытие снимаемой полосы осуществляется поперечным наклоном (креном) летательного аппарата. Угол крена должен обеспечить заданное поперечное перекрытие снимков.

В третьем случае продольное перекрытие снимков обеспечивается разворотом КЛА, при котором выполняется наклон главной оптической оси съемочной системы вперед по направлению полета (предыдущий снимок) и назад (последующий снимок) (рисунок 2.4).

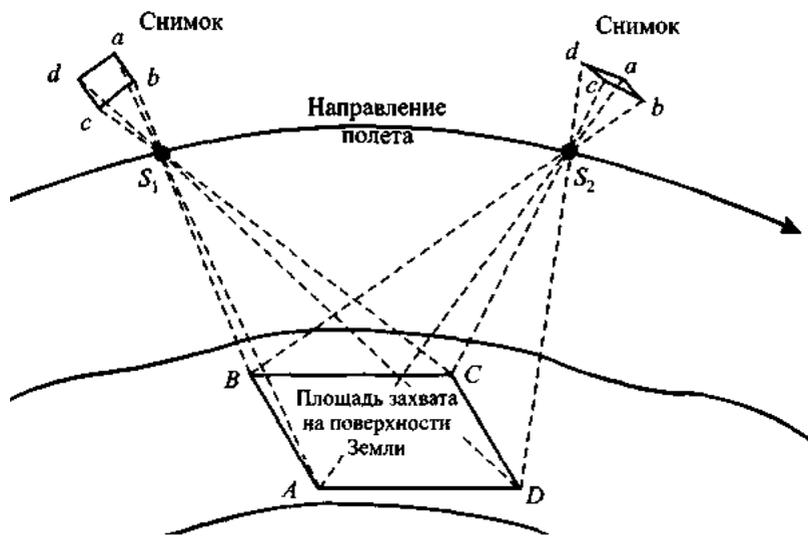


Рисунок 2.4 – Схема обеспечения перекрытия космических снимков

### 2.3 Дешифрирование снимков

**Дешифрирование** – процесс распознавания на аэроснимках сфотографированных предметов местности, обозначения их условными знаками, принятыми при составлении карт и установления их качественных и количественных характеристик. Полученные при аэрокосмической съемке снимки надо дешифрировать, то есть опознать изображенные на них объекты и определить их количественные и качественные характеристики.

Так, например, при изображении дороги необходимо условным знаком показать, шоссейная она или грунтовая; при изображении лесных массивов указывают породу и возраст леса. Некоторые же элементы совсем не могут быть получены фотографически: названия населенных пунктов, глубины болот, линии связи, административные границы и т. д. Такие элементы наносят на аэроснимки по результатам дополнительных измерений и обследований. Дешифрирование проводят по фотосхемам или контактными отпечаткам в пределах рабочей площади аэроснимка.

Дешифрирование различают топографическое и тематическое. Цель топографического дешифрирования – получение информации о местности, необходимой для составления топографических карт и планов, тематического – получение специальной информации (например, экологической).

В каждом отдельном случае должны быть выявлены детали и особенности местности, влияющие на выполнение специальных задач. При любом тематическом дешифрировании в первую очередь проводят топографическое дешифрирование, так как оно дает картографическую основу для нанесения специальных элементов.

Дешифрирование снимков бывает камеральное, полевое и комбинированное.

Камеральное дешифрирование выполняется в стационарных условиях путем анализа изображений на снимках и сопоставления их с имеющимися эталонами. При этом используют прямые и косвенные дешифровочные признаки.

*Прямые признаки* непосредственно указывают на характер объекта. Сюда относят форму, размер, фототон и тень от объекта.

На плановом аэроснимке изображение формы контура, характерной для различных предметов местности, передается без искажения. Размер изображения зависит от масштаба снимка. Тон зависит от многих причин, в первую очередь от способности данной поверхности отражать от себя лучи света, от освещенности поверхности и др. Так, например, сухие дороги изображаются светлыми тонкими линиями; пашня на снимке темнее, чем больше ее влажность. Водные пространства получают темными и темнее, чем больше глубина и темнее дно. При косом освещении вода получается светлой, а иногда из-за солнечных бликов совсем белой. Многие объекты имеют характерный рисунок, например: зернистой структурой изображается лес, полосами – огороды. Изображения теней от предметов часто похожи на очертания самих предметов.

К *косвенным признакам* дешифрирования относят расположение данного объекта относительно окружающих предметов. Например, дорога, закапчивающаяся у реки и продолжающаяся по другую ее сторону, свидетельствует о наличии моста или брода; если по дну лощины просматриваются заросли кустарника, то это говорит о возможном наличии ручьев и т. д.

При камеральном дешифрировании прямые и косвенные признаки используют совместно. Большую помощь оказывают *снимки-эталоны*, которые получают на основании тщательного изучения и полевого дешифрирования снимков, характерных для данного района. Как правило, снимки дешифрируют не одним каким-либо методом – полевым или камеральным: участки, которые не вызывают сомнений или на которые есть эталоны, дешифрируют камерально; в других случаях производят полевое дешифрирование.

Применяя прямые и косвенные признаки дешифрирования, используя имеющиеся эталоны полевого дешифрирования, а также сведения о дорогах, реках, линиях связи, линиях электропередачи, административные материалы и т. д., объекты съемки дешифрируют и по мере распознавания их вычерчивают на аэроснимке тушью: зеленым цветом – воды (реки, озера, болота и т. д.), черным – границы землепользования, очертания предметов местности и угодий, коричневым цветом – рельеф в горизонталях.

Полезно знать некоторые признаки часто встречающихся объектов ландшафта.

*Границы землепользования* обычно проходят по опушкам леса, дорогам или просекам, часто совпадают с живым урочищем – оврагом, рекой. Границы иногда сопровождаются посадкой из деревьев или кустарников.

*Населенные пункты* изображаются параллельными рядами прямоугольников. Поселки сельского типа часто расположены вдоль рек, имеют приусадебные участки в виде узких полос различного тона. К населенному пункту со всех сторон подходят дороги.

*Пути сообщения* изображаются тонкими светлыми линиями, железные дороги – строго прямыми или плавными кривыми (железные дороги обычно сопровождаются лесными посадками). Шоссеиные дороги имеют плавные, но более крутые повороты. Грунтовые проселочные и полевые дороги изображаются тонкими белыми линиями с крутыми поворотами.

*Воды* изображаются ровным тоном от светлого до темного. Отмели и острова – белым тоном. Направление течения определяется по имеющимся островам и притокам. Острова тупым концом обращены против течения реки, а острым по течению.

*Пахотные земли* на аэроснимке изображаются различным тоном в зависимости от влажности и наличия растительности. На пашне часто видны борозды. Пашни не примыкают непосредственно к рекам, озерам, болотам. К ним чаще всего подходят луга, которые изображаются серым тоном. На участке скошенного луга могут просматриваться копны и стога сена.

*Леса* на аэроснимке имеют характерный зернисто-бархатный рисунок. Хвойный лес имеет более темный тон по сравнению с лиственным. Отчетливо видны кварталы леса, разделенные просеками.

*Кустарник* изображается сплошным бархатистым массивом сероватого тона. Как правило, кустарник располагается по склонам рек, ручьев, оврагов.

Часто невозможно по снимку получить достаточные характеристики объектов, например, количество проводов на столбах линии связи, скорость течения реки, отличить луг от болота и др. Тогда камеральное дешифрирование дополняется более дорогим – *полевым дешифрированием*. При полевом дешифрировании специалист, обходя местность, непосредственно сравнивает изображения на снимке с объектами и устанавливает их характеристики.

Комбинированный способ дешифрирования сочетает в себе процессы камерального и полевого дешифрирования. Распознаваемые бесспорно объекты местности и явления природы дешифрируются в камеральных условиях, затем осуществляют полевую доработку сложных участков с одновременным контролем результатов камерального дешифрирования.

Для увеличения изображения предметов на аэроснимке, а также для получения стереоскопической модели местности при камеральном дешифрировании применяют цифровые фотограмметрические станции.

В настоящее время при специальных аэрофотосъемках в сложных условиях местности используют многослойные цветные двух- и трехслойные спектрально-анализирующие пленки. Эти пленки содержат слой эмульсии, чувствительный к невидимым инфракрасным лучам спектра, который способствует выделению некоторых особенностей местности.

## 2.4 Искажения снимков

Изображение местности на снимке имеет искажения, основные из которых обусловлены непостоянством высоты фотографирования, рельефом местности, наклоном снимка, кривизной земной поверхности. Изменение высоты фотографирования вызывает изменение масштаба аэроснимков (см. рисунок 2.1).

Рельеф местности вызывает смещения  $i_0i = \delta_n$  (рисунок 2.5, а) изображений точек на снимке, выражаемые формулой

$$\delta_n = \frac{rh}{H},$$

где  $r$  – расстояние до точки надира  $n$  (пересечения снимка отвесной линией, проходящей через центр проекции);

$h$  – превышение точки  $I$  над точкой  $I_0$ ;

$H$  – высота фотографирования.

На космических снимках эти искажения незначительны и учитывают их только в высокогорных районах.

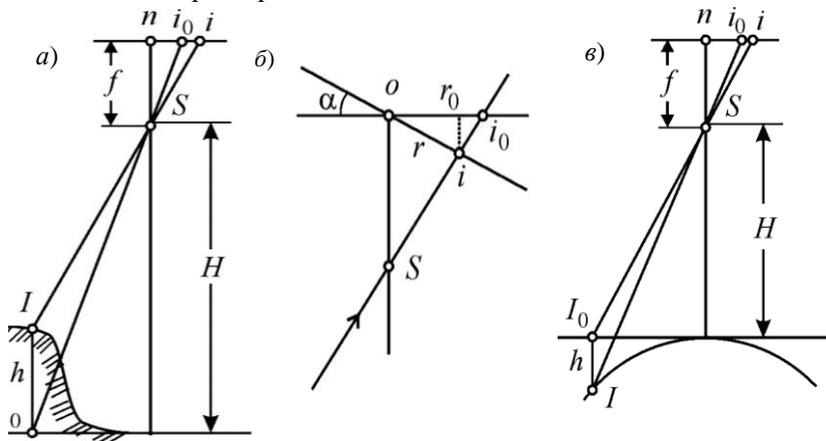


Рисунок 2.5 – Смещения точек на снимке, вызванные:

*a* – рельефом; *б* – наклоном снимка; *в* – кривизной урванной поверхности Земли

Наклон снимка на угол  $\alpha$  вызывает смещения точек относительно соответствующих точек горизонтального снимка. Изменение расстояния от центра снимка до точки в направлении наклона

$$\delta_{\alpha} = r_{\alpha} - r_0,$$

где  $r_{\alpha}$  – расстояние на наклонном снимке;

$r_0$  – расстояние на горизонтальном снимке;

Из рисунка 2.5, *б* видно, что

$$r_0 = r_{\alpha} \cos \alpha + r_{\alpha} \sin \alpha \frac{r_0}{f} \approx r_{\alpha} + r_{\alpha} \sin \alpha \frac{r_0}{f}.$$

Следовательно, изменение расстояния

$$\delta_{\alpha} \approx -\frac{r^2 \sin \alpha}{f}.$$

Влияние кривизны Земли на положение точек на снимке аналогично влиянию рельефа (рисунок 2.5, *в*).

Искажения снимков, полученных сканером, кроме названных причин, вызваны еще тем, что изображение сканерного снимка по направлению полета и направлению сканирования строится в различных проекциях: в направлении полета – в ортогональной проекции, в перпендикулярном направлении – в перспективной проекции. В результате круг на плоской

местности изображается на сканерном снимке неправильным овалом, прямая – кривой, квадрат – прямоугольником.

В результате искажений аэрокосмические снимки имеют разный масштаб, причем неодинаковый в разных частях снимка.

## 2.5 Трансформирование снимков

**Трансформирование аэрофотоснимков** – это преобразование плановых или перспективных снимков в горизонтальные снимки заданного масштаба.

Трансформирование различают фотомеханическое и компьютерное.

**Фотомеханическое** трансформирование выполняется на фототрансформаторах (рисунок 2.6). Для трансформирования должны быть известны координаты четырех изображенных на снимке опорных точек. Планшет с нанесенными на него опорными точками помещают на экран 1, проецируют на него негатив снимка, заложенный в кассету 3, и, изменяя масштаб изображения и поворачивая экран и негатив, добиваются совмещения опорных точек на планшете с соответствующими точками проекции негатива. Полученное на экране трансформированное изображение фиксируют на фотобумаге.

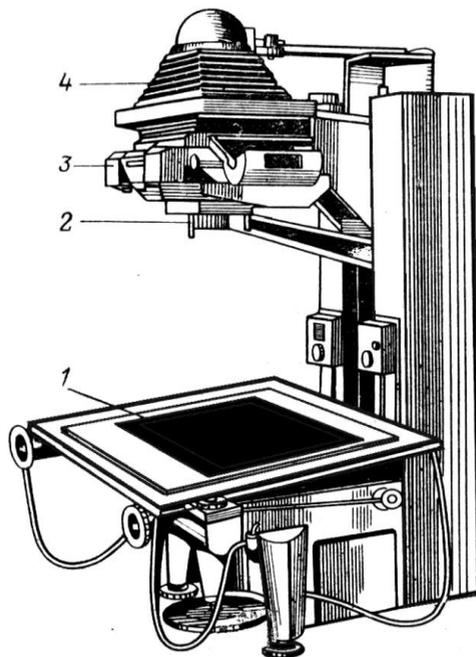


Рисунок 2.6 – Фототрансформатор Seg-5 (ФРГ):  
1 – экран; 2 – объектив; 3 – кассета; 4 – осветительное устройство

Однако при таком трансформировании не устраняются искажения, обусловленные рельефом местности, которые для горных районов весьма существенны. Такие искажения устраняют, трансформируя снимок по зонам, имеющим разную высоту, или с помощью щелевых трансформаторов.

Для компьютерного трансформирования аэрофотоснимков преобразуют в цифровую форму, после чего преобразования выполняют по стандартным компьютерным программам.

По компьютерным программам выполняется и трансформирование сканерных снимков.

## 2.6 Составление фотопланов и фотосхем

**Фотоплан** монтируют из трансформированных аэроснимков. Основой фотоплана служит бумага, наклеенная на лист алюминия или картона. На основу наносят координатную сетку и по их координатам – опорные точки. На трансформированных снимках опорные точки прокалывают пуансоном, после чего, совмещая отверстия на снимках с опорными точками на основе, середину снимков приклеивают к основе. Наклеив два соседних снимка, разрезают их посередине перекрытия и подклеивают края на стыке снимков. Покрыв снимками всю площадь, получают единое фотографическое изображение местности, соответствующее по точности топографическим планам того же масштаба. Обычно на фотоплан наносят координатную сетку и подписывают названия населенных пунктов, рек и других объектов.

**Фотосхему** монтируют без использования опорных точек. Смежные снимки совмещают методом "мигания". На снимок, закрепленный на основе, накладывают смежный снимок и быстрыми отгибаниями его в зоне перекрытия совмещают контуры снимков. Закрепив середину смежного снимка, оба снимка разрезают посередине перекрытия. Продолжая, получают фотографическое изображение местности – фотосхему, менее точную, но требующую меньше времени для ее составления. Можно составлять фотосхемы и из нетрансформированных аэроснимков.

## 2.7 Составление по снимкам топографических планов

Планы местности по снимкам составляют, применяя *стереофотограмметрический метод*, заключающийся в совместной обработке пар перекрывающихся аэроснимков, полученных

фотографированием местности из двух разных точек. Два снимка одного участка местности, полученные фотографированием из разных точек, называют *стереопарой*.

Если выполнить *взаимное ориентирование* двух смежных снимков, то есть установить их в то же взаимное положение, которое они занимали в момент съемки, то пересечения лучей, проведенных через центры проектирования от одноименных точек на снимках, образуют пространственную модель местности. Масштаб такой модели равен отношению расстояния между центрами снимков к расстоянию между центрами проектирования – *базису* фотографирования.

Выполнив *внешнее ориентирование* построенной модели, то есть, повернув ее и изменив масштаб таким образом, чтобы координаты и высоты опорных точек модели стали равны известным из наземных геодезических измерений плановым координатам и высотам, выраженным в заданном масштабе, получают модель, по которой можно определять координаты и высоты всех других точек местности.

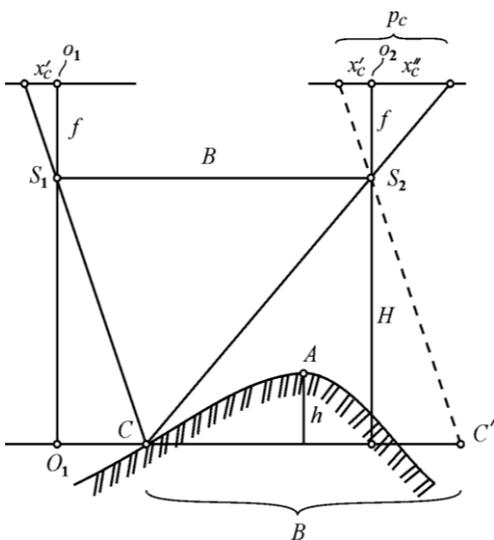
Взаимное и внешнее ориентирование снимков и последующие измерения на модели местности выполняют, используя стереофотограмметрические приборы.

Рассмотрим идеальную стереопару (рисунок 2.7), в которой оба снимка и базис фотографирования  $B$  горизонтальны. Локальные плоские координаты  $X_C, Y_C$  любой точки  $C$  можно вычислить по измеренным координатам,

$x'_c, y'_c$  ее изображения на снимке (например, левом):

$$X_C = x'_c \frac{H}{f}; \quad Y_C = y'_c \frac{H}{f},$$

где  $H$  – высота фотографирования;



$f$  – фокусное расстояние аэрофотоаппарата.

За начало локальных координат принята проекция  $O_1$  точки  $S_1$  на исходную уровенную поверхность.

Превышения между точками местности вычисляют по разностям их продольных параллаксов. Продольным параллаксом  $p_c$  точки  $c$  называется разность абсцисс ее изображений на левом и правом снимках стереопары:

Рисунок 2.7 – Идеальная стереопара

$$p_c = x'_c - x''_c.$$

Аналогично для точки A:

$$p_a = x'_a - x''_a.$$

Из рисунка 2.7 видно, что

$$H = \frac{Bf}{p_c}.$$

$$H = \frac{Bf}{p_c}. \quad (2.2)$$

Аналогично для точки A:

$$H - h = \frac{Bf}{p_a}. \quad (2.3)$$

Вычитая (2.3) из (2.2), после преобразований получим:

$$h = \Delta p \frac{H}{b + \Delta p},$$

где  $\Delta p = p_a - p_c$  – разность продольных параллаксов;  
 $b = p_c$  – базис фотографирования,  
 выраженный в масштабе снимка.

Измерив разности продольных параллаксов  $\Delta p$  между изображениями характерных точек местности и опорных точек, высоты которых известны, вычисляют превышения, а затем и высоты определяемых характерных точек.

Обработку стереопар выполняют с помощью цифровых фотограмметрических станций (рисунок 2.8), представляющих собой программно-аппаратные комплексы (компьютер, стереочки, фотограмметрический сканер, программное обеспечение). В ходе обработки выполняется сканирование фотоснимков, их ввод в цифровой форме в память компьютера, взаимное и внешнее ориентирование, визуализация стереопар на экране дисплея. Оператор, наблюдая стереопару через стереочки, наводит курсор на нужные точки, и компьютер вычисляет их координаты. Автоматически в интерактивном режиме выполняется отслеживание контуров и горизонталей. По результатам обработки стереопар создается план местности, изображение которого высвечивается на экране. Оператор редактирует его, вводя нужные условные знаки и исправляя неточности. Созданный план хранится в цифровом виде и может быть отпечатан на плоттере. Для обработки снимков служат такие программные продукты, как ERDAS Imagine, ENVI, PHOTOMOD, Талка и др.

На современном этапе хорошо зарекомендовала себя система оборудования и программного обеспечения для цифровой фотограмметрии

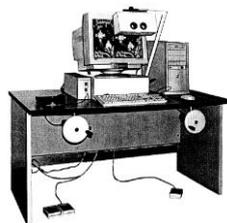


Рисунок 2.8 – Цифровая фотограмметрическая станция ЦНИИГАиК

и картографии «Дельта» она была разработана на научно-производственном предприятии «Геосистема» г. Винница Украина (рисунок 2.9).



Рисунок 2.9 – Оборудование и программное обеспечение для цифровой фотограмметрии и картографии

### 3 НАЗЕМНЫЕ СТЕРЕОФОТОГРАММЕТРИЧЕСКАЯ И СКАНЕРНАЯ СЪЕМКИ

#### 3.1 Наземная стереофотограмметрическая (фототеодолитная) съемка

**Наземная стереофотограмметрическая съемка** – это составление плана путем обработки снимков местности, полученных фотографированием ее камерами, установленными на земной поверхности. Такую съемку особенно часто применяют при съемке горной местности.

Фотографирование местности выполняют фототеодолитами, а в настоящее время чаще цифровыми фотокамерами.

*Фототеодолит* – прибор, представляющий собой фотокамеру с ориентирующим устройством, служащим для ориентирования фотокамеры в нужном направлении. На рисунке 3.1 показан фототеодолит P30 фирмы

Вильд (ФРГ), в верхней части которого укреплен теодолит, который используется как для ориентирования фотокамеры, так и для выполнения необходимых угловых измерений.

Участок местности фотографируют из двух точек  $S_1$  и  $S_2$  (рисунок 3.2). Расстояние между ними называется базисом фотографирования. В результате фотографирования местности на стеклянной фотопластинке, помещенной в кассету фотокамеры, фиксируется снимок – изображение местности и координатные метки (рисунок 3.3).

На снимке измеряют координаты изображений точек местности и их продольные параллаксы. Координатными осями снимка служат оси  $x$  и  $z$ , проходящие через координатные метки. На рисунке 3.3 показан снимок и на нем – координаты  $x_1$  и  $z_1$  изображения  $m_1$  точки местности  $M$  (см. рисунок 3.2).

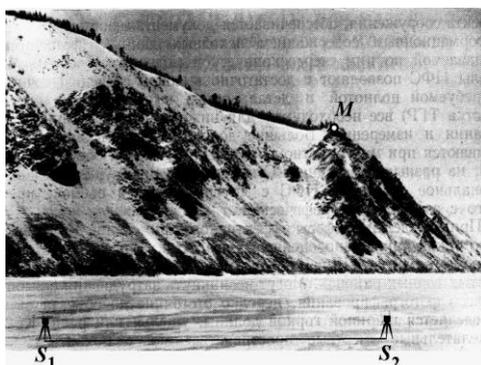


Рисунок 3.1 – Фототеодолит Р30      Рисунок 3.2 – Схема фотографирования местности

При изготовлении и юстировке фототеодолита стремятся, чтобы пересечение  $O$  осей  $x$  и  $z$  совпадало с главной точкой снимка, то есть с точкой пересечения плоскости снимка главным лучом – проектирующим лучом, перпендикулярным к плоскости снимка.

Нормальным случаем съёмки считают такой, когда при фотографировании главный луч фотокамеры  $S_1O_1$  (рисунок 3.4) устанавливают в горизонтальное положение и в обеих точках ( $S_1$  и  $S_2$ ) направляют перпендикулярно базису. Но часто съёмку выполняют с отклонением главных лучей от нормали к базису на одинаковые или даже разные углы.

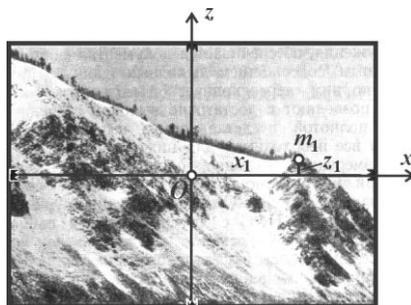


Рисунок 3.3 – Фотоснимок (левый)

По результатам измерений вычисляют пространственные координаты точек местности, выраженные в фотограмметрической системе координат  $S_1XYZ$  (см. рисунок 3.4).

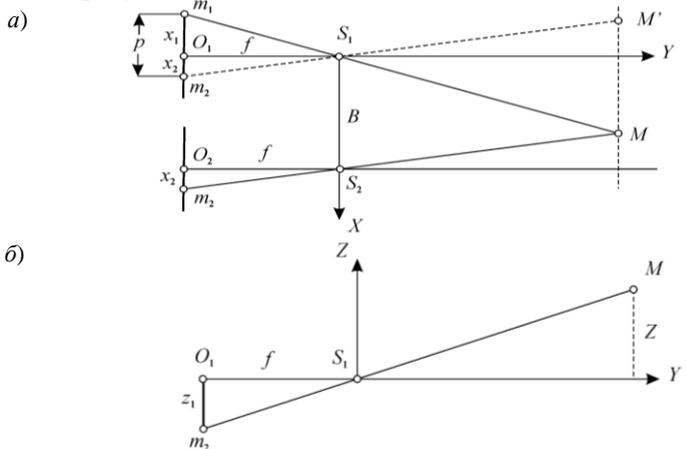


Рисунок 3.4 – Связь координат  $x, z$  на снимках с фотограмметрическими координатами  $X, Y, Z$ :

$a$  – проекция на горизонтальную плоскость  $S_1XY$ ;  $b$  – проекция на вертикальную плоскость  $S_1YZ$

Началом фотограмметрических координат служит центр проекции левого снимка  $S_1$ . Оси  $X$  и  $Y$  лежат в горизонтальной плоскости. За ось  $Y$  принято направление главного луча фотокамеры  $O_1S_1$ , а ось  $X$  перпендикулярна к нему и при нормальном случае съемки лежит в одной отвесной плоскости с базисом. Ось  $Z$  направлена вверх по отвесной линии. Точки  $O_1$  и  $O_2$  – главные точки левого и правого снимков.

Точка местности  $M$  изобразится на левом снимке в точке  $m_1$ , а на правом – в точке  $m_2$ .

Для вычисления фотограмметрических координат точки  $M$  используют следующие очевидные соотношения:

$$\frac{Y}{f} = \frac{B}{p}; \quad \frac{X}{x_1} = \frac{Y}{f} = \frac{B}{p}; \quad \frac{Z}{z_1} = \frac{Y}{f} = \frac{B}{p}, \quad (3.1)$$

где  $X, Y, Z$  – фотограмметрические координаты точки  $M$ ;

$p$  – продольный параллакс ( $p = x_2 - x_1$ );

$f$  – фокусное расстояние камеры;

$B$  – горизонтальное проложение базиса, который измеряют с относительной погрешностью, не превышающей 1:2000.

Из соотношений (3.1) вытекают формулы для вычисления фотограмметрических координат:

$$Y = \frac{B}{p} f; \quad X = \frac{B}{p} x_1; \quad Z = \frac{B}{p} z_1.$$

При съемке значительных участков местности фотографирование разных ее частей приходится выполнять с разных базисов, получая координаты точек местности в разных фотограмметрических системах.

От фотограмметрических координат  $X, Y, Z$  переходят к геодезическим прямоугольным координатам, например, координатам Гаусса–Крюгера  $x, y$  и нормальным высотам  $H$ . При нормальном случае съемки этот переход выполняют, используя формулы:

$$x_M = x_{S_1} - X \sin \alpha + Y \cos \alpha,$$

$$y_M = x_{S_1} - X \cos \alpha + Y \sin \alpha,$$

$$H_M = H_{S_1} + Z,$$

где  $x_M, y_M, x_{S_1}, y_{S_1}$  – геодезические прямоугольные координаты пикета  $M$  и центра проектирования  $S_1$ ;

$H_M$  и  $H_{S_1}$  – высоты тех же точек;

$\alpha$  – дирекционный угол оси  $Y$ , то есть направления главного луча фотокамеры  $O_1S_1$ .

Координаты и высоту центра проектирования, а также дирекционный угол направления  $O_1S_1$  определяют привязкой к опорной геодезической сети.

Вычислив координаты и высоты достаточного числа пикетов, располагаемых в характерных точках контуров и рельефа, и нанеся их на план, вычерчивают очертания контуров и горизонтالي. Вычисления и графические построения автоматизированы и выполняются по стандартным программам на цифровой фотограмметрической станции ЦФС, включающей компьютер, дисплей, устройства ввода и вывода информации, в том числе графопостроитель. Снимки местности вводятся в ЦФС в цифровом виде. Для этого, если изображение местности получено на фотопластинке или фотобумаге, его сканируют и преобразуют в цифровую форму. При фотографировании цифровыми камерами сразу получают цифровые снимки. В результате последующей обработки снимков формируется цифровая модель местности и при необходимости на графопостроителе вычерчивается план местности.

Отметим, что наземная стереофотограмметрическая съемка применяется не только для составления планов местности. Фотографируя фасады зданий, архитектурные и исторические памятники, создают чертежи, подробно отражающие детали их формы, позволяющие выполнять точные их обмеры и создавать документы, используемые в последующем, например, при реставрационных работах.

### 3.2 Сканерная съемка

**Лазерный сканер** – прибор, предназначенный для автоматического определения пространственных координат множества точек, расположенных на поверхности объекта съемки.

Сканер излучает лазерный луч, который, отразившись от поверхности объекта, возвращается к прибору. По времени прохождения сигнала, как и в светодальномере, определяется расстояние до точки отражения.

Шаговый двигатель прибора системой зеркал изменяет направление лазерного луча. По углам поворота зеркал и измеренному расстоянию вычисляются трехмерные координаты точки.

Интерфейсным кабелем сканер соединен с компьютером, который по установленной программе управляет работой сканера и обрабатывает результаты измерений.

При выполнении съемки поверхность объекта покрывается "облаком точек", то есть множеством точек, плотность которых может задаваться в пределах от долей миллиметра до нескольких сантиметров. В результате обработки измерений получают трехмерную модель объекта. Эту модель можно рассматривать на экране компьютера под разными углами зрения и в разных проекциях, а также выполнять на ней обмер интересующих частей объекта съемки.

Ограниченное поле зрения сканера и форма объекта съемки обычно не позволяют выполнить съемку всего объекта с одной установки сканера. Поэтому сканирование выполняют из нескольких позиций сканера, покрывая объект "облаком точек" по частям. При этом части облака должны иметь перекрытия, то есть общие точки, что дает возможность "сшивать" эти части в одно целое. Такими общими точками служат характерные, особенно четкие точки объекта или специальные мишени, устанавливаемые перед съемкой на объекте. При необходимости центры мишеней геодезическими измерениями привязывают к существующей геодезической сети. Такой привязкой обеспечивается представление всей модели в единой с геодезической сетью системе координат.



Рисунок 3.5 – Лазерный сканер Leica HDS2500

Сканеры существуют разной точности (рисунок 3.5). Выбор сканера зависит от характера решаемой задачи. Так, точные сканеры при расстоянии от прибора до объекта 50 м обеспечивают

определение положения точек с погрешностями, не превышающими 3–6 мм. Сканы с дальностью съемки 400 м и более характеризуются точностью в несколько сантиметров.

Метод лазерного сканирования применяется для оперативного составления плана участка местности, а также для съемки искусственного сооружения или фасада здания и получения их точных чертежей.

Воздушно-лазерное сканирование (лазерная локация) является в настоящее время одним из наиболее эффективных и перспективных методов сбора пространственных данных для крупномасштабного топографического картографирования, а также оказывает позитивное влияние на группу смежных прикладных дисциплин – геодезию, фотограмметрию, картографию. Применение лазерного сканирования позволяет выполнить значительно большие объемы работ в меньшие сроки по сравнению с традиционной топографической съемкой.

Зарегистрированные в полете данные, а также информация об атмосферных условиях, позволяет сгенерировать наборы геодезических координат точек зондирующих лазерных импульсов. При этом для каждой точки регистрируется интенсивность отражения сигнала. В совокупности указанные лазерные точки образуют некоторый образ наблюдаемого объекта, который принято называть лазерно-локационным изображением. Лазерно-локационная технология позволяет создавать высокоточные: цифровые модели местности и сложных инженерных объектов; цифровые модели рельефа, даже под кронами деревьев, орто- и фотоизображения и т.п.

## **4 АЭРОФОТОСЪЕМКА ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ**

### **4.1 Аэрофотосъемка при изучении транспортных потоков**

Для изучения автомобильного движения и его транспортных потоков производится специальная плановая маршрутная аэрофотосъемка автомобильных дорог в определенные периоды времени в масштабах 1:1000– 1:5000. Взаимное продольное перекрытие фотоснимков такой аэрофотосъемки берут с учетом скоростей движения автомобилей и аэрофотосъемочного самолета или вертолета. Повторную аэрофотосъемку дороги для определения параметров транспортных потоков, а также для учета состава и направлений движения автомобилей выполняют в тех же масштабах. В результате дешифрирования крупномасштабных аэрофотоснимков определяют типы двигающихся по дороге автомобилей,

их распределение в потоке, некоторые динамические характеристики движения.

По таким аэрофотоснимкам можно выполнить расчет интенсивности движения и пропускной способности дороги, ее транспортно-экономических и эксплуатационных показателей, проанализировать причины аварий и происшествий. Стереофотограмметрический и аналитический методы обработки крупномасштабных аэрофотоснимков с вертолета позволяют получить специальные данные о происшествии или аварии. Например, определить длину и траекторию тормозного пути, если видны следы автомобилей в момент аварии, действия водителей и пешеходов. Аэрофотосъемка регулярных скоплений автомобилей на различных участках дороги позволяет решать ряд важных задач по организации дорожного движения. Например, в часы пик по аэрофотоснимкам затора на дороге можно установить причину и места скопления автомобилей. Такой причиной может быть малая скорость отдельных автомобилей (обычно грузовых), малая скорость на подъеме или на кривой с небольшим радиусом, при въезде в поселок или город, при подходе к транспортной развязке и т. д. На аэрофотоснимках вертолетной крупномасштабной (1:2000–1:1000) специальной аэрофотосъемки видны участки и размеры скоплений автомобилей, их типы. По ним можно наметить мероприятия по ликвидации таких заторов и скоплений. Например, изменяют условия и производят реконструкцию таких участков, изменяют разметку дороги с передачей одной полосы движения на сторону наибольшей его напряженности, в определенные часы перегрузки дороги автомобили направляют по параллельным данному участку смежным дорогам или производят реконструкцию с добавлением одной или двух полос движения на затяжных или предельных подъемах, реконструируют участки с кривыми минимальных радиусов, прокладывают дорогу для транзитного движения в обход поселка или города, расширяют участки перед транспортной развязкой или железнодорожным переездом, делают пересечение дорог в разных уровнях, проводят мероприятия по увеличению видимости на участках, закрытых растительностью, крутыми откосами полотна, крутыми склонами местности.

В соответствии с результатами такой специальной аэрофотосъемки можно наиболее удачно расставить посты милиции и ГАИ на дорогах с интенсивным движением в тех местах, где наблюдается скопление автомобилей в определенные моменты времени.

Аэрофотосъемка позволяет вести регулярный учет дорожного движения в различные периоды года и суток. При учете движения можно устанавливать: типы автомобилей, степень загрузки их грузами (для открытых автомобилей), скорости движения по участкам, интервалы и интенсивность движения, участки наиболее частых происшествий. По

анализу характера и условий автоперевозок, представленных на аэрофотоснимках, можно наметить ряд мероприятий, направленных на улучшение условий и экономических показателей дорожного движения, или технико-экономических показателей автоперевозок. По показателям и параметрам дорожного движения можно установить ряд мер по регулированию скоростей и времени пробега, созданию наиболее благоприятных условий и режима движения, устройству видовых участков и площадок.

Для организации такой работы при ГАИ создают специальное подразделение, которое регулярно проводит специальную аэрофотосъемку, выполняет фотограмметрические измерения и дешифрирование фотоснимков, производит анализ результатов аэрогеодезических работ в целях организации дорожного движения.

## **4.2 Определение по аэрофотоснимкам условий и режима движения автомобилей**

Производство специальной аэрофотосъемки позволяет выявить условия и режим движения автомобилей на реконструируемой дороге и участках ее перестройки, определить наиболее опасные и неудобные места для движения.

По фотоснимкам устанавливают плотность потоков автомобилей по каждому направлению, типы движущихся автомобилей, их скорость и ускорение, интервалы между ними, интенсивность движения и т. д.

В зависимости от поставленной задачи аэрофотосъемку дороги и движущихся по ней автомобилей выполняют с вертолета в крупных масштабах (1:1000–1:2000) в часы пик в прямом и обратном направлениях при продольном перекрытии снимков 80–90 % и с фиксированием времени фотографирования каждого кадра. В отдельных местах, на участках пересечений дорог, ответвлений подъездов к крупным населенным пунктам, участков ввода дорог в города рекомендуется выполнять «стационарную» аэрофотосъемку с зависшего над таким местом вертолета.

Элементы движения как отдельных автомобилей, так и всего потока устанавливают в процессе специальных определений и измерений на фотоснимках. Для выявления скорости движения при дешифрировании из потока автомобилей, изобразившихся на фотоснимках первого залета, выделяют автомобили, отличающиеся от других по своему типу, тону (окраске), грузу или форме с тем, чтобы их можно было уверенно опознать на аэроснимках второго (обратного) залета. При таком выделении замечают места расположения каждого автомобиля на снимках первого и второго залета и по накладному монтажу или при специальных фотограмметрических работах измеряют расстояния между ними  $L_i$ . Кроме

того, определяют период времени  $t$ , прошедший между фотографированием автомобиля в первом залете и во втором залете.

Средняя скорость движения автомобиля

$$v_i = L_i / t. \quad (4.1)$$

Скорость движения автомобиля в определенном месте (на прямой, кривой, подъеме, спуске)  $v$  устанавливают по интервалу времени между моментами фотографирования двух соседних аэрофотоснимков  $\Delta t_o = t_2 - t_1$  и расстоянию  $L_o$ , пройденному автомобилем за это время

$$L_o = l_o m_o, \quad (4.2)$$

где  $l_o$  – измеренная на снимке длина пути, пройденного автомобилем;  
 $m_o$  – знаменатель масштаба аэроснимка.

$$v_o = L_o / \Delta t_o. \quad (4.3)$$

Интервалы времени устанавливают в соответствии с расчетными данными, представленными на командном приборе аэрофотоаппарата.

Среднюю скорость движения потока  $v_n$  находят по скоростям движения отдельных автомобилей  $v_i$  и их числу  $n$ :

$$v_n = \sum v_i / n.$$

Интервалы между автомобилями  $\Delta L_i$  устанавливают путем их измерения на аэроснимках  $\Delta l_i$  в масштабе изображения дороги в данном месте (1:m).

$$\Delta L_i = m_i \Delta l_i. \quad (4.4)$$

Для повышения точности таких определений расстояния  $l_o$  и  $l_i$  на фотоснимках получают по измеренным на стереокомпараторах координатам их крайних точек, через приращения координат между изображениями автомобилей на левом и правом аэроснимках  $\Delta x_i$  и  $\Delta y_i$ .

$$\Delta l_i = \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2}. \quad (4.5)$$

Интенсивность движения  $N$  определяют по числу автомобилей на расчетном участке и интервалу времени фотографирования участка  $t_{yn}$ , средней скорости потока автомобилей по участку  $v_a$  и средней скорости движения аэрофотосъемочного самолета или вертолета  $v_c$ . Ее вычисляют по формулам:

– при маршрутной аэрофотосъемке в направлении движения (по попутной полосе)

$$N_n = \frac{nv_a}{t_{yn}(v_c - v_a)}; \quad (4.6)$$

– при маршрутной аэрофотосъемке против направления движения (по встречной полосе)

$$N_B = \frac{nv_a}{t_{\text{уч}}(v_c + v_a)}; \quad (4.7)$$

– при стационарной аэросъемке над заданным местом

$$N = n'/t',$$

где  $n'$  – число автомобилей, прошедших заданный створ;

$t'$  – время съемки.

Плотность потока автомобилей

$$\lambda = \frac{N}{L} = \frac{N}{t_{\text{уч}}(v_c + v_a)} = \frac{nv}{t_{\text{уч}}(v_c \pm v_a)^2}. \quad (4.8)$$

Число обгонов  $\varepsilon$  на единицу длины рассматриваемого участка составляет

$$\varepsilon = \frac{E}{t_{\text{уч}}L_{\text{уч}}}, \quad (4.9)$$

где  $E$  – число обгонов на участке;

$t_{\text{уч}}$  – время стационарной съемки;

$L_{\text{уч}}$  – длина участка.

Масштаб для аэрофотосъемки над заданным местом выбирают таким, чтобы весь участок дороги поместился в кадре аэроснимка.

### **4.3 Организация дорожного движения с помощью аэрофотоснимков**

Специальные автоматизированные системы организации дорожного движения необходимы для его регулирования на новой дороге, проектирования и установки дорожных знаков, создания условий безопасного движения. Для существующих, вновь проектируемых и реконструируемых дорог предусматривают изменение геометрических элементов на опасных участках, где изменяется направление дороги, происходят изменения радиусов кривых, условий видимости и значений продольных уклонов, при сохранении прежних направлений дороги. В качестве исходных данных для автоматизированных систем дорожного движения используют паспорта дороги и паспорта дорожного движения, в которых описывается вся специфика дорожной обстановки и условия движения автомобилей по дороге.

Составление таких паспортов ведут аэрогеодезическими методами и средствами. Сбор для них информации происходит на базе дешифрирования и стереофотограмметрической обработки аэрофотоснимков крупных масштабов в пределах всей притрассовой полосы автомобильной дороги.

Содержание паспорта дорожного движения должно всесторонне характеризовать его технические характеристики, основные параметры и элементы, условия движения транспортных потоков по прямолинейным и криволинейным участкам дороги, по подъемам и спускам, в условиях сложного движения и плохой видимости. В таком паспорте отмечают места живописных ландшафтов, природные условия. В нем также приводят данные о транспортных потоках, траекториях движения автомобилей с привязкой отдельных участков к километровым отметкам дороги. Для такого рода определений необходимы планово-высотная привязка крупномасштабной аэрофотосъемки и задание взаимного перекрытия аэрофотоснимков с учетом скорости движения автомобилей (вдоль и против потока) и специальный расчет скорости аэрофотосъемочного самолета. Кроме этого предусматривают организацию повторных аэрофотосъемок транспортных потоков для более четкой организации движения автомобилей.

В таком паспорте обычно указывают интенсивность движения, пропускную способность отдельных участков дороги и ряд данных об условиях продвижения автомобилей в транспортном потоке и об обстановке в пути.

#### **4.4 Аэрогеодезические работы при паспортизации дорог**

Аэрофотосъемка при инвентаризации и паспортизации автомобильных дорог выполняется в крупных масштабах 1:1000–1:3000. По своим основным параметрам и особенностям она близка к аэрофотосъемке при учете и организации дорожного движения, строительстве и реконструкции инженерных сооружений. Ее выполняют с вертолетов или самолетов, обладающих небольшими скоростями. Полученные аэрофотоснимки дешифрируют с целью сбора различного дуальной информации о дороге, ее элементах и содержании дорожной полосы. Ряд сведений получают по имеющимся топографическим картам и при опросе работников дорожной службы.

Содержание паспорта дороги, точность информации, заполнение по материалам аэрофотосъемки и картам крупного масштаба должны соответствовать требованиям специальной инструкции.

Расчет основных параметров маршрутной аэрофотосъемки при обследовании дороги, изучении транспортных потоков, условий эксплуатации дороги и ее сооружений выполняют в соответствии с заданием на ее производство. Материалы плановой крупномасштабной аэрофотосъемки используют при установке знаков ограничений движения, обустройстве дороги, разметке дорожных полос и расстановке указательных знаков, описании дорожной обстановки и состояния дорожных покрытий

проезжей части, обочин, поверхностей откосов, водоотвода, определении типов автомобилей и степени загруженности дороги. Смещение изображений движущихся автомобилей относительно предметов местности позволяет устанавливать их скорости (при использовании видимых при этом псевдопараллакс), намечать траектории движения по участкам.

Для выполнения фотограмметрических измерений на фотоснимках создают планово-высотное обоснование крупномасштабной аэрофотосъемки. Оно обеспечивает определение всех параметров и размеров дороги, условий ее эксплуатации. В паспорте приводят данные о дорожном движении с оценкой его условий на прямых участках и кривых с малыми радиусами, на подъемах и спусках, имеющих предельные уклоны, а также отмечают смотровые участки с живописными ландшафтами, дорожную обстановку пути и его обустройство, условия движения специальных автомобилей, размеры которых выходят за принятые на дороге габариты и предельные нагрузки.

По аэрофотоснимкам устанавливают рабочие отметки насыпей и выемок, радиусы и длины горизонтальных и вертикальных кривых, величины углов поворота, элементы поперечных профилей, места обслуживания транспортных средств (автовокзалы, остановки, места стоянки автомобилей), путепроводы, транспортные развязки и ответвления, разметку полос движения и др.

#### **4.5 Аэрофотосъемка при строительстве и приемке дорог**

При строительстве инженерных линейных сооружений аэрофотосъемка позволяет установить: состояние строительства по участкам, качество выполненных отделочных работ, объемы произведенных работ, соблюдение размеров элементов и частей земляного полотна, параметры прямых и кривых в плане, рабочие отметки сооружений, заложения откосов, положения бровок полотна, ширину и глубину канав, размеры резервов, кавальеров, положения берм, труб, мостов, нагорных и отводных канав и т. д.

Кроме того, по аэрофотоснимкам устанавливают состояние поверхности корыта, качество основания и обочин, ровность покрытия, его поперечные и продольные уклоны, радиусы вертикальных кривых. При высокой точности фотограмметрических измерений возможно камерально определять объемы строительных работ.

Положение элементов дорожного полотна и их размеры сравнивают с проектными и устанавливают отклонения от проекта. Для этого используют материалы крупномасштабной аэрофотосъемки с вертолетов, которая проводится для определения размеров объектов и объемов работ. Ориентирование аэрофотоснимков на фотограмметрических приборах

целесообразно выполнять по ранее маркированным точкам притрассовой полосы, согласно проектным данным и результатам построения аналитической пространственной фототриангуляции.

В процессе строительства аэрофотосъемка может производиться для оценки качества выполненных строительных работ (допустимости уклонов от проекта), установления новых размеров отдельных элементов земляного полотна и других параметров сооружения, установления размеров объектов и объемов выполненных строительных работ за период между съемками. При определении объемов и качественных характеристик строительных работ обычно требуется высокая точность линейных и особенно высотных фотограмметрических измерений. В соответствии с ними задают параметры аэрофотосъемки. Так например, если требуется, чтобы абсолютные ошибки длин были в пределах 0,05 м, а высот – в пределах 0,01 м, то при измерениях их фотоизображений с точностью 0,01 мм масштаб фотографирования должен быть  $1:m = 0,01:50$ , т. е. крупнее  $1:5000$ , а высота фотографирования с вертолета (при устранении вибрации фотоаппарата через надувную резиновую камеру автоколеса)  $H_0 = \delta hb_0 / \delta \Delta p$ .

Тогда при  $H_0 = 0,01 \cdot 70:0,01 = 70$  м и  $f_k = 70$  мм масштаб таких аэрофотоснимков может быть  $1:m = 1:1000$ . При  $\delta h = 0,05$  м высота полета будет  $H_0 = 350$  м, а масштаб аэрофотоснимков  $1:m = 1:3500$ .

При приемке сооружения в эксплуатацию фотограмметрические работы могут производиться при ориентировании аэрофотоснимков в соответствии с фотограмметрическим планово-высотным обоснованием или по проектным данным законченного строительством земляного полотна и покрытий с контролем прямолинейности бровок и их высотного размещения по ряду поперечных профилей. По результатам измерений фотоснимков определяют качественные показатели строительства, соответствие поперечных уклонов и откосов земляного полотна, обочин, покрытий, рабочих отметок и других элементов сооружения проекту, допустимость колебаний выполненных при строительстве обустройств и их поверхностей запроектированным. Работы ведут в пределах допустимой точности фотограмметрических измерений. На аэрофотоснимках целесообразно сохранять данные по их привязке к геодезической планово-высотной сети. Кроме того, необходимо обеспечить возможность маркировки точек перед каждой крупномасштабной исполнительной аэрофотосъемкой.

Результаты обработки исполнительной аэрофотосъемки прикладывают к акту приемки сооружения в эксплуатацию.

## **5 СПУТНИКОВЫЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ**

### **5.1 Общие сведения о спутниковых навигационных системах**

Спутниковые геодезические измерения выполняют с помощью аппаратуры, работающей по сигналам спутников навигационных систем GPS (*Global Positioning System*, США) и ГЛОНАСС (Глобальная навигационная спутниковая система, Россия). В Европейском союзе ведутся работы по созданию еще одной системы – GNSS-2 "GALILEO". Краткие сведения об этих системах приведены в таблице 5.1.

Спутниковая навигационная система включает подсистему космических аппаратов, подсистему контроля и управления и подсистему аппаратуры потребителей.

Таблица 5.1 – Основные характеристики спутниковых навигационных систем

Основные характеристики	ГЛОНАСС	GPS	GALILEO
Число ИСЗ (резерв)	24 (3)	24 (3)	27 (3)
Число орбитальных плоскостей	3	6	3
Число ИСЗ в орбитальной плоскости	8	4	9
Орбиты	Близкие к круговой		
Высота орбит, км	19100	20145	23200
Наклонение орбит, град.	64,8	55	56
Система координат	ПЗ-90	WGS-84	–

**Подсистема космических аппаратов** состоит из 24 искусственных спутников Земли, обращающихся вокруг Земли по орбитам, близким к круговым, на высоте около 20000 км. У спутников системы GPS период обращения равен половине звездных суток. В любом месте Земли на высоте более 15° над горизонтом одновременно видны от 4 до 8 спутников.

Каждый спутник оснащен измерителем времени – водородным стандартом частоты, генерирующим опорную частоту  $f_0 = 10,23$  МГц с суточной нестабильностью  $10^{-14} - 10^{-15}$ .

Спутник излучает радиосигналы на частотах  $L_1 = 154$ ,  $f_0 = 1575,42$  МГц (длина волны 19 см) и  $L_2 = 120$ ,  $f_0 = 1227,6$  МГц (длина волны 24 см). Сигнал на частоте  $L_1$  модулирован дальномерным кодом свободного доступа *C/A* (от англ. *clear acquisition*), точным кодом *P* (от англ. *precise*) и навигационным сообщением. Частота  $L_2$  модулирована только кодом *P*. Коды представляют собой непрерывно излучаемые, образуемые по определенным алгоритмам синхронизированные псевдослучайные последовательности значений нулей и единиц.

Навигационное сообщение представляет собой файл, включающий следующие данные: коэффициенты полинома для вычисления ошибки часов спутника, элементы орбиты для вычисления пространственных прямоугольных координат спутника, параметры для вычисления ионосферной поправки, приближенные элементы орбит всех спутников и др.

**Подсистема контроля и управления** состоит из главной контрольной станции, станций слежения, управляющих станций. Подсистема предназначена для управления, информационного обеспечения спутников и контроля правильности их функционирования.

*Станции слежения*, наблюдая за движением спутников, выполняют траекторные измерения, результаты которых сообщают на главную контрольную станцию.

На *главной контрольной станции* по данным, полученным со станций слежения, вычисляют прогнозируемые параметры орбит спутников и другие элементы, входящие в текст навигационного сообщения.

*Управляющие станции* загружают подготовленную информацию на спутники.

Подсистема аппаратуры потребителей – это множество средств, выполняющих прием информации со спутников, измерение параметров, связывающих положение аппаратуры пользователя с расположением спутников, и их обработку. В результате обработки получают координаты аппаратуры потребителя и, если требуется, и вектор скорости движения.

Аппаратура, входящая в состав геодезического спутникового приемника (рисунок 5.1), имеет общую массу от 4 до 8 кг, рабочий диапазон температур от  $-20$  до  $+60$ , продолжительность непрерывной работы аккумулятора 6–8 часов. Измерения в геодезии выполняют комплектом, состоящим из двух и более геодезических спутниковых приемников. При этом с высокой точностью определяют разности координат приемников, то есть их положение относительно друг друга.

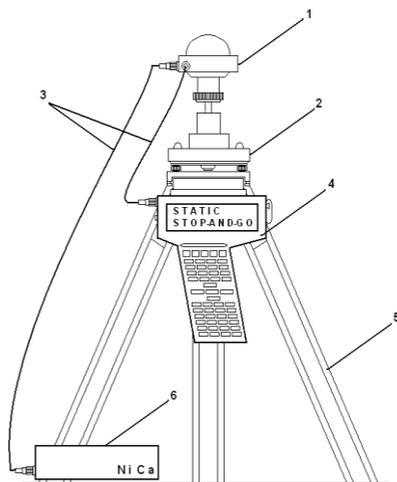


Рисунок 5.1 – Геодезический спутниковый приемник: 1 – приемное устройство; 2 – подставка; 3 – соединительные кабели; 4 – блок управления; 5 – штатив; 6 – аккумулятор

## 5.2 Кодовые и фазовые измерения

**Кодовые измерения.** В приемнике спутниковых сигналов, как и на спутнике, есть датчик частоты и времени, в нем также вырабатываются частоты  $L_1$  и  $L_2$  (в одночастотном приемнике – только  $L_1$ ). Частота  $L_1$  модулируется копиями кодов  $C/A$  и  $P$ , частота  $L_2$  – только кодом  $P$ .

Интервал времени между появлением на приемнике собственного кода и аналогичного кода, пришедшего от спутника, измеряют.

Если бы часы приемника были точно синхронизированы с часами спутника, то формирование кодов на спутнике и в приемнике происходило бы одновременно. В этом случае измеренный интервал времени между появлениями на приемнике собственного кода и кода, пришедшего от спутника, был бы равен времени прохождения сигнала от спутника до приемника, что позволило бы вычислить расстояние до спутника. Однако показания часов спутника и приемника расходятся на некоторую величину, равную  $\delta^s - \delta_p$ , где  $\delta^s$  – ошибка часов спутника,  $\delta_p$  – ошибка часов приемника. Поэтому измеренное расстояние  $R$  существенно отличается от верного и носит название – *псевдорасстояние*.

Допустим, что ионо- и тропосферная задержки сигнала учтены путем введения соответствующих поправок. Тогда измеренное псевдорасстояние  $R_p^s(t)$  от пункта  $p$  до спутника  $s$  в эпоху (момент времени)  $t$  может быть представлено уравнением

$$R_p^s(t) = \sqrt{(X^s(t) - X_p)^2 + (Y^s(t) - Y_p)^2 + (Z^s(t) - Z_p)^2} - c(\delta^s(t) - \delta_p(t)),$$

где  $X^s(t)$ ,  $Y^s(t)$ ,  $Z^s(t)$  – координаты спутника в эпоху  $t$ ;

$X_p$ ,  $Y_p$ ,  $Z_p$  – определяемые координаты приемника;

$c$  – скорость света.

Информация о часах спутника передается в составе навигационного сообщения, что дает возможность вычислить ошибку часов спутника на эпоху  $t$  и учесть ее.

Таким образом, для псевдорасстояния  $R_p^s(t)$  имеем уравнение

$$R_p^s(t) = \sqrt{(X^s(t) - X_p)^2 + (Y^s(t) - Y_p)^2 + (Z^s(t) - Z_p)^2} + c\delta_p(t), \quad (5.1)$$

Неизвестными величинами здесь являются  $X_p$ ,  $Y_p$ ,  $Z_p$ ,  $\delta_p(t)$ . Для определения четырех неизвестных необходимо иметь не менее четырех уравнений, то есть в одну эпоху необходимо измерить псевдорасстояния не менее чем до четырех спутников.

Координаты определяются по результатам кодовых измерений с точностью около 3 м.

Для повышения точности пользуются дифференциальным методом. На контрольном пункте с известными координатами устанавливают приемник спутниковых сигналов и, определив его координаты по спутникам, вычисляют расстояния до спутников. Сравнив эти расстояния с

вычисленными по известным координатам, определяют поправки и по радио сообщают их потребителям. Поправками исправляют псевдорасстояния, измеряемые потребителями, при этом ошибки определения места относительно контрольного пункта не превышают 1 м.

Кодовые измерения применяются при решении задач навигации. В геодезических работах кодовые измерения играют вспомогательную роль – служат для определения приближенных координат пунктов сети.

**Фазовые измерения.** Точные геодезические измерения выполняют на несущих частотах  $L_1$  и  $L_2$  (в одночастотных приемниках – только на частоте  $L_1$ ). При этом измеряют разности фаз между колебаниями, принятыми от спутника, и колебаниями такой же частоты, выработанными в приемнике.

Обозначим:  $\varphi^s(t)$  – фазу частоты  $f$  ( $f = L_1$  или  $f = L_2$ ), поступившей на приемник в эпоху  $t$  от спутника  $s$ ;  $\varphi_p(t)$  – фазу собственной такой же частоты приемника в ту же эпоху.

Для указанных фаз справедливы уравнения:

$$\begin{aligned}\varphi^s(t) &= ft - f \frac{\rho}{c} - f\delta^s, \\ \varphi_p(t) &= ft - f\delta_p.\end{aligned}$$

где  $\rho$  – расстояние от спутника до приемника;

$c$  – скорость света;

$\rho/c$  – время, затраченное на путь сигнала от спутника до приемника;

$\delta^s$  – ошибка часов спутника;

$\delta_p$  – ошибка часов приемника.

Вычитая из первого фазового уравнения второе, получаем фазовое уравнение измеряемой разности  $\Phi_p^s(t)$  :

$$\Phi_p^s(t) = \varphi^s(t) - \varphi_p(t) = f \frac{\rho}{c} - f\delta^s + f\delta_p.$$

Перепишем его так:

$$\Phi_p^s(t) = f \frac{\rho}{c} - f(\delta^s + \delta_p).$$

Умножим уравнение на длину волны  $\lambda$  и учтем, что  $\lambda = cT = c/f$ , где  $T$  – период колебаний:

$$\rho = \lambda \Phi_p^s(t) + c(\delta^s + \delta_p). \quad (5.2)$$

Представим разность фаз  $\Phi_p^s(t)$  в виде суммы двух частей:

$$\Phi_p^s(t) = N + \Phi, \quad (5.3)$$

где  $N$  – целое число периодов, а  $\Phi$  – дробь.

Подставляя выражение (5.3) в (5.2), напишем:

$$\rho = (N + \Phi)\lambda + c(\delta^s - \delta_p). \quad (5.4)$$

Расстояние между спутником и приемником непрерывно изменяется, отчего изменяется и сдвиг по фазе  $N + \Phi$ .

В приемнике спутниковых сигналов предусмотрено измерение непрерывно изменяющейся разности фаз  $\Phi$  и подсчет числа переходов ее через нуль, изменяющих целое число волн в расстоянии. Это число прибавляется к измеряемой величине  $\Phi$ , отчего суммарный сдвиг по фазе оказывается неправильной дробью, а неизвестное число  $N$  остается постоянным для всех расстояний от пункта  $p$  до спутника  $s$ . Определение целого числа  $N$  называется *разрешением* его неоднозначности.

Учитывая изложенное, напомним уравнение измеренного сдвига по фазе сигнала, принятого от спутника  $s$  на пункте  $p$  в эпоху  $t$ :

$$\begin{aligned} \Phi_p^s(t) &= \frac{1}{\lambda} \rho_p^s(t) - N_p^s - f^s [\delta^s(t) - \delta_p(t)], \\ \rho_p^s(t) &= \sqrt{(X^s(t) - X_p)^2 + (Y^s(t) - Y_p)^2 + (Z^s(t) - Z_p)^2}; \\ f^s &= \frac{c}{\lambda} - \text{частота измерения.} \end{aligned} \quad (5.5)$$

Для  $n_s$  спутников,  $n_t$  эпох и одной точки  $p$  число измерений, а значит, и число уравнений (5.5) будет равно  $n_s n_t$ . Неизвестными в такой системе уравнений являются три координаты приемника ( $X_p, Y_p, Z_p$ ), а также  $n_s$  чисел неоднозначности и  $n_t$  смещений часов приемника.

Разности фаз измеряют с высокой точностью, соответствующей долям миллиметра. Однако вычислить решением системы уравнений, составленных по результатам фазовых измерений, координаты приемника с указанной точностью не удастся из-за ошибок орбиты, влияния ионосферы и других причин.

Точность фазовых измерений реализуют, применяя *метод относительного определения положения пунктов*. Результаты одновременных наблюдений одного и того же спутника в двух пунктах содержат значительные, но общие, близкие по величине погрешности. Поэтому разности результатов измерений от них практически свободны и позволяют с высокой точностью определять разности координат  $X, Y, Z$  двух пунктов, то есть трехмерный вектор  $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ , их соединяющий. Следовательно, зная координаты  $X, Y, Z$  одного пункта, можем, определив разности координат  $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$  до другого, вычислить и его координаты.

Фазовые измерения в геодезических работах являются основными, обеспечивая возможность построения геодезических сетей высокой точности.

### 5.3 Режимы и методы спутниковых геодезических измерений

Спутниковая геодезическая аппаратура обеспечивает возможность работы в различных режимах.

В режиме "*Статика*" одновременные измерения на двух или нескольких пунктах выполняются неподвижными приемниками. Один из приемников принимают за базовый. Положение остальных приемников определяется относительно базового. Измерения в режиме "*Статика*" выполняют, как правило, на больших расстояниях между пунктами (свыше 15 км). Время наблюдений зависит от расстояния между пунктами, числа спутников, состояния ионо- и тропосферы, требуемой точности и составляет обычно не менее 1 ч.

Режим "*Быстрая статика*" позволяет сократить продолжительность измерений, благодаря возможности применения на линиях до 15 км активных алгоритмов разрешения неоднозначности. Продолжительность наблюдения в этом режиме составляет 5–20 мин.

Режим "*Реокупация*" используется, когда нет одновременной видимости на необходимое число спутников. Тогда измерения выполняют за несколько сеансов, накапливая нужный объем данных. На этапе компьютерной обработки все данные объединяют для выработки одного решения.

Режим "*Кинематика*" служит для определения координат передвижной станции в ходе ее перемещения. При работе в этом режиме необходимо, чтобы приемники на базовой и передвижной станциях поддерживали непрерывный контакт со спутниками в течение всего времени измерений. До начала движения выполняют инициализацию – разрешение неоднозначности фазовых измерений.

Режим "*Стоя-иди*" – такая разновидность кинематического режима, когда передвижную станцию перемещают с точки на точку, делая на каждой точке остановку и выполняя для повышения точности несколько эпох измерений в течение 5–30 с.

Значения средних квадратических погрешностей определения положения, мм, принято характеризовать формулой

$$m = a + bD,$$

где  $D$  – расстояние между базовым и подвижным приемниками, км.

Значения параметров  $a$  и  $b$  приведены в таблице 5.2.

Возможные схемы построения геодезической сети с помощью спутниковых измерений показаны на рисунке 5.2. Каждая линия на схеме указывает, что на концах линии установлены спутниковые приемники, с помощью которых выполняют синхронные измерения, определяющие приращения координат  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$  по данной линии.

*Таблица 5.2 – Параметры, характеризующие точность определения положения*

Режим измерений	Аппаратура			
	двухчастотная		одночастотная	
	$a$ , мм	$b$ , мм/км	$a$ , мм	$b$ , мм/км
Статика	5	1	10	2
Быстрая статика	5–10	1	10	2
Реокупация	10–20	1	10–20	2
Кинематика	10–20	1	20–30	2
Стой–иди	5–10	1	10–20	2

Геодезическая сеть может быть построена с применением лучевого и сетевого методов.

При *лучевом методе* координаты определяемого пункта получают (рисунок 5.2, *а*), измерив вектор, соединяющий его с опорным пунктом. Для контроля координаты определяют дважды, то есть по результатам измерений, связывающих определяемый пункт с двумя опорными пунктами (рисунок 5.2, *б*).

При *сетевом методе* (рисунок 5.2, *в*) определяемые пункты связывают измерениями не только с опорными пунктами, но и между собой.

Возможны сети, где одну часть пунктов сети определяют сетевым, а другую – лучевым методом.

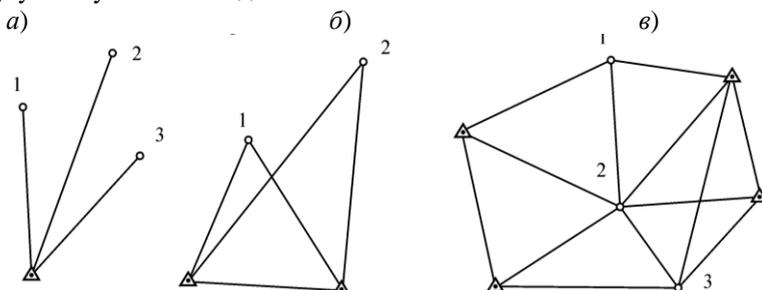


Рисунок 5.2 – Схемы построения спутниковых геодезических сетей:

*а, б* – лучевой метод; *в* – сетевым методом; обозначения:

▲ – опорный пункт; ○ – определяемый пункт; 1, 2, 3 – номера определяемых пунктов

Спутниковые технологии координатных определений имеют существенные преимущества перед традиционными. Им свойственны высокая точность, независимость от погоды и времени суток, оперативность, возможность определения координат при отсутствии взаимной видимости между пунктами. В то же время в закрытой и полужакрытой местности (лес, городские кварталы) применять их довольно трудно. В таких случаях спутниковые методы сочетают с традиционными. При этом возможны такие варианты:

- развитие сети традиционными методами от пунктов, определенных спутниковыми приемниками;

- развитие сети спутниковыми методами от пунктов, определенных традиционными методами;
- ступенчатое развитие сетей, при котором спутниковые и традиционные измерения чередуются.

Для определения координат пунктов с помощью спутниковой аппаратуры выполняют следующие работы:

- *подготовительные*, которые включают составление проекта сети, рекогносцировку и уточнение проекта, закладку центров на определяемых пунктах;
- *измерения*, которые включают развертывание аппаратуры, соединение кабелями ее частей, центрирование и ориентирование антенны, определение высоты антенны, установку карты памяти, ввод названия пункта и высоты антенны, выбор нужного режима измерений, после чего измерения и регистрация результатов выполняются автоматически;
- *обработку результатов измерений* с использованием программных пакетов, прилагаемых к спутниковой аппаратуре.

#### 5.4 Погрешности спутниковых измерений

**Влияние атмосферы.** К числу основных источников погрешностей спутниковых измерений относится неточное знание скорости радиосигнала на пути от спутника к приемнику. Наибольшее влияние на эту скорость оказывает состояние ионосферы – верхних слоев атмосферы, где газ содержит большое число свободных электронов и положительных ионов. Ионизация происходит в основном за счет энергии Солнца. Ионосфера окружает Землю в виде ионизированных слоев, расположенных на высотах от 60–90 до 500–1000 км.

В ионизированной среде показатель преломления для радиодиапазонов, используемых в системах GPS и ГЛОНАСС, зависит от частоты. При этом скорость распространения колебаний одной частоты (фазовая скорость) отличается от скорости распространения результирующей энергии колебаний нескольких близких частот (групповая скорость). Поэтому результаты фазовых и кодовых измерений искажаются различно.

Погрешности псевдорасстояний, вызванные влиянием ионосферы, характеризуются формулами:

$$\delta_{ion(\phi)} = -\operatorname{cosec}v \frac{40,3}{f^2} N_{\Sigma}; \quad \delta_{ion(k)} = \operatorname{cosec}v \frac{40,3}{f^2} N_{\Sigma},$$

где  $\delta_{ion(\phi)}$  – погрешность результата фазовых измерений;

$\delta_{ion(k)}$  – погрешность результата кодовых измерений;

$v$  – угол наклона траектории сигнала;

$N_{\Sigma}$  – количество электронов в вертикальном столбе ионосферы сечением 1 м<sup>2</sup>.

Видим, что ошибки, вызванные ионосферной рефракцией, в фазовых и кодовых измерениях равны по величине, но противоположны по знаку. Измеренные кодовые псевдорасстояния оказываются длиннее, а фазовые – короче геометрических дальностей.

Величина ионосферных ошибок измеренных псевдорасстояний зависит от многих причин (солнечной активности, времени суток, места, направления трассы сигнала) и может иметь значения от 0,15 до 50 м.

Ионосферные ошибки кодовых измерений уменьшаются комбинированием результатов измерений на двух частотах, а в одночастотных приемниках – введением поправок.

Ионосферные ошибки фазовых измерений ослабляют, применяя метод относительных определений. Результаты одновременных фазовых измерений в двух пунктах сигнала одного и того же спутника содержат практически одинаковые погрешности, вызванные влиянием ионосферы. Поэтому разность результатов таких измерений от них практически свободна.

На распространение сигнала влияет также *тропосферная рефракция*, под которой понимают задержку радиосигналов в нейтральных слоях атмосферы – стратосфере и тропосфере, где показатель преломления радиоволн с частотами до 15 ГГц от частоты радиосигнала не зависит и потому одинаков для обеих несущих частот  $L_1$ ,  $L_2$  и кодовых сигналов. Погрешности кодовых и фазовых измерений, вызванные тропосферной рефракцией, характеризуются формулой

$$\delta_{\text{троп}} = 10^{-6} \int_{H_p}^{H_T} \frac{N_T(h)}{\sqrt{1 - \cos^2 \nu_0 \left(\frac{R_3}{R_3 + h}\right)^2}} dh,$$

где  $N_T(h)$  – высотный профиль приведенного показателя преломления  $N_T$  (индекса рефракции);

$H_p$  – высота приемника;

$H_T$  – высота нейтральной атмосферы.

Для расчета тропосферных ошибок пользуются различными аппроксимациями высотного профиля показателя преломления, к числу которых относится, в частности, экспоненциальная модель:

$$N_T(h) = \begin{cases} N_p \exp(-\beta h) & \text{при } h \leq H_t - H_p \\ N_t \exp[-\beta_1(h + H_p - H_t)] & \text{при } h \geq H_t - H_p, \end{cases}$$

где  $N_p$  – значение индекса преломления на высоте приемника  $H_p$ ;

$N_t$  – значение индекса преломления на высоте  $H_t$  – на границе тропо- и стратосферы.

При этом  $H_t = 9000$  м;  $N_t = 105$ ;  $\beta = \ln(N_p/N_t)/(H_t - H_p)$ ;  $\beta_1 = 0,1424 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$ .

Значение индекса преломления у земной поверхности зависит от метеорологических факторов и может быть вычислено по формуле

$$N_p = 77,6 \frac{P}{T} + 3,73 \cdot 10^5 \frac{e}{T^2},$$

где  $P$  – атмосферное давление, мбар;

$T$  – температура, К;

$e$  – парциальное давление водяного пара, мбар.

**Многопутность.** В ряде случаев спутниковым приемником, кроме полезного прямого сигнала, могут быть приняты сигналы, отраженные земной поверхностью или близлежащими объектами (например, зданиями), а также сигналы, обогнувшие вследствие дифракции мелкие предметы. Многопутность приводит к искажению дальностей (рисунок 5.3).

Определим разность хода  $\Delta R$  между отраженным от земной поверхности 2 и прямым 1 лучами. В точках  $A$  и  $B$  расстояние до ИСЗ одинаковы. Тогда

$$\Delta R = AC - BC = AC (1 - \cos 2\alpha) = 2 AC \sin^2 \alpha = 2 h \sin \alpha, \quad (5.6)$$

где  $h$  – высота установки антенны (обычно 1–2,5 м);

$\alpha$  – угол наклона радиолуча.

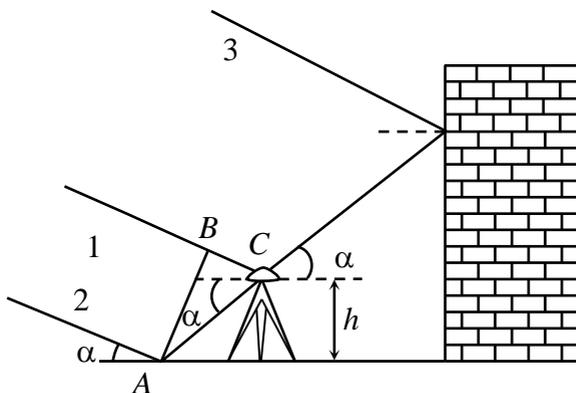


Рисунок 5.3 – Многопутность сигнала:

1 – прямой луч; 2 – луч, отраженный от земли; 3 – луч, отраженный от стены

Анализ формулы (5.6) показывает, что установка антенны возможно ближе к земле позволяет уменьшить влияние сигналов, отраженных от земной поверхности. В предельном случае при  $h = 0$  будем иметь  $\Delta R = 0$ .

Меры по исключению влияния многопутности: установка антенны в местах, где отсутствуют отражающие поверхности; использование антенн,

на которых установлены экраны, отсекающие отраженные от земной поверхности лучи.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1 Инженерная геодезия (с основами геоинформатики): учеб. для вузов ж.-д. трансп. / С. И. Матвеев [и др.]; под ред. С. И. Матвеева. – М. : ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2007. – 555 с.

2 Федоров, В.И. Инженерная аэрогеодезия : учеб. для вузов / В.И. Федоров. – М. : Недра, 1988. – 212 с.

3 Матвеев, С.И. Геоинформационные системы и технологии на железнодорожном транспорте: учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. / С.И Матвеев, В.А. Коугия, В.Я. Цветков, под ред. С И. Матвеева. – М.: УМК МПС России, 2002. – 288 с.

3 Инженерная геодезия: учеб. пособие. Ч II / Е. С. Богомолова[и др.]; под ред. В. А. Коугия. – СПб.: Петербургский гос. ун – т путей сообщения, 2008. – 93 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	3
1 Общие сведения об аэрогеодезии.....	4
1.1 Основные понятия, термины и определения аэрогеодезии. Аэросъемка и ее виды.....	4
2 Аэрокосмические съемки.....	5
2.1 Приборы аэрокосмической съемки.....	5
2.2 Понятие о космической съемке Земли.....	9
2.3 Дешифрирование снимков.....	11
2.4 Искажения снимков.....	14
2.5 Трансформирование снимков.....	15
2.6 Составление фотопланов и фотосхем.....	16
2.7 Составление по снимкам топографических планов.....	17
3 Наземные стереофотограмметрическая и сканерная съемки.....	20
3.1 Наземная стереофотограмметрическая (фототеодолитная) съемка.....	20
3.2 Сканерная съемка.....	23
4 Аэрофотосъемка для организации безопасности дорожного движение.....	25
4.1 Аэрофотосъемка при изучении транспортных потоков.....	25
4.2 Определение по аэрофотоснимкам условий и режима движения автомобилей....	26
4.3 Организация дорожного движения с помощью аэрофотоснимков.....	28
4.4 Аэрогеодезические работы при паспортизации дорог.....	29
4.5 Аэрофотосъемка при строительстве и приемке дорог.....	30
5 Спутниковые геодезические измерения.....	32
5.1 Общие сведения о спутниковых навигационных системах.....	32
5.2 Кодовые и фазовые измерения.....	34
5.3 Режимы и методы спутниковых геодезических измерений.....	37
5.4 Погрешности спутниковых измерений.....	39
Список литературы.....	42

