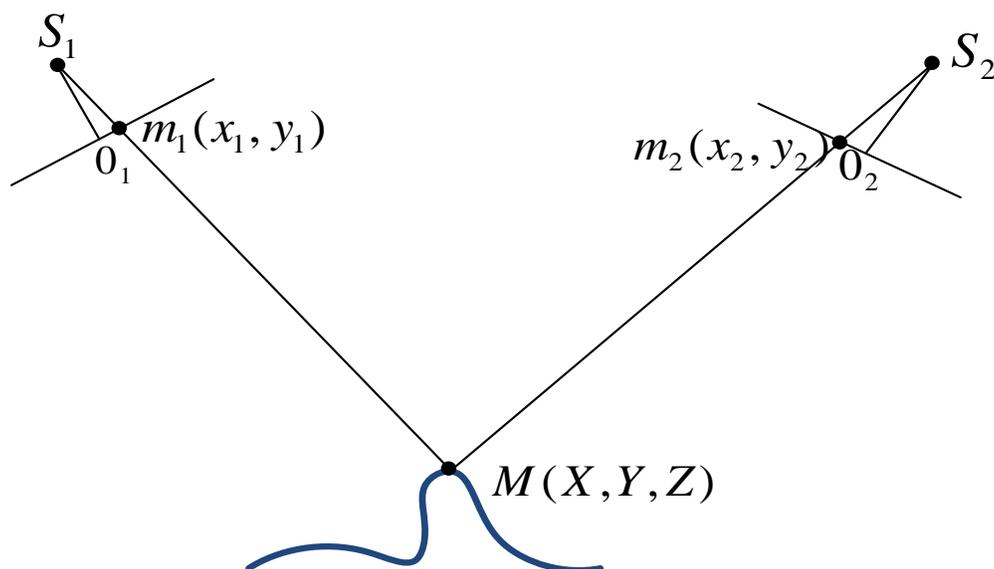


Е. В. Козин

А. Г. Карманов

Н.А. Карманова

## ФОТОГРАММЕТРИЯ



Санкт-Петербург

2019

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ**

**УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

Е. В. Козин

А. Г. Карманов

Н.А. Карманова

**ФОТОГРАММЕТРИЯ**

Учебное пособие

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО  
по направлению подготовки (специальности) 11.04.02 «Инфокоммуникаци-  
онные технологии и системы связи» в качестве учебного пособия для реали-  
зации основных профессиональных образовательных программ высшего об-  
разования магистратуры

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**Санкт-Петербург**

**2019**

Козин Е.В., Карманов А.Г., Карманова Н.А., Фотограмметрия СПб: Университет ИТМО, 2019.- 142с

Рецензенты: Актерский Ю.Е., профессор, д.в.н.

Данное пособие посвящено фотограмметрии, науке, изучающей способы определения пространственного положения, формы и размеров объектов по их фотографическим изображениям, основная задача которой заключается в установлении математической зависимости между координатами объекта на местности и координатами этого же объекта на двух или более снимках.



**Университет ИТМО** – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2019

© Козин Е. В., Карманов А.Г., Карманова Н.А. 2019

## Оглавление

Введение.....	5
1 Введение в фотограмметрию .....	6
2 Съёмка и снимки местности.....	8
3 Сбор и оценивание материалов космической съёмки .....	13
4 Модели основных видов космических камер.....	15
5 Системы координат основных видов космических камер.....	16
6 Элементы центральной проекции снимка .....	20
7 Элементы ориентирования снимка .....	23
8 Зависимость между координатами точек местности и координатами ее изображения на снимке .....	31
9 Обратная засечка (формулы обратной связи) и порядок ее решения.....	33
10 Частные случаи зависимости между координатами точек местности и снимка.....	34
11 Зависимость между координатами соответствующих точек горизонтального и наклонного снимка .....	36
12 Геометрическая сущность масштаба снимка .....	38
13 Геометрические искажения снимков .....	40
14 Искажения снимков, вызываемые физическими факторами.....	48
15 Элементы стереопары снимков .....	54
16 Принципы построения модели местности.....	56
17 Системы координат.....	58
18 Координаты и параллаксы одноименных точек стереопары.....	63
19 Элементы ориентирования пары снимков.....	64
20 Способы определения элементов ориентирования .....	65
21 Определение превышений и высот точек местности .....	72
22 Точность определения превышений по снимкам .....	74
23 Вывод формул прямой фотограмметрической засечки .....	76
24 Основные формулы для стереопары идеальных фотоснимков .....	79
25 Сканирование снимков. Понятие преобразования изображения в цифровую форму .....	80
26 Современные фотограмметрические сканеры .....	88
27 Назначение и сущность трансформируемых снимков .....	90
28 Сущность аналитического способа трансформирования .....	92
29 Геометрические и оптические условия фотомеханического трансформирования снимков .....	93
30 Необходимость и возможность трансформирования снимков холмистой и горной местности.....	97

31 Принцип дифференциального трансформирования (ортотрансформирования) .....	98
32 Назначение и классификация фотограмметрических систем.....	99
33 Теоретические основы фототриангуляции .....	102
34 Аналитическая фототриангуляция .....	104
35 Системы координат, используемые в аналитической фототриангуляции .....	105
36 Предварительные преобразования координат опорных точек и фотограмметрических координат точек сети.....	106
37 Внешнее ориентирование свободной сети и переход к геодезическим координатами.....	107
38 Сущность и теоретические основы многомаршрутной фототриангуляции.....	109
39 Блочная фототриангуляция.....	111
40 Классификация ошибок фототриангуляции.....	112
41 Влияние систематических ошибок на деформацию маршрутной фототриангуляции .....	113
42 Влияние случайных ошибок на точность построения фототриангуляции .....	116
43 Назначение опорных точек и требования к их точности.....	119
44 Требования к обеспечению фототриангуляции опорными точками .....	121
45 Способы получения цифровой информации о рельефе местности .....	122
46 Технология получения цифровой информации о рельефе местности с использованием специальных приборов.....	129
47 Виды цифровых моделей местности.....	131
Заключение .....	141
Контрольные вопросы .....	142
Список литературы .....	143

## ВВЕДЕНИЕ

Настоящее учебное пособие содержит материал, систематизированный по следующим основным темам: съемка и снимки местности; теория одиночного снимка; определение стереопары снимков; системы координат, применяемые в фотограмметрии; основные принципы построения модели местности; прямая и обратная фотограмметрические задачи; точность определения координат, превышений, элементов внешнего и внутреннего ориентирования; сканирование, трансформирование и ортотрансформирование снимков; основы фототриангуляционных процессов; способы и технологии получения цифровой информации о рельефе местности; создание цифровых моделей местности, цифровых карт.

Практически все фотограмметрические измерения, построения с целью создания различных геовидеопродуктов сопряжены с применением ГИС-технологий, поэтому в учебном пособии этим вопросам отводится большое значение.

При разработке пособия использованы современные научные труды известных специалистов в области как классической фотограмметрии, так и цифровых фотограмметрических измерений, учебники и пособия по фотограмметрии, разработанные в разное время сотрудниками высших учебных заведений Министерства Образования Российской Федерации.

# 1 ВВЕДЕНИЕ В ФОТОГРАММЕТРИЮ

Фотограмметрия определяет формы, размеры и положение объектов по их фотографическим изображениям.

**Фотограмметрия** – это "искусство, наука и технология получения достоверной информации о физических объектах и окружающей среде путем процесса записи, измерения и интерпретации фотографических изображений, изображений моделей электромагнитного излучения и других явлений" (ASP 1980).

**Фотограмметрия** («фотос» – свет, «граммас» – запись, «метрас» – изображать) – это наука, изучающая способы определения пространственного положения, формы и размеров объектов по их фотографическим изображениям.

**Основная задача науки** заключается в установлении математической зависимости между координатами объекта на местности и координатами этого же объекта на двух или более снимках (рисунок 1).

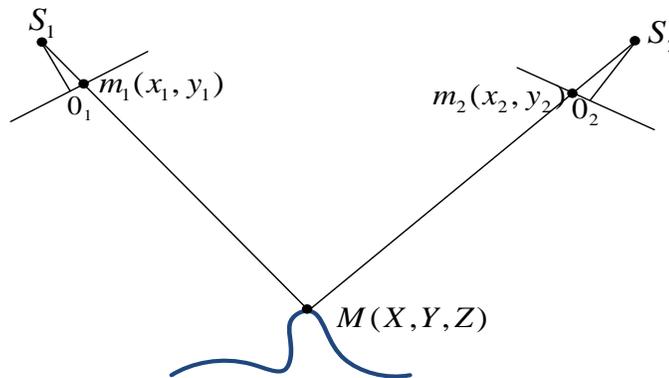


Рисунок 1 Основная задача фотограмметрии

Фотограмметрия была создана в 1851 году Лосседатом и развивалась на протяжении последующих 140 лет. Со временем развитие фотограмметрии прошло через фазы планшетной фотограмметрии, аналоговой фотограмметрии, аналитической фотограмметрии и в настоящее время входит в фазу цифровой фотограмметрии (Копесну 1994).

Традиционное и наиболее широкое применение фотограмметрии – это получение топографической информации (например, топографических карт) по данным аэросъемки. Однако фотограмметрические методы применяются также для обработки спутниковых снимков и других видов снимков, содержащих топографическую или нетопографическую информацию о фотографируемых объектах.

До изобретения аэроплана в фотографиях, полученных с поверхности земли, для установления взаимосвязи между объектами использовались

принципы геометрии. Так было в течение всей фазы планшетной фотограмметрии.

В аналоговой фотограмметрии, начавшейся со стереоизмерений в 1901 году, оптические или механические инструменты использовались для восстановления трехмерной геометрии по двум перекрывающимся снимкам. Главным продуктом в течение этой фазы были топографические карты.

В аналитической фотограмметрии компьютер заменил некоторые дорогие оптические и механические компоненты. В результате прибор представлял собой аналогово-цифровой гибрид. Аналитическая триангуляция, аналитические графопостроители и ортофототрансформаторы были главными достижениями этой фазы. Выходными данными аналитической фотограмметрии могли быть не только топографические карты, но и цифровые продукты, такие как цифровые карты и ЦММ (цифровые модели местности).

**Цифровая фотограмметрия** – это наука, использующая данные, которые хранятся и обрабатываются на компьютере. Цифровые изображения могут быть получены путем сканирования снимков или с помощью цифровых камер.

Многие фотограмметрические задачи в цифровой фотограмметрии имеют высокую степень автоматизации (например, автоматическое получение ЦММ и цифровое ортотрансформирование). Цифровую фотограмметрию иногда называют программной фотограмметрией. Выходные результаты, такие как цифровая модель местности и ортофотографии, представлены в цифровой форме и хранятся на цифровых носителях. Таким образом, облегчается хранение, управление и использование информации для решения различных задач. С развитием цифровой фотограмметрии фотограмметрические методы все теснее интегрируются с дистанционным зондированием и ГИС.

Цифровые фотограмметрические системы применяют сложное программное обеспечение для автоматизации задач, связанных с традиционной фотограмметрией, доводя до минимума ручное управление, необходимое для выполнения фотограмметрических операций. IMAGINE OrthoBASE (tm) является одной из таких фотограмметрических систем.

Фотограмметрия может быть использована для измерения и интерпретации данных, получаемых с фотографий и снимков. Процесс обработки информации, получаемой с фотографии или спутникового изображения, например, создание ЦММ, рассматривает метрическая фотограмметрия. Пояснительная фотограмметрия интерпретирует обработанную информацию, например, интерпретация и выделение дерева различных типов, представленных на фотографии или изображении (Wolf 1983).

## 2 СЪЕМКА И СНИМКИ МЕСТНОСТИ

**Съемкой** называется процесс получения изображения местности и отдельных объектов с летательного аппарата (самолета, вертолета, беспилотного средства, искусственного спутника Земли) с помощью фотоаппарата.

Задачей съемки в военном деле является получение достоверных сведений о противнике и местности по снимкам. Она включает, наряду с самим наблюдением, все работы по подготовке к его выполнению и получению снимков.

**Снимок (фотограмметрический)** – изображение объекта фотограмметрической съемки, зафиксированное на материальном носителе в аналоговом или цифровом виде, используемое для целей фотограмметрической обработки<sup>1</sup>.

### ***Съемка местности и виды снимков***

Съемка подразделяется на различные виды по следующим основным признакам:

#### ***1) по физическому принципу формирования изображения:***

- оптическая, результатом которой является получение оптического изображения объектов местности;
- видовая радиолокационная, в результате которой получают радиогалограммы. Радиогалограммы в дальнейшем синтезируются в электронные изображения.

#### ***2) по диапазону длин волн, в котором ведется наблюдение:***

- в инфракрасном диапазоне;
- в видимом диапазоне;
- в радиодиапазоне.

#### ***3) по методу регистрации и синтезирования изображения:***

- фотографическая;
- оптико-электронная;
- радиолокационная.

#### ***4) по форме мгновенного поля изображения (тип камеры):***

- кадровая;
- щелевая (щелевая, панорамная).

#### ***5) по ориентации оптической оси камеры:***

- плановая;

---

<sup>1</sup> **Примечание.** Изображение, зафиксированное в аналоговом виде, называют аналоговым фотограмметрическим снимком; изображение в цифровом виде - цифровым фотограмметрическим снимком.

– перспективная.

**б) по времени суток:**

– дневная;

– ночная.

В зависимости от вида съемки получают соответствующие виды снимков. Например, в результате плановой съемки получают плановые снимки, при ночном наблюдении – ночные снимки.

Кроме того, воздушное наблюдение подразделяется на *одиночное, маршрутное и площадное* и осуществляется с применением черно-белой, цветной или спектральной пленки.

Одиночное воздушное фотографирование применяется при разведке отдельных небольших объектов (мостов, переправ и т. п.).

Маршрутная съемка (рисунок 2) проводится при разведке объектов, имеющих большую протяженность, таких как дороги, реки, передний край обороны противника. Чтобы не было разрывов в изображении и его можно было рассматривать стереоскопически, маршрутное наблюдение выполняется с перекрытием снимков, которое называется продольным.

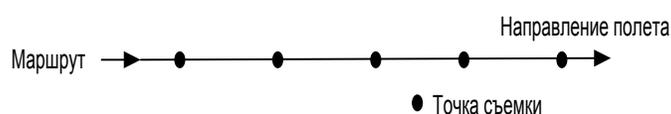


Рисунок 2 – Маршрутная аэрофотосъемка

Как правило, соседние аэрофотоснимки перекрываются между собой не менее чем на половину своего размера, то есть не менее чем на 50%.

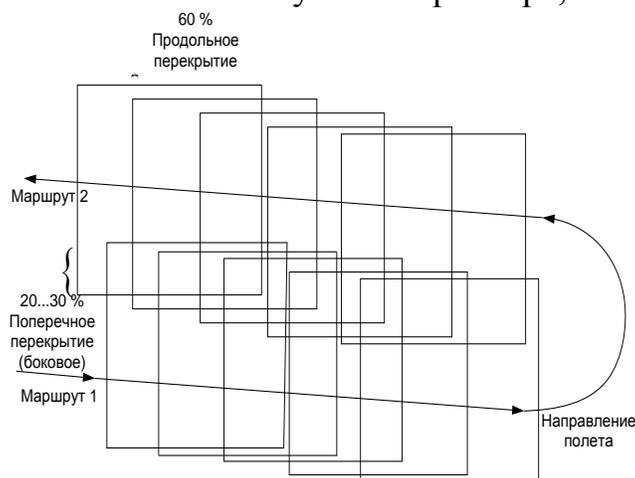


Рисунок 3 – Площадная съемка

Площадное воздушное наблюдение применяется при разведке районов расположения противника, его оборонительных полос. Оно выполняет-

ся проложением ряда параллельных друг другу маршрутов, которые перекрываются между собой. Такое перекрытие называется поперечным. Значение поперечного перекрытия обычно составляет 15–30% от размеров снимков (рисунок 3).

Плановая съемка имеет наиболее широкое распространение. Она выполняется при таком положении камеры, когда его оптическая ось в момент экспонирования совпадает с отвесной линией или отклоняется от нее на небольшой угол, предельное значение которого определяется в зависимости от назначения съемки (рисунок 3). Плановый снимок равнинного или слегка всхолмленного участка представляет собой фотографический план местности, который легко отождествляется с картой. Он позволяет сравнительно точно определять местоположение, конфигурацию и действительные размеры объектов и может быть использован для измерительных целей, так как имеет практически постоянный масштаб.

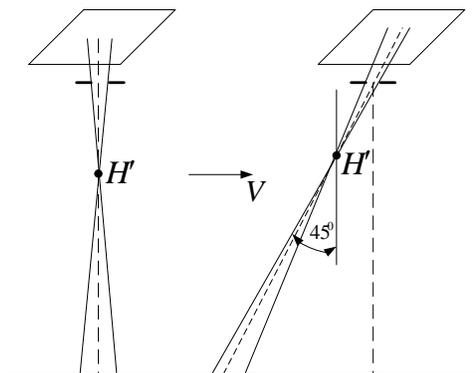


Рисунок 4 – Плановая и перспективная съемка

Перспективная съемка выполняется при установке камеры под углом 45, 60 или 75° к отвесной линии. Таким образом, при плановом наблюдении снимаются участки местности, находящиеся под летательным аппаратом, а при перспективном – главным образом участки, лежащие впереди или в стороне от него.

Масштаб перспективного снимка – переменный: на переднем плане крупный и постепенно уменьшается к заднему плану.

К перспективным обычно относят снимки, на которых на глаз воспринимается перспективность изображения. Они более наглядны и легче читаются, чем плановые, но производить измерения по таким снимкам очень сложно (рисунок 4).

Перспективную съемку применяют при разведке целей, сильно прикрытых средствами ПВО, изучении горных перевалов, маршрутов подхода к объектам противника и в других случаях.

Современные средства наблюдения местности позволяют вести одновременно как плановую, так и перспективную съемку. Она выполняется несколькими сблокированными камерами или одной, помещенной в качающейся установке (рисунок 4).

Щелевая съемка, в отличие от обычной (кадровой), осуществляется специальным щелевой камерой, в котором экспонирование фоточувствительного слоя ведется через узкую, постоянно открытую щель. Скорость перемещения пленки согласуется со скоростью движения летательного аппарата. Таким образом, изображение получается в виде единой ленты без деления на кадры. Щелевое фотографирование может быть плановым или выполняться при отклонении оптической оси от вертикали на  $45^\circ$  в плоскости полета (вперед или назад). При этом получают аксонометрические снимки, на которых объекты просматриваются сверху и с одной из боковых сторон.

Щелевая съемка применяется при слабой освещенности местности, например в сумерках, при больших скоростях полета на малых высотах.

**Панорамная съемка** осуществляется специальным панорамной камерой. Она обеспечивает большой по ширине захват фотографируемой местности (от горизонта до горизонта). Центральная часть панорамного снимка имеет плановое изображение местности, а по краям – перспективное.

Ночная съемка выполняется при искусственном освещении местности с помощью пиротехнических средств (фотобомб, фоторакет, фотопатронов) или электрических осветительных установок. Ночные снимки отличаются от дневных тем, что на них тени от возвышающихся предметов направлены в разные стороны, а на плановых снимках при освещении местности осветительной установкой могут отсутствовать.

Съемка на цветной и спектральной пленках широко применяется при контроле маскировки своих войск и в других случаях. Цветное фотографирование осуществляется на трехслойную пленку. На цветных аэрофотоснимках фотоизображение объектов получается в цветах, близких к натуральным.

Спектральное фотографирование осуществляется одновременно в различных зонах спектра на специальную пленку, имеющую два–три слоя, каждый из которых чувствителен лишь к определенной зоне спектра солнечного света. Краситель каждого слоя подобран таким образом, что на аэрофотоснимке усиливается видимый контраст определенных объектов. Поэтому информационная емкость спектрального снимка по сравнению с черно-белым резко увеличивается. По этим снимкам читаются объекты, замаскированные под цвет окружающей среды, если кривые спектральной отражательной способности краски на объекте и окружающей зе-

лени не совпадают. Несмотря на преимущества цветных и особенно спектрозональных аэрофотоснимков по сравнению с черно-белыми, их использование в разведке ограничено из-за длительности процессов фотолабораторной обработки.

Радиолокационная съемка является в настоящее время всепогодным средством воздушной разведки. Специальная радиолокационная аппаратура бокового обзора позволяет получать на экране электронно-лучевой трубки изображение местности в любое время суток и в любую погоду. С помощью оптической системы изображение на экране проектируется на фотопленку, перемещающуюся со скоростью, пропорциональной скорости летательного аппарата. В результате на фотопленке получается непрерывное (без деления на кадры) радиолокационное изображение полосы местности по направлению полета.

По качеству радиолокационное изображение уступает изображению местности на снимках, полученных с помощью камеры. К тому же оно имеет и специфические искажения, выражающиеся в разномасштабности изображения местности по различным направлениям. Однако радиолокационное изображение, как и фотоснимки, можно привязать к карте, перенести на нее опознанные объекты разведки и определить их координаты.

Виды фотографий и снимков, которые могут быть обработаны с помощью IMAGINE OrthoBASE включают в себя аэроснимки, наземные снимки, короткобазисные и панорамные снимки. Аэросъемка или вертикальная (близкая к вертикальной) съемка производится с точки, расположенной высоко над поверхностью земли. Ось камеры при аэросъемке направлена вертикально (или приблизительно вертикально) вниз. В качестве системы координат для аэрофотографий или снимков обыкновенно используют топографические или планиметрические проекции.

Наземные фотографии и снимки получают с камеры, расположенной близко к земле или установленной на ее поверхности. Наземные и короткобазисные фотографии и снимки обычно используются для задач, связанных с археологией, геоморфологией, гражданским строительством, архитектурой, промышленностью и другими областями.

Цифровые фотограмметрические системы используют цифровые фотографии и изображения в качестве основного источника данных. Цифровые изображения могут быть получены различными способами, которые включают в себя:

- оцифровку имеющихся фотоснимков;
- использование цифровых камер для получения снимков;
- использование сенсоров на борту спутников, таких как Landsat и SPOT.

### 3 СБОР И ОЦЕНИВАНИЕ КАЧЕСТВА МАТЕРИАЛОВ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

Видеоматериалы, получаемые средствами видового наблюдения, обладают разным качеством изображения объектов местности. Поэтому перед фотограмметрической обработкой снимкой проверяют их качество. Качество снимков проверяется в следующем порядке:

1) визуально. Эта проверка заключается в оценивании резкости изображений, наличия изображения координатных меток, сетки крестов, теней от них, недопроявленных полос, повреждений эмульсии и подложки;

2) сенситометрическим методом, который заключается в том, что измеряется фотографическая плотность изображения в самых светлых ( $D_{\min}$ ) и самых темных ( $D_{\max}$ ) его участках и плотность вуали ( $D_0$ ) на специальных приборах (денситометры, микрофотометры).

$$\Delta D = D_{\max} - D_{\min} \cdot \quad (1)$$

Качество изображений оценивается согласно таблице 8.

Таблица 1. **Оценивание качества изображения**

Показатели	Оценка		
	Отлично	Хорошо	Удовлетворительно
Интервал плотностей ( $\Delta D$ )	0,7...0,9	1,0...1,2 или 0,6	1,3 или 0,5
Максимальная плотность ( $D_{\max}$ )	1,2...1,5	1,6...1,7 или 1,1	1,8 или 1,0
Вуаль ( $D_0$ )	До 0,3	До 0,3	До 0,3

Качество изображения оценивается по перекрытию между снимками (таблица 9).

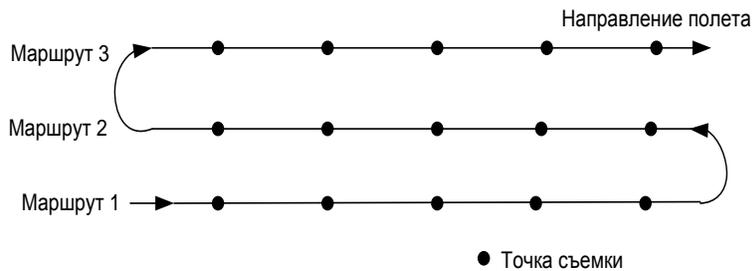
Таблица 2. **Оценивание качества изображения**

Оценка	Допустимое отклонение величины перекрытия от заданного, в %	
	Продольное	Поперечное
Отлично	$\pm 3$	$\pm 10$
Хорошо	$\pm 4$	$\pm 12$
Удовлетворительно	$\pm 5$	$\pm 15$

### *Получение снимков и данных*

В процессе съемки перекрывающиеся изображения получают вдоль направления полета. Большинство фотограмметрических исследований использует именно перекрывающиеся изображения. При использовании больше одного снимка геометрия камеры/сенсора, снимка и подстилающей поверхности может быть определена с высокой точностью и аккуратностью.

В процессе сбора снимков каждая точка на линии полета, в которой камера производит фотографию или сенсор получает снимок, называется точкой фотографирования (рисунок 5).



*Рисунок 5 – Точки фотографирования вдоль направления полета*

Каждая фотография или снимок имеет свой масштаб. Масштаб изображения выражается средним отношением между расстоянием на изображении и расстоянием на земле. Это вычисляется как фокусное расстояние, поделенное на высоту фотографирования над поверхностью земли. Например, при высоте фотографирования 1000 метров и фокусным расстоянием 15 сантиметров, масштаб изображения (МИ) будет  $1:6667^2$ .

Маршрут наблюдения состоит из снимков, полученных вдоль линии полета, с перекрытием 60% (рисунок 6). Для всех снимков в маршруте значение высоты съемки и расстояние между точками наблюдения берется приближенно. Наклон камеры относительно вертикали должен быть минимальным.

Фотографии, полученные с нескольких залетов, могут быть объединены в блок фотографий. Блок фотографий состоит из номеров параллельных маршрутов с боковым перекрытием 20...30% (рисунок 6). Методы блочной триангуляции используют преобразование всех снимков блока и наземных точек в единой системе координат. Обычный блок фотографий это прямоугольный блок, в котором номера фотографий каждого маршрута определены.

---

<sup>2</sup> **Примечание.** Высота фотографирования берется над поверхностью земли, в отличие от превышения над поверхностью моря.

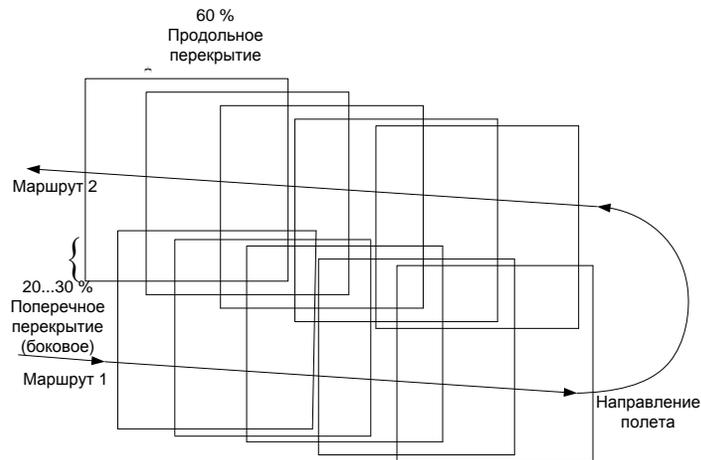


Рисунок 6 – Регулярный прямоугольный блок аэрофотографий

Обычный блок фотографий – это прямоугольный блок, в котором номера фотографий каждого маршрута определены.

Продольное перекрытие – это перекрытие между снимками одного маршрута. Продольное перекрытие ( $p$ ) должно составлять 53–60 %.

Поперечное перекрытие – это перекрытие между снимками соседних маршрутов. Поперечное перекрытие ( $q$ ) должно составлять 15–30 %.

Если  $p < 53$  % и  $q < 15$  %, получается фотограмметрический разрыв. Абсолютный разрыв возникает при условии, когда нет перекрытия между соседними снимками.

#### 4 МОДЕЛИ ОСНОВНЫХ ВИДОВ КОСМИЧЕСКИХ КАМЕР

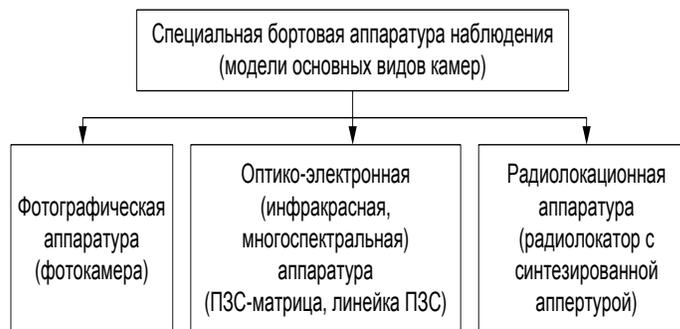


Рисунок 1 – Модели основных видов камер

По геометрии построения изображений модели основных видов космических камер подразделяются на:

- фотографическую аппаратуру;
- оптико-электронную аппаратуру;
- радиолокационную аппаратуру.

## 5 СИСТЕМЫ КООРДИНАТ ОСНОВНЫХ ВИДОВ КОСМИЧЕСКИХ КАМЕР

### *Система координат съёмочной камеры $Sxuz$ для кадровой съёмочной аппаратуры*

Начало координат – в центре проектирования съёмочной камеры  $S$ ; плоскость  $Sxy$  параллельна плоскости снимка. Отрицательное направление оси  $Sz$  совпадает с направлением главной оптической оси съёмочной камеры; ось  $Sy$  направлена влево от направления движения КА и параллельна линии, соединяющей верхнюю и нижнюю координатные метки на прикладной рамке съёмочной камеры. При отсутствии координатных меток ось  $Sy$  определяется с помощью соответствующих калибровочных крестов или иных тест – объектов. Ось  $Sx$  дополняет систему до правой. Положение каждого проектирующего луча в этой системе определяется сферическими координатами  $\alpha_k$  и  $\beta_k$  (рисунок 7).

Точка пересечения перпендикуляра, опущенного из центра проектирования, с плоскостью снимка называется главной точкой и служит началом плоской системы координат снимка  $Oxy$ , оси которой параллельны соответствующим осям системы  $Sxuz$ . Прямая линия, соединяющая верхнюю и нижнюю координатные метки, и перпендикулярен к ней, опущенный из правой координатной метки, образуют систему осей координатных меток  $Ox$  с началом в точке пересечения указанных линий.

Положение главной точки в системе  $Ox'y'$ , определяемое значениями  $\Delta x_0$  и  $\Delta y_0$ , а также расстояние от центра проектирования до плоскости снимка –  $f$  (фокусное расстояние) называют элементами внутреннего ориентирования снимка.

Если системы координат  $Oxy$  и  $Ox'y'$  не совпадают, то

$$\begin{aligned}x &= x' - \Delta x_0 \\y &= y' - \Delta y_0\end{aligned}\tag{2}$$

где  $x, y$  – плоские координаты точек в системе  $Oxy$ ;  $x', y'$  – плоские координаты точек в системе  $O'x'y'$ ;  $\Delta x_0, \Delta y_0$  – координаты главной точки в системе  $O'x'y'$ .

Плоские прямоугольные координаты точек снимка  $x$  и  $y$  связаны со сферическими координатами  $\alpha_k$  и  $\beta_k$  следующим образом:

$$\begin{aligned}x &= f \times \operatorname{tg} \alpha_k \\y &= f \times \operatorname{tg} \beta_k / \cos \alpha_k\end{aligned}\tag{3}$$

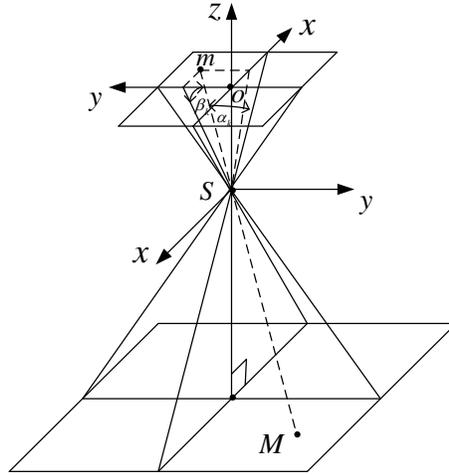


Рисунок 7 – Геометрическая сущность кадровой съемки

Координаты точки на поверхности планеты в системе  $Sxyz$  могут быть получены по значениям спутнико-центрического радиус-вектора луча визирования  $\vec{r}$  от КА до определяемой точки и сферических координат  $\alpha_k$  и  $\beta_k$  этой точки, т.е.

$$\vec{r} = A_{\alpha_k} A_{\beta_k} \vec{r}', \quad (4)$$

где  $\vec{r}$  – вектор луча визирования от КА до определяемой точки в системе координат кадровой камеры, составляющими которого являются пространственные координаты данной точки  $(x_k, y_k, z_k)$  в системе координат кадровой камеры  $Sxyz$ ;  $\vec{r}'$  – единичный вектор луча визирования от КА до определяемой точки в системе координат кадровой камеры  $(0, 0, -r)$ ;

$$[A_{\alpha_k}] = \begin{bmatrix} \cos \alpha_k & 0 & -\sin \alpha_k \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha_k & 0 & \cos \alpha_k \end{bmatrix}; [A_{\beta_k}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta_k & -\sin \beta_k \\ 0 & \sin \beta_k & \cos \beta_k \end{bmatrix};$$

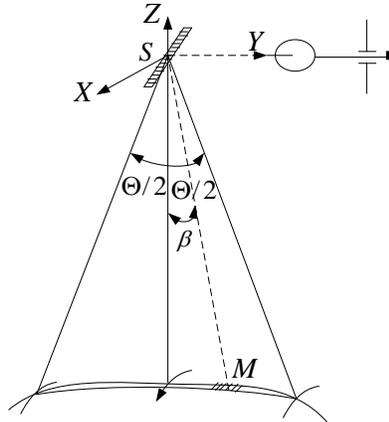
тогда

$$\vec{r} = \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_k & 0 & -\sin \alpha_k \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha_k & 0 & \cos \alpha_k \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta_k & -\sin \beta_k \\ 0 & \sin \beta_k & \cos \beta_k \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \sin \alpha_k \cos \beta_k \\ r \sin \beta_k \\ -r \cos \alpha_k \cos \beta_k \end{bmatrix}.$$

### **Система координат $Sxyz$ для оптико-электронной камеры с линейной разверткой**

Начало координат – в центре проектирования  $S$ , то есть в точке пересечения оптической оси сканера с плоскостью вращения зеркала.



*Рисунок 8 – Геометрическая сущность оптико-электронной съемки*

Отрицательное направление оси  $Sz$  системы совпадает с центральным лучом сканера; ось  $Sx$  совпадает с осью вращения сканирующего зеркала. Ось  $Sx$  направлена в сторону, откуда вращение зеркала осуществляется против часовой стрелки; ось  $Sy$  дополняет систему до правой.

Текущее положение сканирующего луча в момент времени  $t$  в этой системе определяется углом  $\beta$  (рисунок 8).

Координаты точки в системе  $Sxyz$  могут быть получены по значениям расстояния  $r$  от КА до определяемой точки на планете и угла  $P$  сканирующего луча:

$$\vec{r} = A_{\beta} \vec{r}', \tag{6}$$

где  $\vec{r}$  – вектор луча визирования от КА до определяемой точки в системе координат оптико-электронной камеры, составляющими которого являются пространственные координаты данной точки  $(x_k, y_k, z_k)$  в системе координат оптико-электронной камеры  $Sxyz$ ;

$\vec{r}'$  – единичный вектор луча визирования от КА до определяемой точки в системе координат кадровой камеры  $(0, 0, -r)$ ;

$$[A_{\beta_k}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta_k & -\sin \beta_k \\ 0 & \sin \beta_k & \cos \beta_k \end{bmatrix},$$

тогда

$$\begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta & -\sin\beta \\ 0 & \sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ r \sin\beta \\ -r \cos\beta \end{bmatrix}. \quad (7)$$

*При щелевой съемке* положение проектирующего луча в момент времени  $t$  также определяется углом, поэтому все последующие формулы для обработки телевизионных панорам, полученных с помощью сканеров с линейной разверткой, могут быть использованы и при обработке щелевых изображений. При этом, как указывалось выше, следует иметь в виду, что при щелевой съемке одному моменту времени  $t$  будут соответствовать все точки, расположенные на одной строке изображения.

#### **Система координат $Sxyz$ для панорамной съемочной камеры**

Начало координат – в точке  $S$ , центре проектирования камеры; ось  $S_y$  параллельна строкам панорамного снимка и направлена в сторону движения КА; ось  $S_x$  перпендикулярна к строкам снимка и направлена вправо от движения КА; ось  $S_z$  дополняет систему до правой.

Координаты точек в системе  $Sxyz$ , как и для других съемочных камер, могут быть получены по значениям расстояния  $r$  от КА до определяемой точки на местности и углов  $\alpha_n$  и  $\beta_n$  (рисунок 9):

$$\vec{r} = A_{\alpha_n} A_{\beta_n} \vec{r}'. \quad (8)$$

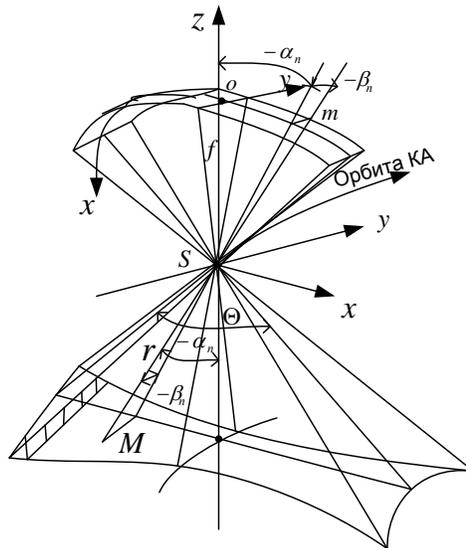


Рисунок 9 – Геометрический принцип панорамной съемки

где  $\vec{r}$  – вектор луча визирования от КА до определяемой точки в системе координат панорамной камеры, составляющими которого являются про-

странственные координаты данной точки  $(x_k, y_k, z_k)$  в системе координат панорамной камеры  $Sxyz$ ;  $\vec{r}'$  – единичный вектор луча визирования от КА до определяемой точки в системе координат панорамной камеры  $(0, 0, -r)$ ;

$$\left[ A_{\alpha_k} \right] = \begin{bmatrix} \cos \alpha_k & 0 & -\sin \alpha_k \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha_k & 0 & \cos \alpha_k \end{bmatrix}, \left[ A_{\beta_k} \right] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta_k & -\sin \beta_k \\ 0 & \sin \beta_k & \cos \beta_k \end{bmatrix},$$

тогда

$$\begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_k & 0 & -\sin \alpha_k \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha_k & 0 & \cos \alpha_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta_k & -\sin \beta_k \\ 0 & \sin \beta_k & \cos \beta_k \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \cdot \sin \alpha_k \cdot \cos \beta_k \\ r \cdot \sin \beta_k \\ -r \cdot \cos \alpha_k \cdot \cos \beta_k \end{bmatrix} \quad (9)$$

При проектировании местности на цилиндрическую поверхность зависимость между координатами  $x$ ,  $y$  и сферическими координатами  $\alpha_n$  и  $\beta_n$  на данный момент времени  $t_i$  имеет следующий вид:

$$\beta_n = \operatorname{arctg} \frac{y}{f}, \quad (10)$$

$$\alpha_n = \frac{360^\circ x}{2\pi f} \approx \frac{x}{0,01745 f}, \quad (11)$$

где  $f$  – фокусное расстояние панорамной камеры.

## 6 ЭЛЕМЕНТЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ПРОЕКЦИИ СНИМКА

При центральном проектировании различают позитивное (прямое) и негативное (обратное) изображения (рисунок 10).

Позитивное изображение, или позитив  $P$ , получается, когда объект и плоскость проекции помещены по одну сторону от центра проекции. Если же объект и плоскость проекции расположены по разные стороны от центра проекции, то образуется негативное изображение, или негатив  $P'$ .

Негатив и позитив располагаются симметрично относительно центра проекции. Для анализа центрального изображения совершенно безразлично, какое изображение рассматривать. В дальнейшем, как правило, будет использоваться позитивное изображение, называемое снимком или картинной плоскостью.

Рассмотрим основные элементы центральной проекции (рисунок 10). Кадровый снимок представляет собой центральную проекцию<sup>3</sup> участка земной поверхности.

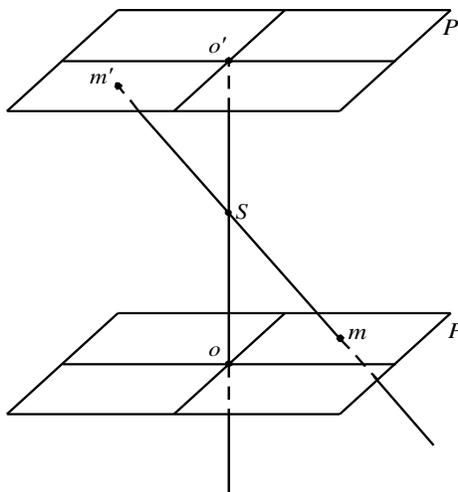


Рисунок 10 – Позитивное и негативное изображения

Центральной проекцией называется проекция, в которой проектирование предметов производится проектирующими лучами, сходящимися в одной точке (центре проекции –  $S$ ).

Изображение предметов, полученное методом центрального проектирования на плоскость, называется линейной перспективой.

На рисунке 2 представлены основные элементы центральной проекции, где  $T$  – плоскость основания (плоский горизонтальный участок местности);  $P$  – картинная плоскость, в которой находится снимок;

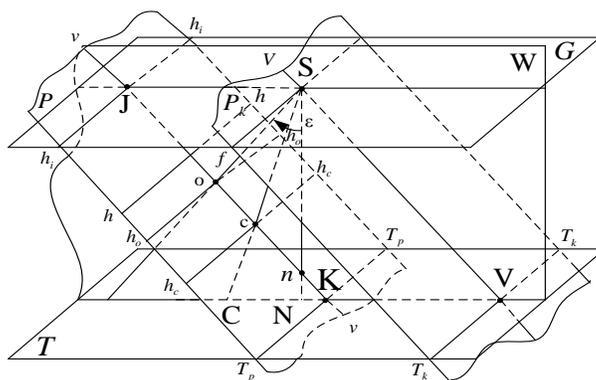


Рисунок 11 – Основные элементы центральной проекции

<sup>3</sup> **Проекцией** называется изображение предметов пространства на какой-либо поверхности, полученное по определенному закону.

$S$  – центр проекции (точка съемки местности);

$S_0$  – главный луч – прямая, проходящая через центр проекции перпендикулярно к плоскости снимка. С главным лучом совмещают главную оптическую ось объектива. Поэтому прямую  $S_0$  называют **оптической осью**;

$SN=H$  – высота съемки – высота центра проекции относительно плоскости основания;

$O$  – главная точка снимка – пересечение главного луча со снимком;

$f$  – фокусное расстояние камеры ( $f = SO$ ) – расстояние от центра проекции до снимка вдоль главного луча;

$SN$  – надирный луч (отвесная линия, проведенная из центра проекции к земной поверхности, равна высоте съемки  $H$ );

$N$  – основание высоты фотографирования;

$n$  – точка надира – пересечение отвесной линии, проходящей через центр проекции, с плоскостью снимка;

$\varepsilon$  – угол наклона снимка (это угол между надирным и главным лучами);

$T_P T_P$  – линия основания картины – пересечение плоскости основания с плоскостью снимка;

$W$  – плоскость главного вертикала – вертикальная плоскость, проходящая через главный луч;

$VV$  – главная вертикаль – пересечение плоскости главного вертикала с плоскостью снимка;

$VV$  – линия направления съемки – пересечение плоскости главного вертикала с плоскостью основания;

$c$  – точка нулевых искажений – пересечение биссектрисы угла  $\varepsilon$  с плоскостью снимка. Такое название эта точка получила потому, что углы в ней равны соответствующим углам в плоскости основания и масштаб снимка в этой точке по всем направлениям имеет постоянное значение;

$G$  – плоскость истинного (действительного) горизонта – горизонтальная плоскость, проходящая через центр проекции;  $h_i h_i$  – линия истинного горизонта – пересечение плоскости действительного горизонта с плоскостью снимка;

$J$  – главная точка схода лучей – пересечение горизонтальной прямой, проходящей через центр проекции в плоскости главного вертикала, с линией действительного горизонта;

$hh$  – горизонталь;

$h_0 h_0$  – главная горизонталь – прямая на снимке, проходящая через главную точку и перпендикулярная главной вертикали;

$h_c h_c$  – горизонталь неискаженного масштаба;

$Pk$  – плоскость картинного горизонта;  
 $T_K T_K$  – линия картинного горизонта;  
 $K$  – главная точка схода картинного горизонта;  
 $SJK$  – предельный параллелограмм.

Из рисунка 11 можно получить следующие выражения, определяющие расстояния между точками центральной проекции:

$$\begin{cases} on = f \operatorname{tg} \varepsilon, oJ = f \operatorname{ctg} \varepsilon, \\ SJ = \frac{f}{\sin \varepsilon}, oc = f \operatorname{tg} \frac{\varepsilon}{2}. \end{cases} \quad (12)$$

## 7 ЭЛЕМЕНТЫ ОРИЕНТИРОВАНИЯ СНИМКА

Для определения снимка в пространстве в момент съемки необходимо знать установочные линейные и угловые величины.

### 7.1 Внутреннее ориентирование снимка

Внутреннее ориентирование определяет внутреннюю геометрию камеры или сенсора на момент съемки. Процесс внутреннего ориентирования заключается в нахождении элементов, определяющих положение снимка. Внутреннее ориентирование главным образом используется для преобразования файловой или других систем координат снимка в систему пространственных координат снимка.

Рисунок 4 показывает элементы, определяющие положение снимка внутри камеры, где  $O_1$  – центр снимка (начало системы координат);

$O$  – главная точка снимка (основание перпендикуляра);

$m$  – точка на изображении;

1, 2, 3, 4 – координатные метки снимка;

$O_1xy$  – система координат снимка;

$So$  – фокусное расстояние ( $f$ ) камеры (сенсора);

Несовпадение точек  $o_1$  и  $o$  при сборке и юстировке камеры дает координаты  $x_0, y_0$ . **Величины  $x_0, y_0, f_k$  называются элементами внутреннего ориентирования снимка, которые определяют положение точки  $S$  – центра проекции (объектив) относительно  $P$  – плоскости снимка.**

Величины  $x_0, y_0, f_k$  определяют лабораторным путем с высокой точностью при калибровке прибора (камеры) и записывают в паспорт камеры. Также в паспорт камеры записывают величину дисторсии  $\delta$ , равную порядка 5–10 мкм.

Таким образом, внутренняя геометрия камеры определяется следующими элементами:

- главной точкой;
- фокусным расстоянием;
- координатными метками;
- дисторсией объектива.

**Главная точка и фокусное расстояние.** Главная точка математически определяется как пересечение перпендикуляра, проходящего через центр проекции, и плоскости снимка. Расстояние от главной точки до центра проекции называется фокусным расстоянием  $f$ .

Плоскость снимка обычно определяется как фокальная плоскость.

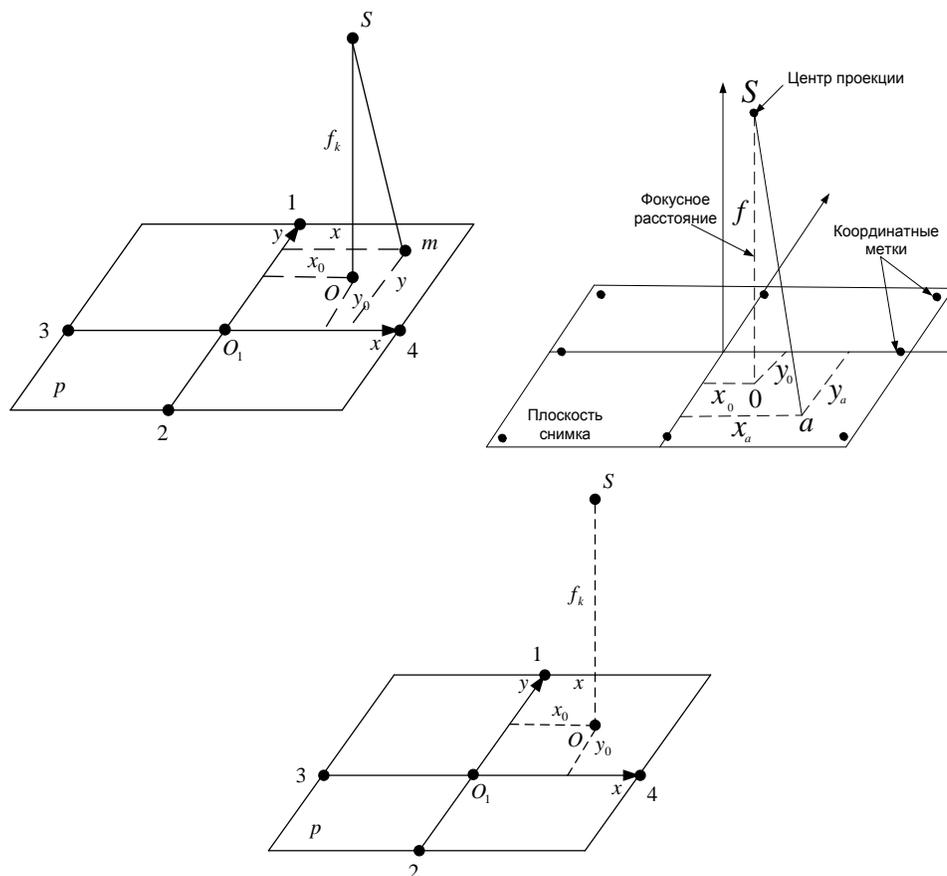


Рисунок 12 – Элементы внутреннего ориентирования

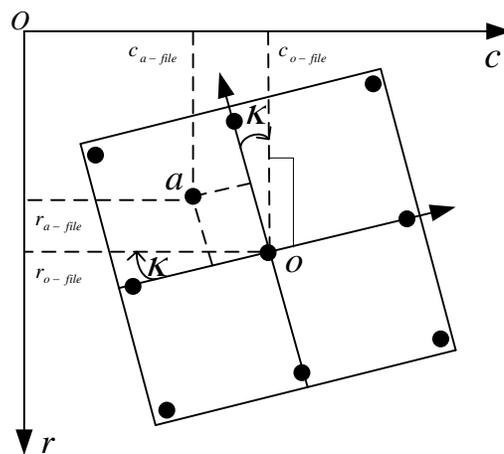
Для широкоформатных аэрофотокамер фокусное расстояние примерно равно 152 мм или 6 дюймам. Для некоторых цифровых камер оно составляет 28 мм. Основной задачей при проведении фотограмметрических работ является точное определение или калибровка фокусного расстояния метрической камеры, которое проводится в лабораторных условиях.

Основой триангуляции является математическое определение параметров, но найти действительное положение главной точки трудно. Главная точка находится в месте пересечения оптических осей на плоскости

снимка. В лабораторных условиях она калибруется в двух формах: главная точка автоколлимации и главная точка симметрии, что можно определить по паспорту камеры. В большинстве решений используется главная точка симметрии, так как с ее помощью можно добиться наилучшей компенсации дисторсии объектива.

**Координатные метки.** Как указано выше, один из этапов внутреннего ориентирования включает в себя определение положения главной точки для каждого снимка в проекте. Таким образом, на снимке измеряются положения координатных меток, которые затем сравниваются с калибровочными координатами каждой метки.

Так как для каждого снимка система пространственных координат пока еще не определена, измеренные координатные метки связаны с пиксельной или файловой системой координат. Файловая система координат имеет координаты  $r$  (столбцы) и  $c$  (строки). Центр файловой системы координат находится в левом верхнем углу изображения и имеет значения строки и столбца равными 0 и 0, соответственно. Рисунок 13 показывает различие между файловой системой координат и системой пространственных координат.



*Рисунок 13 – Файловая система координат и пространственная система координат снимка*

Используя двумерное аффинное<sup>4</sup> преобразование, определяют связи между файловой системой координат и системой пространственных координат снимка. С помощью двумерного аффинного преобразования могут

<sup>4</sup> **Аффинное преобразование** заключается в искусственной деформации получаемого на экране изображения путем введения децентраций (поправочных коэффициентов), при помощи специального программного обеспечения.

быть определены коэффициенты, требующиеся для перевода файловых координат в координаты снимка:

$$\begin{aligned}x &= a_1 + a_2 \cdot r + a_3 \cdot c, \\y &= b_1 + b_2 \cdot r + b_3 \cdot c.\end{aligned}\tag{13}$$

Здесь  $x$  и  $y$  являются координатами калиброванных координатных меток в системе координат снимка,  $r$  и  $c$  – это файловые координаты измеренных координатных меток, все эти координаты используются для определения шести коэффициентов аффинного преобразования. Полученные коэффициенты могут быть использованы для преобразования каждой строки  $c$  и каждого столбца  $r$  файловых координат в координаты изображения.

Качество аффинного преобразования определяет среднеквадратическая ошибка (СКО). СКО показывает степень соответствия между калибровочными координатными метками и значениями измеренных координат снимка для этих меток. Большая среднеквадратическая ошибка служит показателем слабого соответствия. Это может быть признаком деформации снимка, низкого качества сканирования, неверной калибровочной информации или неточных измерений.

Аффинное преобразование определяет перенос начала файловой системы координат в начало системы координат снимка ( $r_0$  – file и  $c_0$  – file). Также аффинное преобразование определяет угол  $\Theta$  (рисунок 13). В процессе сканирования аэрофотографии ее изображение обычно повернуто должным образом.

Угол отклонения между осями  $r$  и  $c$  определяется как неортогональный. Двумерное аффинное преобразование учитывает степень этой неортогональности. Также, в процессе аффинного преобразования учитывается различие масштабов между осями  $r$  и  $c$ .

## 7.2 Внешнее ориентирование снимка

Внешнее ориентирование определяет положение и угловую ориентацию снимка. Переменные, характеризующие положение и ориентацию снимка, называются элементами внешнего ориентирования. Элементы внешнего ориентирования определяют параметры снимка на момент съемки. Линейными элементами внешнего ориентирования являются  $X_s$ ,  $Y_s$  и  $Z_s$ . Они задают положение центра проекции ( $S$ ) относительно наземной системы координат ( $X$ ,  $Y$  и  $Z$ ). Координата  $Z_s$  обычно определяет высоту камеры над уровнем моря, которая задается датумом.

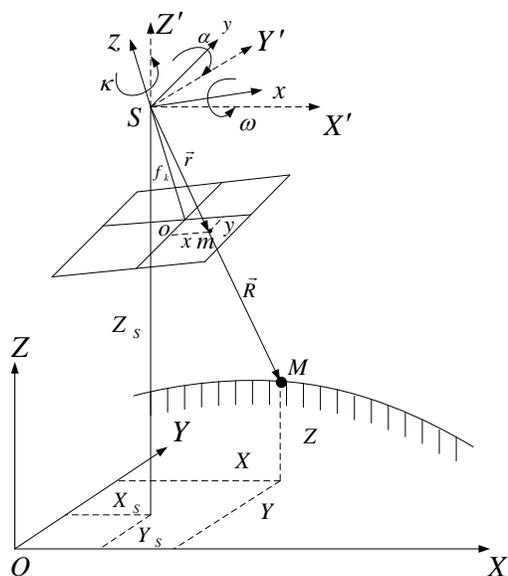


Рисунок 14 – Элементы внешнего ориентирования

Угловые элементы внешнего ориентирования характеризуют соотношение между наземной системой координат  $(X, Y$  и  $Z)$  и системой пространственных координат точек изображения  $(x, y, z)$ . Для определения углового ориентирования обычно используются три угла поворота альфа ( $\alpha$ ), омега ( $\omega$ ) и каппа ( $\kappa$ ). Рисунок 14 показывает элементы внешнего ориентирования. Угол  $\alpha$  определяет поворот оси фотографирования  $X'$ , угол  $\omega$  определяет поворот оси фотографирования  $Y'$ , и угол  $\kappa$  определяет поворот оси фотографирования  $Z'$  (рисунок 15).

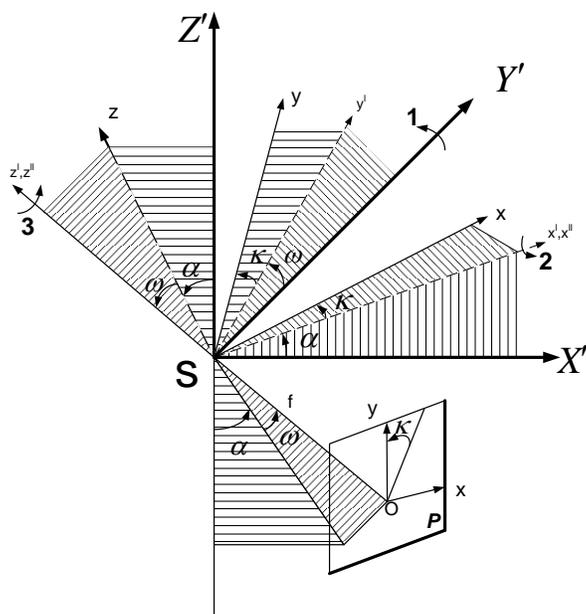


Рисунок 15 – Определение направляющих косинусов

Эти повороты являются положительными, когда они производятся против часовой стрелки, если смотреть из положительного конца соответствующей оси. Для определения порядка и направления поворота трех углов используются различные условия (Yang, 1990). Рекомендуется использовать условие  $\alpha, \omega, \kappa$ . Ось фотографирования  $Z$  совпадает с оптической осью (фокусным расстоянием). Координаты  $X', Y',$  и  $X'$  параллельны системе пространственных координат Земли.

Используя три угла поворота, можно установить соотношение между системой пространственных координат снимка ( $X', Y',$  и  $X'$ ) и системой пространственных координат Земли ( $X, Y$  и  $Z$  или  $X', Y',$  и  $X'$ ). Связь между этими системами определяет матрица  $A$  размером  $3 \times 3$ . Матрица  $A$  называется матрицей перехода. Эта матрица может быть определена следующим образом:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Матрица поворота получается путем последовательного поворота на углы  $\alpha$  вокруг оси  $x$ ,  $\omega$  вокруг оси  $y$  и  $\kappa$  вокруг оси  $z$ .

### 7.3 Определение направляющих косинусов

Направляющие косинусы являются функциями угловых элементов внешнего ориентирования снимка:  $\varepsilon, t, \varpi$ . Эти элементы представляют собой углы Эйлера. Рассмотрим преобразование системы координат  $SXYZ$  в  $Sx'y'z'$ . Это осуществляется с помощью трех разворотов:

1) первый разворот осуществляется вокруг оси  $Z$  на дирекционный угол  $t$ . Получаем систему координат  $S_{x'y'z'}$  (рисунок 7). Матрица углов между осями данных систем координат представлена в таблице 10.

Таблица 3 Матрица углов между осями

Оси	$x'$	$y'$	$z'$
$X$	$t$	$\pi/2 + t$	$\pi/2$
$Y$	$\pi/2 - t$	$t$	$\pi/2$
$Z$	$\pi/2$	$\pi/2$	$0$

Таблице соответствует следующая матрица направляющих косинусов:

$$A_t = \begin{pmatrix} \cos t & -\sin t & 0 \\ \sin t & \cos t & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

2) второй разворот осуществляется вокруг оси  $y'$  на угол разворота снимка  $\varepsilon$ . Получаем координатную систему  $S_{x''y''z''}$ . Данному развороту соответствует следующая таблица углов и матрица направляющих косинусов:

Таблица 4 Углы и матрица направляющих косинусов

Оси	$x''$	$y''$	$z''$
$x'$	$\varepsilon$	$\pi/2$	$\pi/2+\varepsilon$
$y'$	$\pi/2$	0	$\pi/2$
$z'$	$\pi/2-\varepsilon$	$\pi/2$	$\varepsilon$

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

3) третий разворот осуществляется вокруг оси  $z''$  на угол разворота снимка  $\varpi$ . Получаем систему координат  $S_{xyz}$ . Данному развороту соответствует следующая таблица углов и матрица направляющих косинусов:

Таблица 5 Углы и матрица направляющих косинусов

Оси	$x$	$y$	$z$
$x''$	$\varpi$	$\pi/2+\varpi$	$\pi/2$
$y''$	$\pi/2-\varpi$	$\varpi$	$\pi/2$
$z''$	$\pi/2$	$\pi/2$	0

$$A_\varpi = \begin{pmatrix} \cos \varpi & -\sin \varpi & 0 \\ \sin \varpi & \cos \varpi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (15)$$

Матрица  $A$  пересчета координат точки  $m(x, y, z)$  в пространственные координаты  $X', Y', Z'$  получается как произведение матриц отдельных поворотов:

$$A = A_t A_\varepsilon A_\varpi, \quad (16)$$

элементы которой равны:

$$\left. \begin{aligned}
a_1 &= \cos t \cos \varepsilon \cos \varpi - \sin t \sin \varpi, \\
a_2 &= -\cos t \cos \varepsilon \sin \varpi - \sin t \cos \varpi, \\
a_3 &= -\cos t \sin \varepsilon, \\
b_1 &= \sin t \cos \varepsilon \cos \varpi + \cos t \sin \varpi, \\
b_2 &= -\sin t \cos \varepsilon \sin \varpi + \cos t \cos \varpi, \\
b_3 &= -\sin t \sin \varepsilon, \\
c_1 &= \sin \varepsilon \cos \varpi, \\
c_2 &= -\sin \varepsilon \sin \varpi, \\
c_3 &= \cos \varepsilon.
\end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Если направляющие косинусы известны, то угловые элементы внешнего ориентирования находятся по формулам:

$$\operatorname{tg} t = b_3 / a_3, \quad \cos \varepsilon = c_3, \quad \operatorname{tg} \varpi = -c_2 / c_1. \quad (18)$$

Аналогичным образом можно получить формулы для направляющих косинусов и для второй системы угловых элементов внешнего ориентирования: продольного угла наклона снимка  $\alpha$ , поперечного угла наклона снимка  $\omega$  и угла поворота снимка  $\kappa$ . В этом случае матрица  $A = A_\alpha A_\omega A_\kappa$  будет иметь следующие элементы:

$$\left. \begin{aligned}
a_1 &= \cos \alpha \cos \kappa - \sin \alpha \sin \omega \sin \kappa, \\
a_2 &= -\cos \alpha \sin \kappa - \sin \alpha \sin \omega \cos \kappa, \\
a_3 &= -\sin \alpha \cos \omega, \\
b_1 &= \cos \omega \sin \kappa, \\
b_2 &= \cos \omega \cos \kappa, \\
b_3 &= -\sin \omega, \\
c_1 &= \sin \alpha \cos \kappa + \cos \alpha \sin \omega \sin \kappa, \\
c_2 &= -\sin \alpha \sin \kappa + \cos \alpha \sin \omega \cos \kappa, \\
c_3 &= \cos \alpha \cos \omega.
\end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Угловые элементы внешнего ориентирования находятся по направляющим косинусам по следующим формулам:

$$\operatorname{tg} \alpha = -a_3 / c_3, \quad \sin \omega = -b_3, \quad \operatorname{tg} \kappa = b_1 / b_2. \quad (20)$$

## 8 ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ КООРДИНАТАМИ ТОЧЕК МЕСТНОСТИ И КООРДИНАТАМИ ЕЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ НА СНИМКЕ

При выводе формул зависимости координат точки местности и снимка необходимо определить соотношения между камерой/сенсором, снимком и земной поверхностью.

Большинство фотограмметрических задач используют следующие формулы в том или ином виде:

$$\left. \begin{aligned} X' &= a_1(x - x_0) + a_2(y - y_0) - a_3f \\ Y' &= b_1(x - x_0) + b_2(y - y_0) - b_3f \\ Z' &= c_1(x - x_0) + c_2(y - y_0) - c_3f \end{aligned} \right\}, \quad (21)$$

где  $m(X', Y', Z')$  – пространственные фотограмметрические координаты точки  $m$  снимка;

$x_0, y_0, f_0$  – элементы внутреннего ориентирования снимка;

$x, y$  – плоские прямоугольные координаты точки на снимке;

$a_i, b_i, c_i$  – значения направляющих косинусов углов луча визирования на точку  $M$  на местности;

$f$  – фокусное расстояние камеры прибора.

$$a_1 = \cos \alpha \cdot \cos \kappa - \sin \alpha \cdot \sin \omega \cdot \sin \kappa,$$

$$a_2 = -\cos \alpha \cdot \sin \kappa - \sin \alpha \cdot \sin \omega \cdot \cos \kappa,$$

$$a_3 = -\sin \alpha \cdot \cos \omega,$$

$$b_1 = \cos \omega \cdot \sin \kappa,$$

$$b_2 = \cos \omega \cdot \cos \kappa, \quad (22)$$

$$b_3 = -\sin \omega,$$

$$c_1 = \sin \alpha \cdot \cos \kappa + \cos \alpha \cdot \sin \omega \cdot \sin \kappa,$$

$$c_2 = -\sin \alpha \cdot \sin \kappa + \cos \alpha \cdot \sin \omega \cdot \cos \kappa,$$

$$c_3 = \cos \alpha \cdot \cos \omega.$$

Из рисунка 1 видно, что вектор  $\vec{r}_m$  на снимке может быть определен как вектор, проведенный из точки фотографирования  $S$  в точку снимка  $m$ . Вектор  $\vec{R}_M$  на поверхности земли или объекта может быть определен как вектор, проведенный из точки фотографирования  $S$  в точку на поверхности  $M$ . Вектора на изображении  $\vec{r}_m$  и на поверхности  $\vec{R}_M$  **коллинеарны** если один из них является скалярным кратным по отношению к другому. Это

логически вытекает из того, что линия, проходящая через точку фотографирования и точку на снимке или поверхности, является прямой.

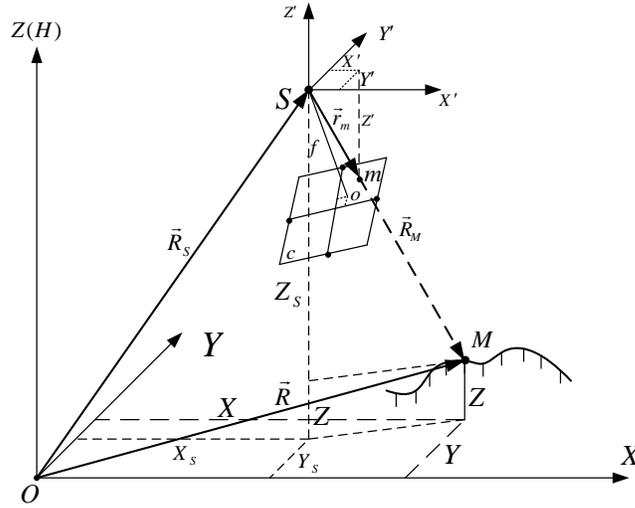


Рисунок 16 – Зависимость между координатами точки местности и снимка

Предположим, что даны пространственные фотограмметрические координаты точки снимка  $m(X', Y', Z')$ . Необходимо найти пространственные координаты точки на местности.

$$\vec{SM} = \vec{R}_M = \vec{R} - \vec{R}_S. \quad (23)$$

$$\vec{r}_m \{X', Y', Z'\} -$$

координаты точки m в системе координат  $Sx'y'z'$ ;

$$\vec{R}_M \{X - X_s, Y - Y_s, Z - Z_s\};$$

$$\vec{r}_m = N \cdot \vec{R}_M \quad (24)$$

$$N = \frac{X'}{X - X_s} = \frac{Y'}{Y - Y_s} = \frac{Z'}{Z - Z_s} \quad (25)$$

$$\frac{X'}{X - X_s} = \frac{Z'}{Z - Z_s}, \quad (26)$$

$$\frac{Y'}{Y - Y_s} = \frac{Z'}{Z - Z_s} \quad (27)$$

$$X - X_s = (Z - Z_s) \cdot \frac{X'}{Z'},$$

$$Y - Y_s = (Z - Z_s) \cdot \frac{Y'}{Z'} \quad (28)$$

$$X = X_s + (Z - Z_s) \cdot \frac{X'}{Z'},$$

$$\begin{aligned}
X &= X_s + (Z - Z_s) \cdot \frac{a_1 \cdot (x - x_0) + a_2 \cdot (y - y_0) - a_3 \cdot f}{c_1 \cdot (x - x_0) + c_2 \cdot (y - y_0) - c_3 \cdot f}, \\
Y &= Y_s + (Z - Z_s) \cdot \frac{b_1 \cdot (x - x_0) + b_2 \cdot (y - y_0) - b_3 \cdot f}{c_1 \cdot (x - x_0) + c_2 \cdot (y - y_0) - c_3 \cdot f}
\end{aligned}
\tag{29}$$

Формулы – строгие, точные и пригодные для любых снимков с точностными параметрами. В представленных формулах в двух уравнениях имеются три неизвестных ( $X, Y, Z$ ). Координату  $Z$  можно не учитывать при обработке снимков на плоские и всхолмленные районы. Однако, один снимок позволяет составить для каждой изобразившейся на нем точке два уравнения с тремя неизвестными координатами ( $X, Y, Z$ ), а этого недостаточно для определения пространственного положения объекта на местности.

## 9 ОБРАТНАЯ ЗАСЕЧКА (ФОРМУЛЫ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ) И ПОРЯДОК ЕЕ РЕШЕНИЯ

**Обратная засечка** – это метод определения элементов внешнего ориентирования ( $X_s, Y_s, Z_s, \alpha, \omega, \kappa$ ) одного или нескольких снимков по известным координатам опорных точек. Обратная засечка основана на условии коллинеарности:

$$\begin{aligned}
x - x_0 &= -f \cdot \left[ \frac{a_1 \cdot (X - X_s) + b_1 \cdot (Y - Y_s) + c_1 \cdot (Z - Z_s)}{a_3 \cdot (X - X_s) + b_3 \cdot (Y - Y_s) + c_3 \cdot (Z - Z_s)} \right], \\
y - y_0 &= -f \cdot \left[ \frac{a_2 \cdot (X - X_s) + b_2 \cdot (Y - Y_s) + c_2 \cdot (Z - Z_s)}{a_3 \cdot (X - X_s) + b_3 \cdot (Y - Y_s) + c_3 \cdot (Z - Z_s)} \right].
\end{aligned}
\tag{30}$$

Условие коллинеарности при обратной засечке определяет, что для любого снимка точки фотографирования, наземные точки и соответствующие им точки на плоскости снимка должны лежать на прямой линии. Если известны координаты  $X, Y$  и  $Z$  минимум трех опорных точек, методы обратной засечки могут быть использованы для определения шести элементов внешнего ориентирования снимка  $X_s, Y_s, Z_s$  и  $\alpha, \omega, \kappa$ . Обратная засечка определяет необходимую информацию о камере (сенсоре).

Обратная засечка обычно используется для ортотрансформирования одиночного кадра, когда один снимок обрабатывается за один прием. Если используются снимки с перекрытием, для проведения обратной засечки необходимо как минимум три опорные точки, которые находятся на каждом обрабатываемом снимке.

Используя условие коллинеарности, можно вычислить элементы внешнего ориентирования. Световые лучи исходят, по крайней мере, из трех опорных точек, пересекаются с плоскостью снимка, определяя положение точек на снимке, и сходятся в центре проекции камеры или сенсора. Используя уравнивание методом наименьших квадратов, можно вычислить большинство неизвестных элементов внешнего ориентирования. Методы обратной засечки могут быть применены к одному или нескольким перекрывающимся снимкам.

## 10 ЧАСТНЫЕ СЛУЧАИ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ КООРДИНАТАМИ ТОЧЕК МЕСТНОСТИ И СНИМКА

Для горизонтального снимка угловые элементы внешнего ориентирования  $\alpha = 0$ ,  $\omega = 0$ .

Рассмотрим частные случаи зависимости между координатами соответствующих точек местности и снимка.

### а) Горизонтальный снимок

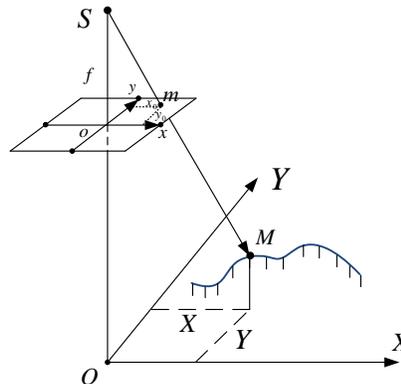


Рисунок 17 – Зависимости между координатами точек местности и снимка

$\kappa = 0$ ,  $X_s = Y_s = 0$ ,  $Z_s = H$ ,  $Z = 0$ ,  $x_0 = y_0 = 0$ ,  $a_1 = b_2 = c_3 = 1$ , остальные коэффициенты направляющих косинусов равны 0 (рисунок 17). После преобразований формулы (1) принимают вид:

$$\begin{aligned} X &= H \cdot \frac{x^0}{f}, \\ Y &= H \cdot \frac{y^0}{f}. \end{aligned} \tag{31}$$

или

$$\begin{aligned} x^0 &= H \cdot \frac{f}{X}, \\ y^0 &= H \cdot \frac{f}{Y}. \end{aligned} \quad (32)$$

**б) Наклонный снимок. Общий случай**

Начало координат снимка соответствует главной точке  $o$ . Начало координат на местности совпадает с точкой  $N$  (рисунок 18).

$$\alpha = \kappa = 0, \quad \omega = \varepsilon, \quad X_s = Y_s = 0, \quad Z_s = H, \quad Z = 0, \quad x_0 = y_0 = 0.$$

Направляющие косинусы принимают вид:

$$a_1 = 1, \quad a_2 = a_3 = 0, \quad b_1 = 0, \quad b_2 = \cos \varepsilon, \quad b_3 = -\sin \varepsilon, \quad c_1 = 0, \quad c_2 = \sin \varepsilon, \quad c_3 = \cos \varepsilon.$$

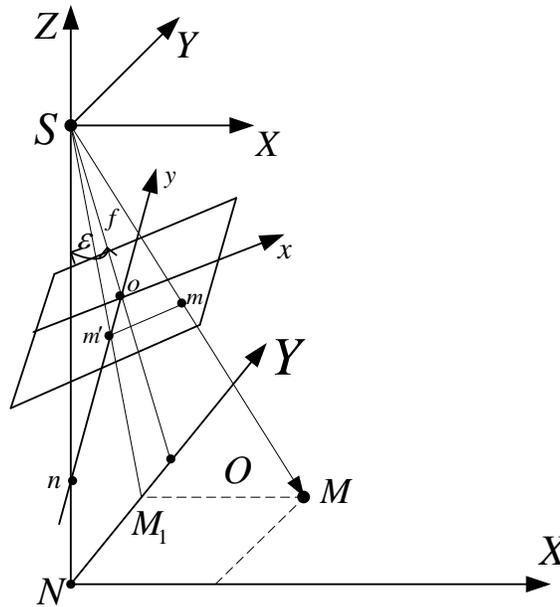


Рисунок 18 – Зависимости между координатами точек местности и наклонного снимка

$$X_N = H \cdot \frac{x}{f \cdot \cos \varepsilon - y \cdot \sin \varepsilon}, \quad Y_N = H \cdot \frac{f \cdot \sin \varepsilon + y \cdot \cos \varepsilon}{f \cdot \cos \varepsilon - y \cdot \sin \varepsilon}.$$

**в) Наклонный снимок**

Начало координат снимка соответствует главной точке  $o$ . Начало координат на местности совпадает с точкой  $O$ .

$$X_0 = X_N, \quad Y_0 = Y_N - H \cdot \operatorname{tg} \varepsilon \quad (\text{см. рисунок 2}).$$

$$X_0 = H \cdot \frac{x}{f \cdot \cos \varepsilon - y \cdot \sin \varepsilon}, \quad Y_0 = H \cdot \frac{y}{(f \cdot \cos \varepsilon - y \cdot \sin \varepsilon) \cdot \cos \varepsilon}.$$

### 2) Наклонный снимок

Начало координат снимка соответствует точке нулевых искажений с. Начало координат – на местности в точке С.

$X_C = X_N, Y_C = Y_N - H \cdot \operatorname{tg} \frac{\varepsilon}{2}$  (см. рисунок 18) и элементы центральной проекции.

$x_c = x_0, y_c = y_0 + f \cdot \operatorname{tg} \varepsilon$  (см. рисунок 18).

$$X_N^n = H \cdot \frac{x_n \cdot \cos \varepsilon}{f - y_n \cdot \sin \varepsilon \cdot \cos \varepsilon}, Y_N^n = H \cdot \frac{y_n \cdot \cos^2 \varepsilon}{f - y_n \cdot \sin \varepsilon \cdot \cos \varepsilon}.$$

### д) Наклонный снимок

Начало координат снимка лежит в главной точке схода J. Начало координат на местности лежит в точке К.

$$X_K = X_C, Y_K = Y_C + CK = Y_C + \frac{H}{\sin \varepsilon}$$

$x_c = x_j, y_j = J - y_c = \frac{1}{\sin \varepsilon}$  (см. рисунок 2).

$$X_K = -H \cdot \frac{x_j}{y_j \cdot \sin \varepsilon}, Y_K = -H \cdot \frac{1}{y_j \cdot \sin^2 \varepsilon}.$$

### е) Наклонный снимок

Начало координат снимка и местности лежит в точке V.

$$X_V = X_N, Y_V = Y_C - CV = Y_C - \frac{H - f}{\sin \varepsilon},$$

$$Y_V = Y_N - H \cdot \operatorname{tg} \frac{\varepsilon}{2} - \frac{H - f}{\sin \varepsilon} = Y_N - \frac{f - H \cdot \cos \varepsilon}{\sin \varepsilon}.$$

$$y_v = y_0 - OV = y_0 + (JV - OJ) = y_0 + \frac{H}{\sin \varepsilon} - f \cdot \operatorname{ctg} \varepsilon = y_0 + \frac{H - f \cdot \cos \varepsilon}{\sin \varepsilon}$$

$$X_V = H \cdot \frac{x_v}{H - y_v \cdot \sin \varepsilon}, Y_V = f \cdot \frac{y_v}{H - y_v \cdot \sin \varepsilon}.$$

## 11 ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ КООРДИНАТАМИ СООТВЕТСТВУЮЩИХ ТОЧЕК ГОРИЗОНТАЛЬНОГО И НАКЛОННОГО СНИМКА

Получить строго горизонтальные снимки в процессе съемки пока невозможно. Однако можно перейти от координат точки, измеренной на наклонном снимке, к координатам соответствующей точки горизонтально-

го снимка, если известны угловые элементы внешнего ориентирования наклонного снимка.

Пусть  $x^0$  и  $y^0$  – координаты изображения  $m_0$  точки  $M$  местности на горизонтальном снимке  $P_0$ , полученном с точки  $S$ , а  $x$  и  $y$  – координаты изображения  $m$  той же точки  $M$  местности на наклонном снимке  $P$ , полученном с точки  $S$ .

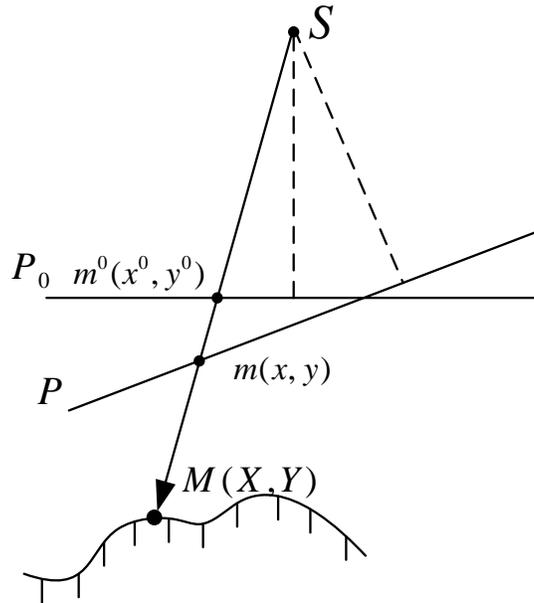


Рисунок 19 Зависимость между координатами соответствующих точек горизонтального и наклонного снимка

Применяя формулы

$$\begin{aligned}
 X &= X_S + (Z - Z_S) \cdot \frac{a_1 \cdot (x - x_0) + a_2 \cdot (y - y_0) - a_3 \cdot f}{c_1 \cdot (x - x_0) + c_2 \cdot (y - y_0) - c_3 \cdot f}, \\
 Y &= Y_S + (Z - Z_S) \cdot \frac{b_1 \cdot (x - x_0) + b_2 \cdot (y - y_0) - b_3 \cdot f}{c_1 \cdot (x - x_0) + c_2 \cdot (y - y_0) - c_3 \cdot f},
 \end{aligned} \tag{33}$$

запишем:

$$\begin{aligned}
 X - X_S &= -(Z - Z_S) \cdot \frac{x^0}{f} = \\
 &= (Z - Z_S) \cdot \frac{a_1 \cdot (x - x_0) + a_2 \cdot (y - y_0) - a_3 \cdot f}{c_1 \cdot (x - x_0) + c_2 \cdot (y - y_0) - c_3 \cdot f}, \\
 Y - Y_S &= -(Z - Z_S) \cdot \frac{y^0}{f} = \\
 &= (Z - Z_S) \cdot \frac{b_1 \cdot (x - x_0) + b_2 \cdot (y - y_0) - b_3 \cdot f}{c_1 \cdot (x - x_0) + c_2 \cdot (y - y_0) - c_3 \cdot f}.
 \end{aligned} \tag{34}$$

Отсюда

$$x^0 = -f \cdot \frac{a_1 \cdot (x - x_0) + a_2 \cdot (y - y_0) - a_3 \cdot f}{c_1 \cdot (x - x_0) + c_2 \cdot (y - y_0) - c_3 \cdot f},$$

$$y^0 = -f \cdot \frac{b_1 \cdot (x - x_0) + b_2 \cdot (y - y_0) - b_3 \cdot f}{c_1 \cdot (x - x_0) + c_2 \cdot (y - y_0) - c_3 \cdot f}. \quad (35)$$

Эти формулы трансформирования координат пригодны при любых значениях угловых элементов внешнего ориентирования снимка.

## 12 ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ МАСШТАБА СНИМКА

Местность изображается на снимке в центральной проекции. Центр объектива ( $S$ ) камеры (сенсора) является центром проекции (рисунок 20), а плоскость  $P$  снимка – плоскостью проекции. Прямая  $Oo$ , проходящая через центр объектива перпендикулярно к плоскости аэрофотоснимка, называется оптической осью камеры. Точка пересечения оптической оси камеры с плоскостью снимка (точка  $o$ ) называется главной точкой снимка. Расстояние  $SO$  от центра объектива камеры до земной поверхности называется высотой съемки и обозначается буквой  $H$ . Расстояние  $So$  от центра объектива до плоскости снимка называется фокусным расстоянием камеры и обозначается буквой  $f$ .

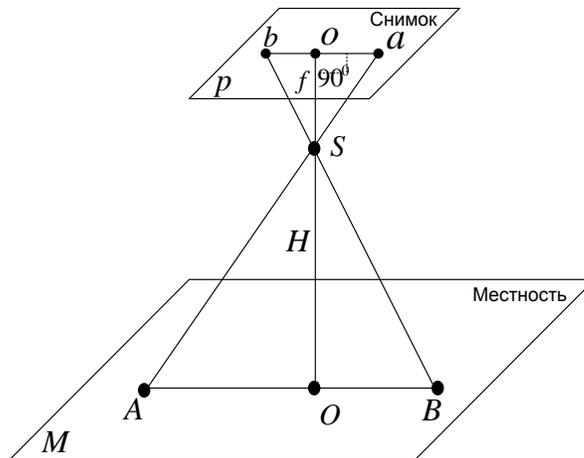


Рисунок 20 – Геометрическая сущность съемки

При центральном проектировании масштаб аэрофотоснимка будет постоянным по всей его площади при условии параллельности плоскостей  $P$  и  $M$  и отвесном положении оптической оси  $Oo$  камеры, а также незначительных превышений форм рельефа на фотографируемом участке. При плановой аэрофотосъемке равнинной или слегка всхолмленной местности масштаб аэрофотоснимка будет практически постоянным и равен отноше-

нию фокусного расстояния  $f$  АФА к высоте аэрофотосъемки  $H$ . Эта зависимость выводится из подобия треугольников (рисунок 20)  $Sao$  и  $SAO$ :

$$\frac{1}{m} = \frac{ab}{AB} = \frac{So}{SO} = \frac{f}{H}. \quad (36)$$

Таким образом, масштаб фотографирования зависит от высоты съемки и фокусного расстояния АФА. Так, при высоте фотографирования, равной 10 км, и фокусном расстоянии АФА  $f = 20$  см масштаб аэрофотоснимка будет равен 1:50 000, а при  $f = 40$  см равен 1:25 000.

Масштаб перспективного снимка в каждой точке и в направлении различен (рисунок 21). За масштаб наклонного снимка в любой точке по направлению принимают отношение бесконечно малого отрезка, исходящего из этой точки и расположенного на данном направлении к соответствующему отрезку на местности.

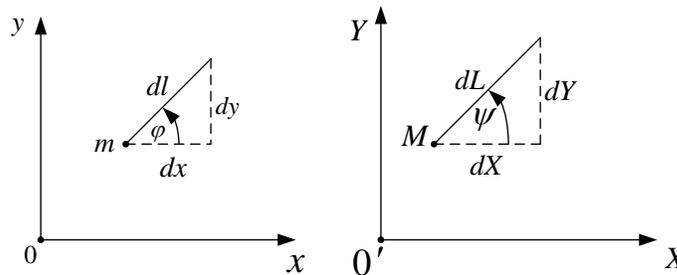


Рисунок 21 – Определение масштаба перспективного снимка

Зависимость определения масштаба наклонного снимка принимает вид:

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{H} \cdot k^2 \cdot [(k \cdot \cos \varphi + c \cdot \sin \varphi)^2 + \sin^2 \varphi]^{\frac{1}{2}}, \quad (37)$$

где  $k = \cos \varepsilon - \frac{y}{f} \cdot \sin \varepsilon$ ,  $c = \frac{x}{f} \cdot \sin \varepsilon$ .

Индикатриса масштабных искажений представляет собой построение эллипсов, которое дает наглядную картину искажений масштаба в пределах всего снимка.

Таким образом, масштаб снимка зависит от фокусного расстояния камеры ( $f$ ), высоты наблюдения ( $H$ ), угла наклона снимка ( $\varepsilon$ ), положения точки, в которой взят бесконечно малый элемент  $dl$ , а также от направления этого элемента.

При планировании аэрофотосъемки масштаб аэрофотоснимков выбирается в зависимости от того, с какой подробностью необходимо получить требуемые данные о противнике и местности. Чем крупнее масштаб аэрофотоснимка, тем больше подробностей по нему можно выявить. Однако

укрупнение масштаба аэрофотоснимков ведет к увеличению их количества и времени на их обработку.

Командиры обычно используют аэрофотоснимки крупного масштаба для изучения противника. При решении навигационных задач, определении координат целей, действиях в воздушном десанте и в других случаях используются аэрофотоснимки средне- и мелкомасштабные (табл. 6).

Таблица 6. Назначение снимков

Снимок	Масштаб	Назначение
Крупномасштабный	1:10000 и крупнее	Детальное дешифрирование элементов при изучении важных участков местности
Среднемасштабный	1:10000... 1:25000	Детальное изучение местности, ориентирование на ней и для целеуказания.
Мелкомасштабный	Мельче 1:25000	Изучение крупных объектов местности, обновление в оперативное исправление топографических карт, создание специальных карт.

### 13 ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ИСКАЖЕНИЯ СНИМКОВ

Геометрическое искажение изображения фотографируемых участков местности на снимках вызывается в основном значительными неровностями рельефа и отклонением оптической оси камеры от отвесной линии, то есть наклоном снимка относительно горизонтальной плоскости. В зависимости от этого различают на снимках искажения за рельеф и искажения за наклон снимка (рисунок 22).

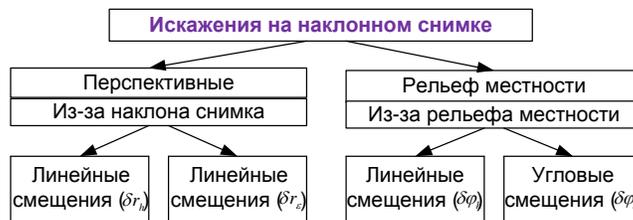


Рисунок 22 – Искажения на наклонном снимке

Искажения из-за влияния рельефа и наклона снимка могут существенно изменять форму и размеры объектов на изображении участков

местности. Максимальные искажения при этом будут у краев аэрофото- снимков.

**Линейные смещения точек на снимке из-за влияния рельефа местности**

Искажения за рельеф присущи центральной проекции. Они имеются как на плановых, так и на перспективных снимках. Влияние рельефа на фото- графическое изображение показано на рисунке 23.

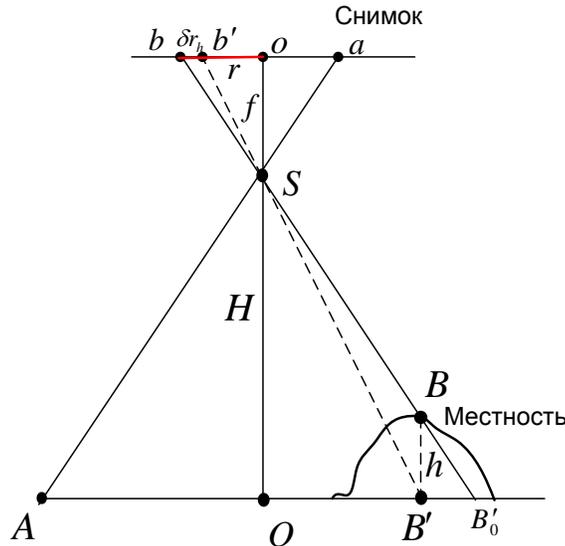


Рисунок 23 – Искажения за рельеф местности

Точка *A* местности изобразится на снимке в точке *a*. Горизонтальной же проекцией точки *B* является точка *B'*, которая при отсутствии возвышенности изобразилась бы на снимке в точке *B'*. Отрезок *bb'* представляет собой искажение за рельеф  $\delta r_h$ . Искажение будет тем значительнее, чем больше относительное превышение точки и дальше изображение этой точки от центра аэрофотоснимка. Поэтому на аэрофотоснимках горного района очертания местных предметов получаются искаженными. По таким снимкам расстояния и площади можно измерить только приближенно, так как значение смещения на аэрофотоснимках, расположенных на возвышенностях точек, достигает соответственно при  $H=2$  км 12 мм, при  $H=4$  км 6 мм, при  $H=8$  км 3 мм. Такие искажения за рельеф возникают в точках, расположенных в 10 см от центра аэрофотоснимка. Если точки расположены ближе или дальше этого расстояния от центра снимка, то значения смещений пропорционально уменьшаются или увеличиваются.

Рассмотрим  $\Delta Sbb'$  и  $\Delta SBB'$ . Эти треугольники являются подобными:

$$\frac{\delta r_h}{BB'} = \frac{f}{H}, \tag{38}$$

$$BB' = \frac{r \cdot h}{f}, \quad (39)$$

$$\delta r_h = \frac{f \cdot \frac{r \cdot h}{f}}{H} = r \cdot \frac{h}{H}, \quad (40)$$

$$\delta r_h = r \cdot \frac{h}{H} = \frac{r \cdot h}{f \cdot m}. \quad (41)$$

### Анализ формулы

1.  $\delta r_h$  увеличивается с увеличением  $r$  и  $h$ ;
2.  $\delta r_h$  уменьшается с увеличением  $H$  или  $f$  камеры;
3.  $\delta r_h = 0$  в точке надира для наклонного снимка и в точке  $O$  для горизонтального снимка;
4. Знак  $\delta r_h$  зависит от знака превышения  $h$  (при  $-h$   $\delta r_h$  – отрицательное, соответственно при  $+h$   $\delta r_h$  – положительное).

### Угловые смещения точек на снимке из-за влияния рельефа местности

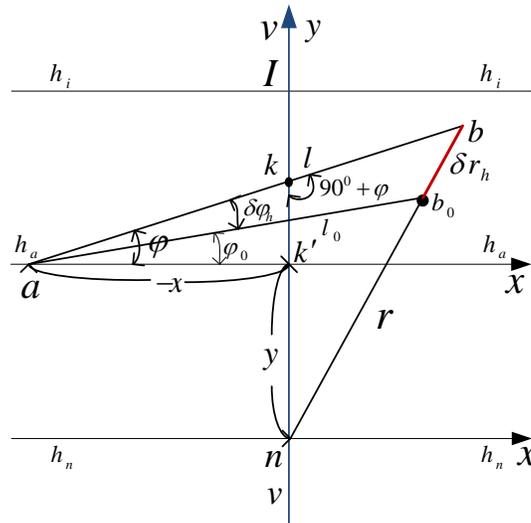


Рисунок 244 – Линейные смещения точек из-за рельефа

$$\delta \varphi_h = \varphi - \varphi_0, \quad (42)$$

$$\frac{\sin \delta \varphi_h}{\delta r_h} = \frac{\sin \beta}{l_0}, \quad (43)$$

$$\sin \delta \varphi_h = \delta r_h \cdot \frac{\sin \beta}{l_0}, \quad (44)$$

По теореме синусов из  $\Delta kbn$ :

$$\frac{\sin \beta}{kn} = \frac{\sin(90^\circ + \varphi)}{r}, \quad (45)$$

$$\sin \beta = \frac{kn \cdot \cos \varphi}{r}, \quad (46)$$

$$\left. \begin{aligned} kn &= y + k'k \\ k'k &= -x \cdot \cos \varphi \\ kn &= y - x \cdot \operatorname{tg} \varphi \end{aligned} \right\}. \quad (47)$$

$$\sin \beta = \frac{(y - x \cdot \operatorname{tg} \varphi) \cdot \cos \varphi}{r}. \quad (48)$$

Подставив (48) в (44), получаем выражение:

$$\sin \delta \varphi_h = \frac{\delta r_h \cdot (y \cdot \cos \varphi - x \cdot \sin \varphi)}{l_0 \cdot r}. \quad (49)$$

#### Анализ формулы

1)  $\delta \varphi_h = 0$  (при  $\sin \delta \varphi_h = 0$ ) при  $\delta r_h = 0$  – местность плоская;

2)  $\delta \varphi_h = 0$  (при  $\sin \delta \varphi_h = 0$ ) при  $y = x = 0$  – в точке надире искажения

из-за влияния рельефа отсутствуют;

3)  $\delta r_h = 0$  (при  $\sin \delta \varphi_h = 0$ ) при  $y \cdot \cos \varphi - x \cdot \sin \varphi = 0$  или  $y = x \cdot \operatorname{tg} \varphi$  – уравнение прямой, проходящей через начало координат.

Все направления, которые проводятся через  $n$ , из-за влияния рельефа не искажаются.

*Примечание:* Точку надире на снимке найти трудно, поэтому необходимы соответствующие преобразования строгой формулы (\*).

4) Если вершина направлений на линии  $\nu\nu$ , то координата  $x = 0$ . При  $l_0 \approx l$

$$\sin \delta \varphi_h = \frac{\delta r_h \cdot y \cdot \cos \varphi}{l \cdot r}. \quad (50)$$

5) Если вершина направлений в точке  $o$  ( $y = 0, n = f \cdot \operatorname{tg} \varepsilon$ ), тогда

$$\sin \delta \varphi_h = \frac{\delta r_h \cdot (f \cdot \operatorname{tg} \varepsilon) \cdot \cos \varphi}{l \cdot r} = \frac{\delta r_h \cdot f}{l \cdot r} \cdot \operatorname{tg} \varepsilon \cdot \cos \varphi. \quad (51)$$

5) Для плановых снимков

$$\delta r_h = \frac{r \cdot h}{f \cdot m}; l \approx r, \quad (52)$$

$$\sin \delta \varphi_h = \frac{\delta \varphi_h}{\rho}; \operatorname{tg} \varepsilon = \frac{\varepsilon}{\rho} \text{ – подставим в (38)}$$

$$\delta\varphi_h = \frac{h \cdot \varepsilon}{m \cdot l} \cdot \cos \varphi. \quad (53)$$

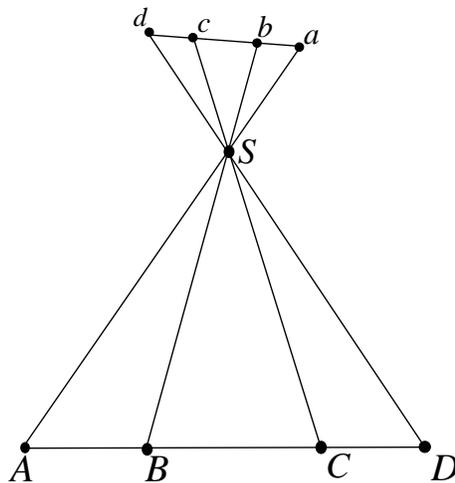
б)  $\delta\varphi_h$  принимает максимальное значение при  $\cos \varphi = \pm 1$ ,  $\varphi = 0^\circ; 180^\circ$

$$\delta\varphi_{h_{\max}} = \frac{h \cdot \varepsilon}{m \cdot l}. \quad (54)$$

### ***Линейные смещения точек на изображении из-за наклона снимка***

Искажения изображения за наклон зависят от значения угла отклонения оптической оси АФА от отвесной линии (рисунок 24), фокусного расстояния фотоаппарата и расстояния от центра снимка до определяемой точки.

Из рисунка 24 видно, что разные расстояния между точками  $A, B, C, D$  на местности изображаются неравными отрезками на фотоснимке, и чем больше будет его наклон, тем больше будет неравенство отрезков.



*Рисунок 24 – Искажения за наклон аэрофотоснимка*

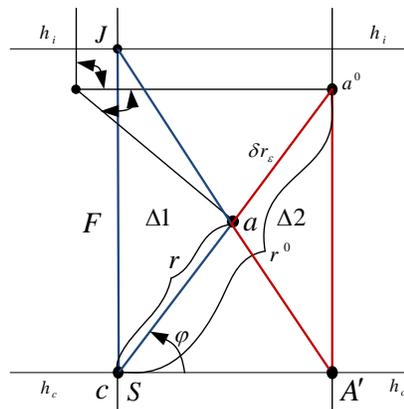


Рисунок 25 – Линейные смещения точек на наклонном снимке

$$\delta r_{\varepsilon} = r - r^0, \quad (55)$$

Так как  $\Delta 1$  и  $\Delta 2$  подобны, то следует записать:

$$\frac{aa^0}{r} = \frac{a^0 A'}{Jc}, \quad (56)$$

$$\left. \begin{aligned} aa^0 &= r^0 - r \\ a^0 A' &= r^0 \cdot \sin \varphi \\ Jc &= F \end{aligned} \right\}. \quad (57)$$

$$\frac{r^0 - r}{r} = \frac{r^0 \cdot \sin \varphi}{F}, \quad (58)$$

$$r^0 \cdot F - r \cdot F = r^0 \cdot r \cdot \sin \varphi, \quad (59)$$

$$r^0 \cdot (F - r \cdot \sin \varphi) = r \cdot F, \quad (60)$$

$$r^0 = \frac{r \cdot F}{F - r \cdot \sin \varphi}, \quad (61)$$

$$\delta r_{\varepsilon} = r - \frac{r \cdot F}{F - r \cdot \sin \varphi} = -\frac{r^2 \cdot \sin \varphi}{F - r \cdot \sin \varphi}, \quad (62)$$

где  $F = \frac{f}{\sin \varepsilon}$ .

$$\delta r_{\varepsilon} = -\frac{\frac{r^2 \cdot \sin \varphi}{f - r \cdot \sin \varphi \cdot \sin \varepsilon}}{\sin \varepsilon} = \frac{r^2 \cdot \sin \varphi \cdot \sin \varepsilon}{r \cdot \sin \varphi \cdot \sin \varepsilon - f}. \quad (63)$$

Эта формула справедлива для любых точек с любым наклоном.

*Для планового снимка ( $\varepsilon \leq 4^0$ )*

$$\sin \varepsilon = \frac{\varepsilon^0}{\rho^0} = \frac{\varepsilon}{\rho} \quad (\rho = 57^0,3 = 3438' = 206265''),$$

Значение  $r \cdot \sin \varepsilon \cdot \sin \varphi$  пренебрежимо мало по сравнению с  $f$ , поэтому формула примет вид:

$$\delta r_{\varepsilon} = -\frac{r^2 \cdot \varepsilon}{f \cdot \rho} \cdot \sin \varphi. \quad (64)$$

#### Анализ формулы

1) Чем больше значение фокусного расстояния  $f$ , тем значение погрешности  $\delta r_{\varepsilon}$  меньше;

2) Если  $\delta r_\varepsilon = 0$ , и при этом:

а)  $\varepsilon = 0$ , то снимок – горизонтальный;

б)  $r = 0$ , в точке с – нулевых искажений снимок не имеет искажений;

в)  $\sin \varphi = 0$ ,  $\varphi = 0(180^\circ)$  – по линии неискаженного масштаба  $h_c h_c$  линейных смещений нет;

3) Максимальное значение погрешности  $\delta r_{\varepsilon_{\max}}$  – при  $\sin \varphi = \pm 1$ , соответственно при  $\varphi = 90(270^\circ)$

$$\delta r_{\varepsilon_{\max}} = \pm \frac{r^2 \cdot \varepsilon}{f \cdot \rho}. \quad (65)$$

**Угловые смещения точек на изображении из-за наклона снимка**

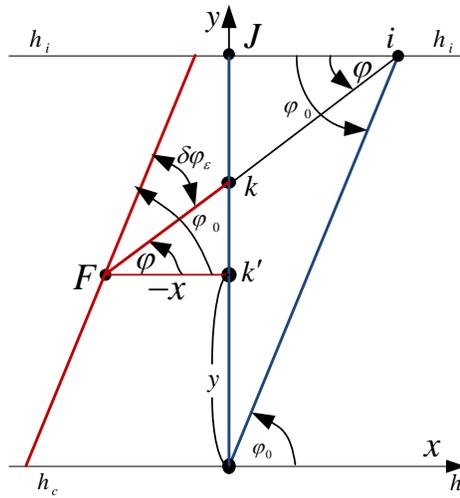


Рисунок 26 – Угловые смещения точек на наклонном снимке

$$\delta \varphi_\varepsilon = \varphi - \varphi^0, \quad (66)$$

$$Ji = Jk \cdot \operatorname{ctg} \varphi = Jc \cdot \operatorname{ctg} \varphi_0, \quad (67)$$

$$\operatorname{ctg} \varphi_0 = \frac{Jk \cdot \operatorname{ctg} \varphi}{Jc}, \quad (68)$$

где  $Jc = F$ .

$$Jk = Jc - y - k'k = F - y + x \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (69)$$

где  $k'k = -x \cdot \operatorname{tg} \varphi$ .

$$\operatorname{ctg} \varphi_0 = \frac{F - y + x \cdot \operatorname{tg} \varphi}{F} \cdot \operatorname{ctg} \varphi, \quad (70)$$

$$\operatorname{ctg} \varphi_0 = \operatorname{ctg} \varphi - \frac{y}{F} \cdot \operatorname{ctg} \varphi + \frac{x}{F}, \quad (71)$$

$$ctg\varphi - ctg\varphi_0 = \frac{y}{F} \cdot ctg\varphi - \frac{x}{F}. \quad (72)$$

Из тригонометрии известно, что

$$ctg\varphi - ctg\varphi_0 = -\frac{\sin(\varphi - \varphi_0)}{\sin\varphi\sin\varphi_0} = -\frac{\sin\delta\varphi_\varepsilon}{\sin\varphi\sin\varphi_0}. \quad (73)$$

$$\frac{\sin\delta\varphi_\varepsilon}{\sin\varphi\sin\varphi_0} = -\frac{y}{F} \cdot ctg\varphi + \frac{x}{F}, \quad (74)$$

$$\sin\delta\varphi_\varepsilon = -\frac{y}{F} \cdot \cos\varphi \cdot \sin\varphi_0 + \frac{x}{F} \cdot \sin\varphi \cdot \sin\varphi_0, \quad (75)$$

где  $F = \frac{f}{\sin\varepsilon}$ .

$$\sin\delta\varphi_\varepsilon = -\frac{y \cdot \sin\varepsilon}{f} \cdot \cos\varphi \cdot \sin\varphi_0 + \frac{x \cdot \sin\varepsilon}{f} \cdot \sin\varphi \cdot \sin\varphi_0,$$

$$\sin\delta\varphi_\varepsilon = \frac{\sin\varepsilon}{f} \cdot \sin\varphi_0 \cdot (-y \cdot \cos\varphi + x \cdot \sin\varphi),$$

$$\sin\delta\varphi_\varepsilon = \frac{\sin\varepsilon}{f} \cdot \sin\varphi_0 \cdot (x \cdot \sin\varphi - y \cdot \cos\varphi). \quad (76)$$

### Анализ формулы

1. Величина  $\sin\delta\varphi_\varepsilon$  зависит от  $\varepsilon$ ,  $f$ ,  $\varphi_0$ ,  $x$ ,  $y$ ,  $\varphi$ .

а)  $\delta\varphi_\varepsilon = 0$ , при  $\varepsilon = 0$ , следовательно снимок горизонтальный;

б)  $\delta\varphi_\varepsilon = 0$ , при  $\varphi_0 = 0(180^\circ)$ , то есть по направлению горизонтали;

в)  $\delta\varphi_\varepsilon = 0$ , при  $x = 0$ ,  $y = 0$ , то есть в точке нулевых искажений (с);

д)  $\delta\varphi_\varepsilon = 0$ , при  $x = 0$ ,  $\varphi = 90(270^\circ)$ , то есть по линии  $\nu\nu$ ;

е)  $\delta\varphi_\varepsilon = 0$ , при  $(x \cdot \sin\varphi - y \cdot \cos\varphi) = 0$  или в преобразованном виде:

$$y = x \cdot \frac{\sin\varphi}{\cos\varphi} = x \cdot tg\varphi - \text{уравнение прямой в явном виде. Проходящей через}$$

начало координат, через точку С.

2. Для плановых снимков (когда  $\varepsilon \leq 3^\circ$  можно принять с достаточной степенью точности)

$$\sin\varepsilon = \frac{\varepsilon}{\rho} \cdot \sin\delta\varphi_\varepsilon = \frac{\delta\varphi_\varepsilon}{\rho}; \varphi_0 \approx \varphi. \quad (77)$$

$$\delta\varphi_\varepsilon = \frac{\varepsilon}{f} \cdot \sin\varphi \cdot (x \cdot \sin\varphi - y \cdot \cos\varphi) =$$

$$\frac{\varepsilon \cdot x}{f} \cdot \sin^2\varphi - \frac{\varepsilon \cdot y}{f} \cdot \sin\varphi \cdot \cos\varphi. \quad (78)$$

3. Если вершина направлений находится на линии  $\nu\nu$ , то  $x=0$ . Тогда

$$\delta\varphi_\varepsilon = -\frac{\varepsilon \cdot y}{2 \cdot f} \cdot \sin 2\varphi. \quad (79)$$

в) Максимальное искажение направлений ( $\delta\varphi_{\varepsilon_{\max}}$ ) будут при  $\sin 2\varphi = \pm 1$   
( $\varphi = 45,135,225,315^\circ$ )

$$\delta\varphi_\varepsilon = -\frac{\varepsilon \cdot y}{2 \cdot f}. \quad (80)$$

г) Если вершина направлений выбрана в главной точке снимка  $O$ , то

$$y = f \cdot \operatorname{tg} \frac{\varepsilon}{2} = f \cdot \frac{\varepsilon}{2 \cdot \rho}, \quad (81)$$

$$\delta\varphi_\varepsilon = \mp \frac{\varepsilon^2}{4 \cdot \rho}. \quad (82)$$

Для того чтобы преобразовать формулу в более удобный вид, перенумеруем числитель и знаменатель на одинаковые величины:

$$\delta\varphi_\varepsilon = \pm \frac{(\varepsilon^2)}{4 \cdot 57,3^0} \cdot \frac{60'}{1^0} = \pm 0,26 \cdot (\varepsilon^0)^2, \quad (83)$$

$$\delta\varphi_\varepsilon = \pm 0,26 \cdot (\varepsilon^0)^2. \quad (84)$$

4. Расчет допустимого удаления центральной и главной точки.

Известно, что графическая точность определения направлений на карте составляет 4,5 минуты. Необходимо, чтобы  $\delta\varphi_\varepsilon$  не превышала этой величины. Встает задача определить при каких углах наклона данное требование будет выполняться.

1.  $\delta\varphi_\varepsilon = \pm 0,26 \cdot (3^0)^2 = \pm 2,3'$  – допустимое значение;
2.  $\delta\varphi_\varepsilon = \pm 0,26 \cdot (4^0)^2 = \pm 4,2'$  – допустимое значение;
3.  $\delta\varphi_\varepsilon = \pm 0,26 \cdot (5^0)^2 = \pm 6,5'$  – недопустимое значение.

Любые направления, проводимые через точку  $C$ , не имеют  $\delta\varphi_\varepsilon$ , однако точку  $C$  очень трудно найти на снимке. Поэтому в качестве вершины направлений используют точку  $O$ . На практике же обычно за вершину направлений выбирают центральную точку.

## 14 ИСКАЖЕНИЯ СНИМКОВ, ВЫЗЫВАЕМЫЕ ФИЗИЧЕСКИМИ ФАКТОРАМИ

Существуют погрешности вследствие влияния физических факторов, таких как кривизна Земли, атмосферная рефракция, дисторсия объектива, деформация материалов и др.

### 14.1 Влияние кривизны Земли на смещение изображения точек на снимке

Наряду с геометрической привязкой и определением масштабов снимка по направлениям, важным моментом при дешифрировании материалов КСН является определение высот объектов наблюдения (ОН). Размеры вертикальных отрезков можно определить по смещению точек отрезков (рис. 26).

Воспользуемся уравнением связи координат точек пространства объектов и пространства изображений из фотограмметрии.

$$x = \frac{a_{11}X + a_{21}Y + a_{31}(Z - Z_s)}{a_{13}X + a_{23}Y + a_{33}(Z - Z_s)} \quad (85)$$

Логарифмируя обе части уравнения, получим

$$\ln x = \ln(a_{11}X + a_{21}Y + a_{31}(Z - Z_s)) - \ln(a_{13}X + a_{23}Y + a_{33}(Z - Z_s)) \quad (86)$$

Производная функции (50) по координате  $x$  и приращение  $\Delta x$  выразится следующим образом:

$$\Delta x = x \left( \frac{a_{11}\Delta X + a_{21}\Delta Y + a_{31}\Delta Z}{a_{11}X + a_{21}Y + a_{31}(Z - Z_s)} - \frac{a_{13}\Delta X + a_{23}\Delta Y + a_{33}\Delta Z}{a_{13}X + a_{23}Y + a_{33}(Z - Z_s)} \right) \quad (87)$$

Приращения  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$  пропорциональны увеличению радиус-вектора данной точки (рисунок 27).

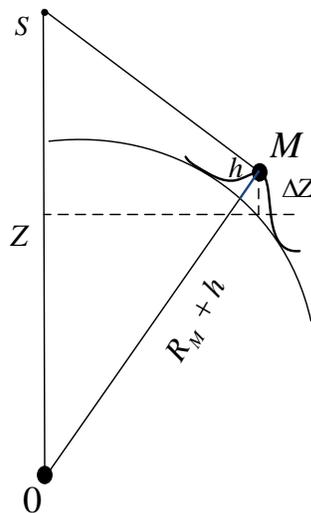


Рисунок 27 – Геометрическая сущность влияния кривизны Земли

$$\begin{aligned}\Delta X &= X \frac{\Delta h}{R_M + h}; \\ \Delta Y &= Y \frac{\Delta h}{R_M + h}; \\ \Delta Z &= Z \frac{\Delta h}{R_M + h}.\end{aligned}\tag{88}$$

Подставив (51) в (50), получим после преобразований:

$$\Delta x = x \frac{\Delta h}{R_M + h} \left( \frac{a_{21}}{a_{11}X + a_{21}Y + a_{31}(Z - Z_S)} - \frac{a_{23}}{a_{13}X + a_{23}Y + a_{33}(Z - Z_S)} \right).\tag{89}$$

Выразив знаменатели в скобках через  $x$ ,  $y$ , после соответствующих преобразований получим:

$$\Delta x = -q \frac{\Delta h}{R_M + h} (a_{21} - xa_{23}).\tag{90}$$

Выполнив аналогичные преобразования для  $\Delta y$ , выражение для  $\Delta y$  запишем в виде

$$\Delta y = -q \frac{\Delta h}{R_M + h} (a_{22} - ya_{23}).\tag{91}$$

Результирующее смещение на снимке может быть выражено как

$$\Delta l = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2},\tag{92}$$

а направление смещения

$$\operatorname{tg} \chi = \frac{a_{22} - ya_{23}}{a_{21} - xa_{23}}.\tag{93}$$

В предположении небольшого влияния значений координат  $x$ ,  $y$  на результат, т.е. при  $x=0$ ,  $y=0$ , раскрыв коэффициенты  $a_{22}$ ,  $a_{21}$ , получим:

$$\operatorname{tg} \chi_0 = \operatorname{tg}(\psi - \operatorname{arctg}(\operatorname{tg} \varphi / \sin \alpha)) = \operatorname{tg} \chi_{\max}.$$

Анализ зависимостей показывает, что отображение вертикальных отрезков на снимке совпадает с направлением большой полуоси эллипса масштабных искажений. Таким образом, по направлению смещения (отображения вертикальных отрезков) на реальном снимке можно экспериментально установить положение эллипса масштабных искажений.

Результирующее смещение на снимке для центра проекции

$$|\Delta l_0| = q \frac{\Delta h}{R_M + h} \sqrt{1 - a_{23}^2}.\tag{94}$$

Из анализа выражения следует, что смещение в центре фрагмента изображения не зависит от угла рысканья.

Тогда выражение для вычисления масштаба изображения вертикальных отрезков выглядит следующим образом:

$$m_h(0) = \frac{q_0}{R_M + h} \sqrt{1 - a_{23}^2}, \quad (95)$$

подставив в формулу (2.47)  $q_0$ , получим:

$$m_h(0) = \frac{1}{\left[ a_{23} - \sqrt{a_{23}^2 - 1 + \frac{(R_M + h)^2}{R_S^2}} \right]} \frac{\sqrt{1 - a_{23}^2}}{R_M + h}. \quad (96)$$

Формулы для масштабных искажений отображения вертикальных отрезков получены для кадровой съёмки. Тем не менее, если учесть, что в каждый момент времени строка получена при известных углах внешнего ориентирования ОС, то есть при известном законе сканирования возможно в каждый момент времени рассчитать масштаб на фрагменте изображения (положение эллипса масштабных искажений).

## 14.2 Влияние рефракции на смещение изображения точек на снимке

При рассмотрении элемента изображения как центральной проекции предполагалось, что световые лучи (проектирующие лучи) распространяются по прямой линии. Однако атмосфера представляет собой среду, показатель преломления которой изменяется с изменением высоты. Это приводит к изменению траектории светового луча и смещению точки на снимке относительно ее положения при прямолинейном распространении светового луча (рисунок 28).

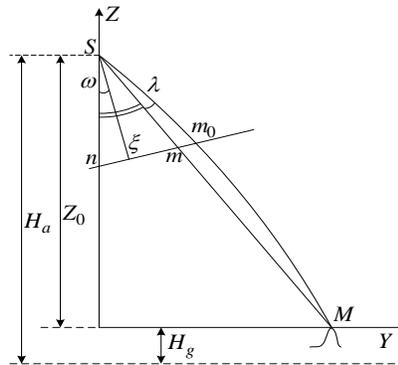


Рисунок 28 – Влияние рефракции на смещение изображения точек на снимке

*Рефракция – искривление траектории оптического луча при прохождении через среду переменной плотности.*

В работе [23] этот вопрос рассмотрен на качественном уровне.

$$\Delta r = f[1 + \operatorname{tg}^2(\xi - \omega)] \cdot 2,332 \cdot 10^{-3} \frac{\operatorname{tg} \xi}{H_a} e^{-0,1423H_g}, \quad (97)$$

где  $\Delta r$  – смещение точки на изображении из-за влияния рефракции;  $H_a, H_g$  – абсолютные высоты съемки и ОН над уровнем Балтийского моря, км;  $\omega$  – угол наклона снимка;  $\xi$  – угол смещения луча визирования от надира;  $f$  – фокусное расстояние камеры.

Из анализа соотношения (50) видно, что смещение изображения точки на снимке из-за влияния рефракции отсутствует только для точки надира  $n(\xi = 0)$ . то есть в этом случае траектория луча не исправляется. Во всех других случаях с увеличением угла  $\xi$  смещение точки из-за влияния рефракции увеличивается.

Искажения координат точки снимка, вызванные рефракцией определяются из выражений:

$$\begin{aligned} \Delta x &= \Delta r \cdot \cos \varphi; \\ \Delta y &= \Delta r \cdot \sin \varphi. \end{aligned} \quad (98)$$

где  $\varphi$  – угол, составленный радиусом-вектором с осью  $x$ .

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{y - y_n}{x - x_n}, \text{ где } x_n \text{ и } y_n \text{ – координаты точки надира } n.$$

При этом необходимо сделать допущение, что плотность воздуха в пределах каждого слоя считалась одинаковой. В этом случае луч визирования находится в вертикальной плоскости, проходящей через точку местности и точку снимка, смещающуюся по направлению из точки надира.

### 14.3 Влияние дисторсии на смещение изображения точек на снимке

#### *Дисторсия объектива*

Дисторсия объектива определяет точность положения точек в плоскости снимка. Существуют два вида дисторсии объектива: радиальная и тангенциальная дисторсии. Дисторсия объектива объясняется тем, что световые лучи, проходя сквозь объектив там, где он искривлен, меняют свое направление и пересекаются с плоскостью снимка, отклоняясь от нормального положения. Рисунок 29 иллюстрирует разницу между радиальной и тангенциальной дисторсией объектива.

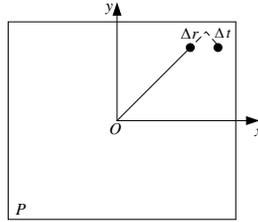


Рисунок 292 – Радиальная и тангенциальная дисторсия объектива

Радиальная дисторсия объектива является причиной искажения вдоль радиальных линий, исходящих из главной точки  $o$ . Влияние радиальной дисторсии представлено как  $\Delta r$ . Радиальная дисторсия объектива также обычно называется симметричной дисторсией объектива. Тангенциальная дисторсия объектива происходит под прямым углом к радиальным линиям, исходящим из главной точки  $o$ . Влияние тангенциальной дисторсии представлено как  $\Delta t$ . Так как тангенциальная дисторсия очень мала по сравнению с величиной радиальной дисторсии, ею пренебрегают.

Влияние дисторсии объектива обычно определяют при проверке камеры в лабораторных условиях.

Влияние радиальной дисторсии объектива по всему изображению может быть аппроксимировано с использованием полинома. Для определения коэффициентов дисторсии объектива используется следующий полином:

$$\Delta r = k_0 \cdot r + k_1 \cdot r^3 + k_2 r^5. \quad (99)$$

где  $\Delta r$  представляет радиальную дисторсию вдоль радиуса  $r$  из главной точки (Yang 1983). В большинстве паспортов камер величина дисторсии объектива представлена или как функция расстояния или как функция угла из главной точки. IMAGINE OrthoBASE использует вычисление параметров радиальной дисторсии по обоим сценариям.

Три коэффициента ( $k_0$ ,  $k_1$  и  $k_2$ ) вычисляются с использованием статистических методов. Вычисленные коэффициенты дисторсии используются для устранения влияния радиальной дисторсии для каждого измерения на снимке.

Дисторсия объектива вызывает радиальное отклонение проектирующих лучей, приводящее к радиальным смещениям точек снимка, быстро возрастающее к краям изображения. Вследствие этого изображение не подобно предмету.

Смещение точек изображения, вызванные симметричной дисторсией, направлены от центра или к центру изображения и в частном случае определяются формулой:

$$\Delta r = \varepsilon r^3, \quad (100)$$

где  $\varepsilon$  - коэффициент;  $r$  - расстояние от центра изображения до точки.

Если смещение  $\Delta r$  направлено от центра, то дисторсия положительная, подушкообразная ( $\varepsilon \geq 0$ ), если смещение  $\Delta r$  направлено к центру, то дисторсия отрицательная, бочкообразная ( $\varepsilon \leq 0$ ).

Общее выражение для смещения точек изображения:

$$\text{Для первой точки} - \Delta r_1 = \varepsilon r_1^3, \Delta x_1 = \varepsilon x_1 r_1^2, \Delta y_1 = \varepsilon y_1 r_1^2;$$

Для второй точки:

$$\Delta r_2 = \varepsilon r_2^3, \Delta x_2 = \varepsilon x_2 r_2^2, \Delta y_2 = \varepsilon y_2 r_2^2.$$

#### 14.4 Ошибки, вызываемые несовершенством выравнивания фильма в плоскость (для фотографических систем)

Пленка (фильм) уклоняется от плоскости на величину  $\Delta f$ , то изображение точки  $A$  местности получим в точке  $a$ , то есть смещенным от истинного положения  $a_0$  на величину:

$$\delta = \Delta f \frac{r}{f_k}, \quad (101)$$

$$\Delta f = \delta \frac{f_k}{r}. \quad (102)$$

Деформация фильма (пленки) имеет как равномерную составляющую, изменяющую масштаб изображения, но не вносящую в него искажений, так и неравномерную или случайную составляющую, вызывающую искажение изображения.

Неравномерная деформация может иметь или случайный характер, или выражать разность деформации снимка в продольном и поперечном направлении. Последняя обычно не превышает 0,03...0,05 мм. на расстоянии в 90 мм., а случайная часть составляет около 0,02 мм.

В среднем суммарное искажение точек изображения на снимке принимают  $\pm 0,03$  мм, хотя на краях снимка эти искажения могут быть и больше.

### 15 ЭЛЕМЕНТЫ СТЕРЕОПАРЫ СНИМКОВ

Стереоскопическая пара снимков - это пара снимков, полученная с двух точек фотографирования и содержащая изображение одной и той же

местности. Обратимся к рисунку 1, на котором изображена пара снимков  $P_1$  и  $P_2$  в положении, которое они занимали во время фотографирования.

На рисунке представлены следующие элементы стереопары:

$S_1, S_2$  – центры проекции – точки, через которые проходят проектирующие лучи;

$S_1, S_2$  – точки фотографирования – точки пространства, в которых находились центры проекции во время фотографирования (в момент съемки они совмещены);

$B$  – базис фотографирования – расстояние между точками фотографирования,  $B = S_1S_2$ ;

$S_1o_1a_1, \dots, S_2o_2a_2$  – связки – совокупность проектирующих лучей, принадлежащих центрам проекции;

$S_1o_1, S_2o_2$  – главные лучи – лучи связок, перпендикулярные к снимкам;

$S_1n_1, S_2n_2$  – надирные лучи – отвесные лучи;

$S_1S_2, S_2S_1$  – базисные лучи – лучи, совпадающие с базисом фотографирования;

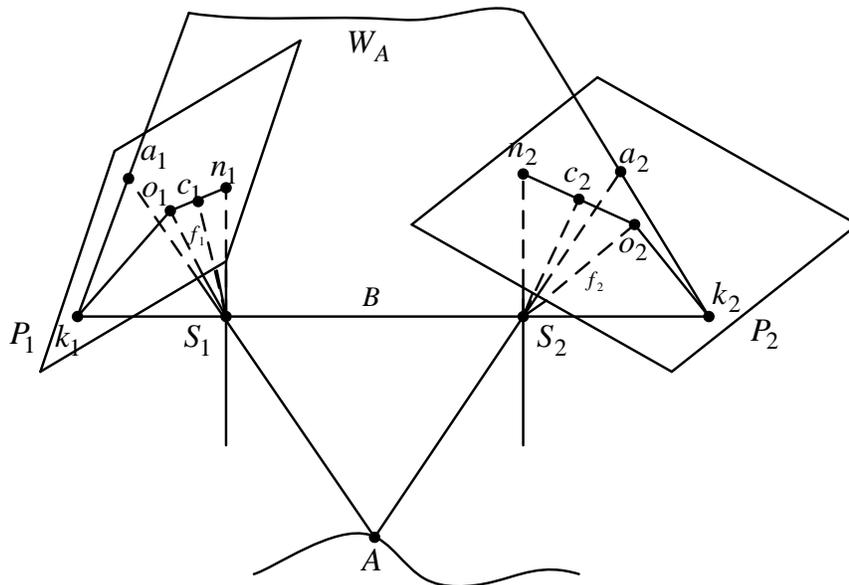


Рисунок 30 – Элементы стереопары снимков

$f = S_1o_1 = S_2o_2$  – фокусное расстояние снимка – расстояние от центра проекции до снимка;

$o_1, o_2$  – главные точки – точки пересечения главных лучей со снимками;

$n_1, n_2$  – точки надира – следы отвесных лучей на снимках;

$\varepsilon_1 = \angle n_1S_1o_1, \varepsilon_2 = \angle n_2S_2o_2$  – углы наклона снимков – углы между надирными и главными лучами;

$c_1, c_2$  – точки нулевых искажений – следы на снимках, образованные бисектрисами углов наклона снимков;  
 $k_1, k_2$  – базисные точки – следы базисных лучей на снимках;  
 $a_1, a_2$  – соответственные (одноименные) точки – изображения одной и той же точки на местности;  
 $W_A$  – базисная плоскость – плоскость, проходящая через базис фотографирования;  
 $S_1S_2o_1, S_2S_1o_2$  – главные базисные плоскости – базисные плоскости, проходящие через главные лучи;  
 $S_1S_2n_1, S_2S_1n_2$  – надирная базисная плоскость – базисная плоскость, проходящая через надирные лучи;  
 $k_1a_1, k_2a_2$  – соответственные (одноименные) базисные линии – следы базисной плоскости на снимках;  
 $k_1o_1, k_2o_2$  – главные базисные линии – следы главных базисных плоскостей на снимках;  
 $k_1n_1, k_2n_2$  – надирные базисные линии – следы надирной базисной плоскости на снимках.

## 16 ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ МЕСТНОСТИ

Каждая пара соответствующих лучей лежит в одной базисной плоскости и пересекается.

Представим себе, что одна связка, например правая, вместе со своим снимком движется по направлению к левой связке. При этом связка перемещается параллельно самой себе и центр проекции не сходит с базиса (рисунки 30).

В этом случае каждый проектирующий луч подвижной связки будет все время оставаться параллельным своему исходному положению и, следовательно, находиться в одной и той же базисной плоскости. Таким образом, пересечение одноименных лучей связок нигде не будет нарушено.

Если движение связки прекратилось и центр проекции правой связки занял новое положение  $S'_2$ , то каждой точке местности будет соответствовать новая точка, где пересеклись одноименные лучи. Новая поверхность, образованная совокупностью точек пересечения соответственных лучей, называется *стереомоделью* или просто *моделью*.

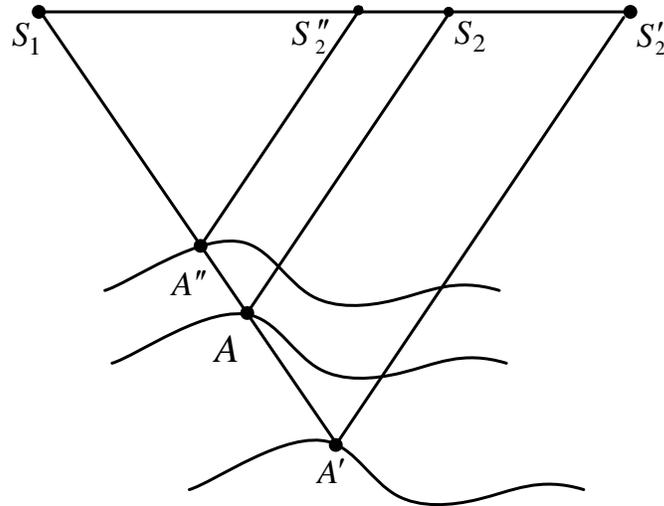


Рисунок 30 – Принцип построения модели местности

Так как в результате построения модели углы между базисными плоскостями получаются такими же, какими они были при фотографировании, а треугольники, образованные базисом и каждой парой лучей, подобны соответствующим треугольникам, имевшим место при фотосъемке, то модель подобна местности.

Расстояние между центрами проекции двух связок, по которым построена модель, называется базисом проектирования  $B' = S_1S_2'$ .

Масштаб модели равен:

$$\frac{1}{t} = \frac{B'}{B}. \quad (103)$$

Итак, пара снимков позволяет восстановить связки, существовавшие в момент фотографирования, и расположить их так, чтобы все соответственные лучи обеих связок попарно пересеклись. В результате такой установки снимков и связок образуется модель местности, изображившейся на стереопаре.

Связки восстанавливают с помощью проектирующих камер, фокусное расстояние которых равно фокусному расстоянию съемочной камеры. Восстановление связок проектирующих лучей называется **внутренним ориентированием** снимков. Установка снимков относительно друг друга в положение, существовавшее во время фотографирования, называется **взаимным ориентированием снимков**.

В результате взаимного ориентирования снимков получается модель местности в произвольном масштабе, т.к. базис устанавливается обычно произвольно.

Чтобы использовать модель для создания карты, надо привести ее к заданному масштабу. Для этого на снимках нужно иметь не менее трех опорных точек.

Приведение модели к заданному масштабу и установка ее относительно планшета (геодезической системы координат) называется **внешним ориентированием модели**. Карту составляют путем проектирования контуров и горизонталей на планшет. Ортогональное проектирование элементов на планшет называется съемкой контуров и рельефа.

Мы рассмотрели схему оптического решения основной задачи стереофотограмметрии – преобразования двух центральных проекций (снимков) в ортогональную проекцию (план или карту).

Однако основную задачу можно решать и другими способами: аналитическим, графическим, механическим, оптико-механическим, электронным, рассмотрение которых выходит за рамки нашего лекционного курса.

*Принцип построения модели местности состоит в расположении снимков в пространстве таким образом, каким они были в момент съемки.*

## 17 СИСТЕМЫ КООРДИНАТ

Задача фотограмметрия заключается в установлении соотношения между параметрами камеры (сенсора), использованного для получения изображения, самим снимком и подстилающей поверхностью. В целом, чтобы понять и определить эту соотношение, каждый из трех параметров, должен быть определен относительно координатной плоскости и координатной системы. Для этого используются три типа систем координат:

- плоские;
- пространственные фотограмметрические;
- наземные.

### 17.1 Система координат снимка

**Файловая система координат.** Система координат файла, содержащего цифрой снимок, определяется в файловой системе координат. Обычно файловая система координат имеет начало в левом верхнем углу изображения, при этом ось  $x$  направлена вправо, а ось  $y$  направлена перпендикулярно вниз; единицей измерения является пиксель (см. Рисунок 31). Координаты файла  $(c, r)$  могут также определяться как номера столбцов и строк, содержащих пиксели. Такая система координат в данном разделе называется файловыми координатами  $(c, r)$ .

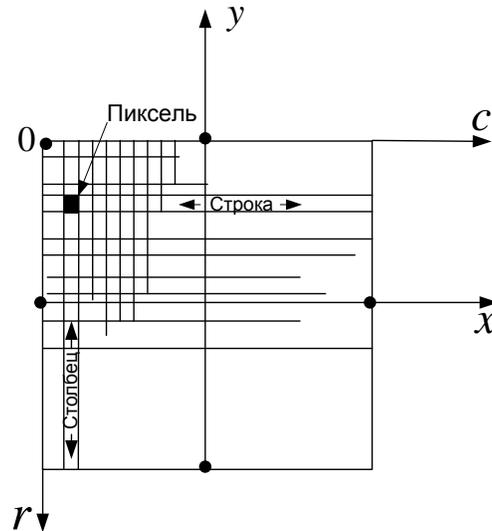


Рисунок 31 – Файловые координаты и координаты снимка

**Плоская прямоугольная система координат снимка.** Система координат снимка или плоская система координат снимка обычно определяется как двумерная система координат на плоскости с началом в центре снимка, обычно это главная точка или пересечение координатных меток, как показано на рисунке 32.

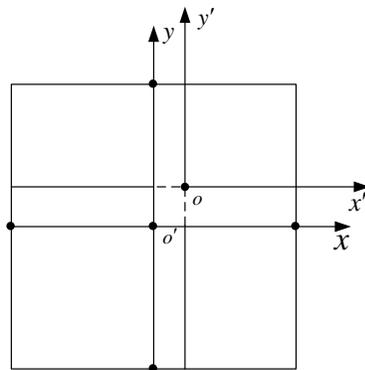
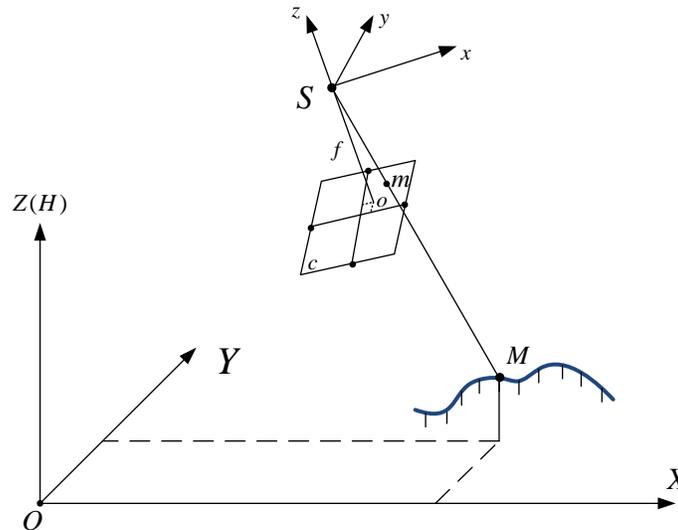


Рисунок 32 – Система координат снимка

Координаты снимка используются для определения местоположения на плоскости снимка. Единицами измерения в системе координат снимка являются миллиметры или микроны. В данном разделе такая система координат определяется координатами снимка  $(x, y)$ .

## 17.2 Система пространственных фотограмметрических координат снимка

Система пространственных координат снимка применяются для определения пространственных фотограмметрических координат точек снимка (рисунок 33) за исключением того, что к ним добавлена третья ось ( $z$ ).



*Рисунок 33 – Пространственная фотограмметрическая система координат снимка*

Центр такой системы координат определяется центром проекции  $S$ , как показано на рисунке 33. Оси  $x$  и  $y$  параллельны соответствующим осям плоской системы координат снимка. Ось  $z$  – это оптическая ось, следовательно, значение  $z$  в любой точке пространственных координат снимка обычно эквивалентно –  $f$  (фокусному расстоянию). Пространственные координаты снимка используются для описания положения снимка внутри камеры, единицами измерения обычно являются миллиметры или микроны. Такая система координат в этом разделе называется системой пространственных координат снимка ( $x, y, z$ ).

### 17.3 Наземная система координат

Наземная система координат обычно определяется как трехмерная система координат, которая использует известные картографические проекции. Наземные координаты ( $X, Y, Z$ ) обычно выражаются в футах и метрах. Величина  $Z$  определяет превышение над уровнем моря для данного исходного горизонта. В этом разделе такая система координат называется наземной системой координат.

Большинство фотограмметрических приложений в своих вычислениях применяют кривизну Земли. Это делается как для учета влияния кривиз-

ны, так и для вычисления геометрии в тех системах координат, которые используют кривизну. Двумя такими системами являются геоцентрическая и топоцентрическая системы координат.

**Геоцентрическая система координат.** Геоцентрическая система координат имеет начало в центре земного эллипсоида (рисунок 34). Ось  $Z$  совпадает с осью вращения Земли, а ось  $X$  проходит через Гринвичский меридиан. Ось  $Y$  перпендикулярна осям  $Z$  и  $X$ , создавая трехмерную правостороннюю систему координат.

**Топоцентрическая система координат.** Топоцентрическая система координат имеет начало в центре снимка, спроектированного на земной эллипсоид (рисунок 5). Три перпендикулярных координатных оси определяют касательную плоскость в центральной точке.

Эта плоскость называется опорной плоскостью или локальным датумом. Ось  $x$  ориентирована на восток, ось  $y$  – на север и ось  $z$  направлена вертикально вверх относительно плоскости.

Для простоты представления этот раздел не слишком подробно описывает геоцентрическую или топоцентрическую системы координат. Основные фотограмметрические понятия могут быть представлены без дополнительного увеличения сложности.

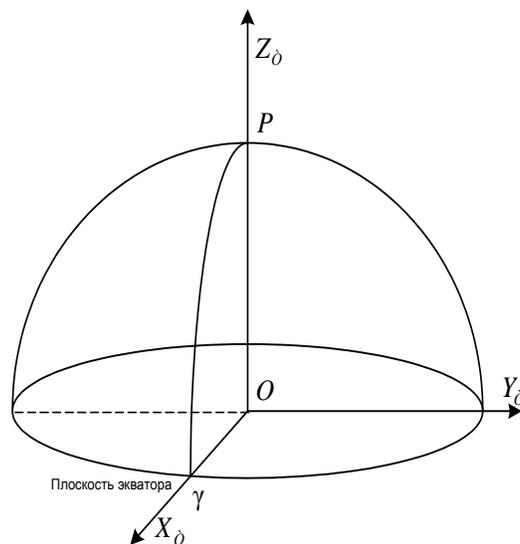


Рисунок 34 – Геоцентрическая система координат

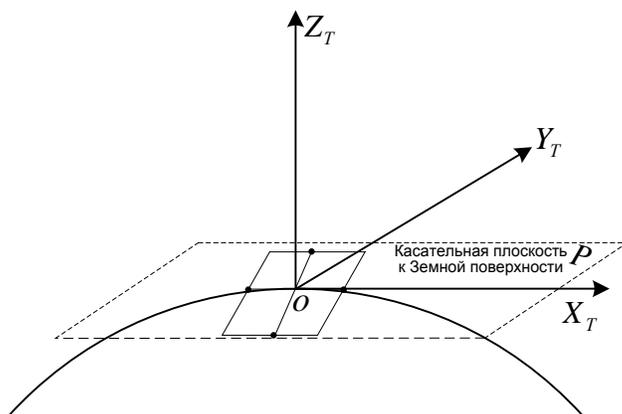


Рисунок 35 – Топоцентрическая система координат

**Геодезическая система координат.** На поверхности эллипсоида вращения положение точки определяется геодезическими координатами - геодезической широтой  $B$  и геодезической долготой  $L$  (рисунок 36).

*Геодезическая широта точки ( $B$ )* – это угол, образованный нормалью к поверхности эллипсоида в этой точке и плоскостью экватора.

*Геодезическая долгота точки ( $L$ )* – это двугранный угол между плоскостью начального меридиана и плоскостью меридиана точки.

Плоскость геодезического меридиана проходит через точку  $M$  и малую полуось эллипсоида; в этой плоскости лежит нормаль к поверхности эллипсоида в точке  $M$ . Геодезическая параллель получается от пересечения поверхности эллипсоида плоскостью, проходящей через точку  $M$  и параллельной плоскости экватора.

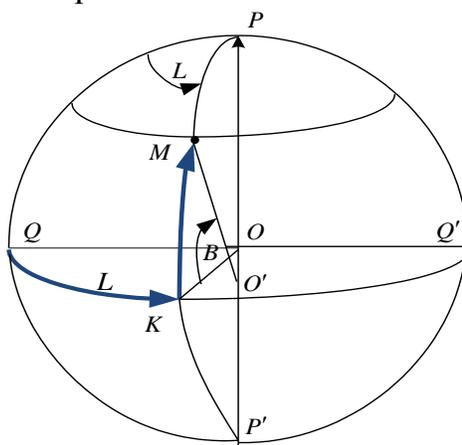


Рисунок 36 – Геодезические координаты точек местности

## 18 КООРДИНАТЫ И ПАРАЛЛАКСЫ ОДНОИМЕННЫХ ТОЧЕК СТЕРЕОПАРЫ

Смещение точек на изображении по оси  $X$  называется продольными параллаксами ( $p$ ), а смещение точек на изображении по оси  $Y$  – поперечными параллаксами ( $q$ ) (рисунок 37).

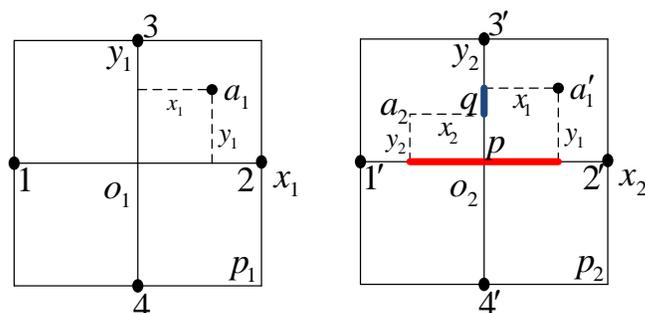


Рисунок 37 – Геометрическая сущность продольного и поперечного параллакса одноименных точек

$$\begin{cases} x_1 \neq x_2 \\ y_1 \neq y_2 \end{cases} \quad (104)$$

$$\begin{cases} p = x_1 + (-x_2) = x_1 - x_2 \\ q = y_1 - y_2 \end{cases} \quad (105)$$

Идеальной парой фотоснимков называется пара снимков, полученных с двух одинаковых высот наблюдения (съемки) и имеющих оси  $x_1$  и  $x_2$  параллельные базису фотографирования, а углы наклона этих снимков  $\alpha$ ,  $\omega$ ,  $\kappa$  равны нулю.

*Примечание:* Важная особенность пары горизонтальных снимков заключается в том, что на идеальной стереопаре нет поперечного параллакса ( $q$ ).

$$q^0 = y_1^0 - y_2^0 = 0. \quad (106)$$

Геометрический смысл продольного параллакса показан на рисунке 38.

Из анализа рисунка необходимо сделать следующие выводы:

1. Продольный параллакс всегда положительная величина  $p > 0$ .
2. Продольный параллакс для идеальной стереопары равен базису фотографирования (съемки) в масштабе изображения данной точки.
3. Продольный параллакс уменьшается если увеличивается высота съемки ( $H_a > H_b$ , а  $p_b^0 > p_a^0$ ), то есть точки местности с меньшими абсолют-

ными высотами имеют меньший параллакс, нежели точки с большими абсолютными высотами над урвонной поверхностью.

4. При съемки плоской местности параллакс ( $p^0$ ) всех точек идеальной стереопары равен базису фотографирования, выраженному в масштабе снимка.

5. При фотографировании равнинной и всхолмленной местности продольный параллакс точек идеальной стереопары отличается незначительно и приблизительно равен базису съемки, выраженному в масштабе снимка.

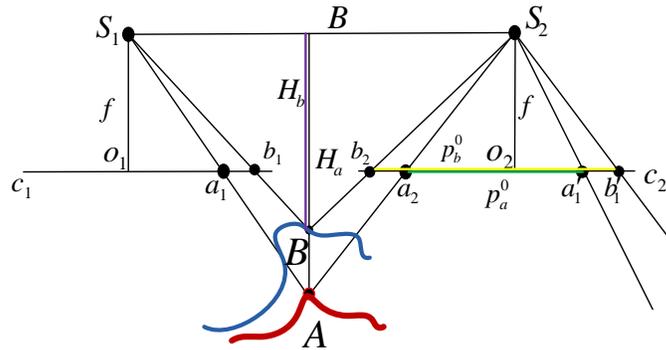


Рисунок 38 – Геометрический смысл продольного параллакса

$$p \approx b = l_k \cdot \frac{100 - p\%}{100}. \quad (107)$$

Пример.  $H_0 = 3000$  м,  $f = 70$  мм,  $B = 2500$  м,  $A_1 = 500$  м.

$$H_1 = H_0 - A_1 = 3000 - 500 = 2500 \text{ м}, \quad P = \frac{2500 \cdot 70}{2500} = 70 \text{ мм}.$$

## 19 ЭЛЕМЕНТЫ ОРИЕНТИРОВАНИЯ ПАРЫ СНИМКОВ

Элементами ориентирования пары снимков называются величины, определяющие их положение во время фотографирования. Элементы ориентирования пары снимков разделяются на две группы: элементы внутреннего ориентирования и элементы внешнего ориентирования.

К элементам внутреннего ориентирования относятся фокусное расстояние  $f$  и координаты главной точки снимков  $x_0, y_0$ . Они позволяют найти положение центров проекции левой и правой связок относительно снимков и восстановить эти связки.

Элементы внешнего ориентирования определяют положение пары снимков и связок во время съемок. К ним относятся (рисунок 39):

$X_{01}, Y_{01}, Z_{01}$  – координаты левой точки съемки  $S_1$ ;  
 $X_{02}, Y_{02}, Z_{02}$  – координаты правой точки съемки  $S_2$ ;  
 $\alpha_1$  – продольный угол наклона левого снимка между осью  $Z$  и проекцией главного луча на плоскость  $XZ$ ;  
 $\omega_1$  – поперечный угол наклона левого снимка между главным лучом и плоскостью  $XZ$ ;  
 $\chi_1$  – угол поворота левого снимка между осью  $y_1$  и следом плоскости, проходящей через главный луч и ось  $Y$ ;  
 $\alpha_2, \omega_2, \chi_2$  – соответствующие углы для правого снимка.

Таким образом, пара снимков имеет три элемента внутреннего ориентирования и двенадцать элементов внешнего ориентирования, из которых шесть линейных и шесть угловых.

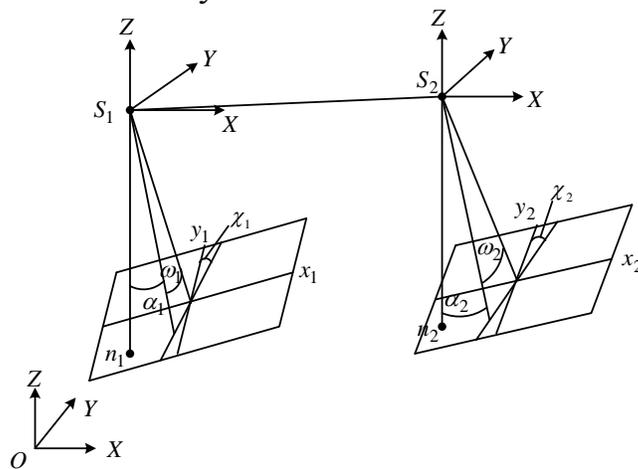


Рисунок 39 – Элементы ориентирования пары снимков

## 20 СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ОРИЕНТИРОВАНИЯ

Точность определения координат точек местности по снимкам во многом зависит от точности задания элементов внешнего ориентирования.

Задача определения элементов внешнего ориентирования решается тремя способами:

1. Первый способ предполагает, что из прогноза орбитального движения КА известны линейные элементы внешнего ориентирования (положение центра проектирования), а угловые элементы измеряются с помощью специальных датчиков.

2. Второй способ предполагает наличие на снимках так называемых опорных точек, координаты которых на местности известны с заданной точностью.

3. Третий способ предполагает нахождение элементов внешнего ориентирования по звездам.

Первый способ не предполагает решения уравнений, связывающий координаты снимка и местности, поэтому рассматриваться не будет.

Второй и третий способы требуют специального рассмотрения.

### 20.1. Определение элементов ориентирования по опорным точкам

Ранее были получены следующие соотношения взаимосвязи координат  $x, y$  точки снимка и координат  $X, Y, Z$  соответствующей точки местности:

$$\begin{aligned} x - x_0 &= -f \frac{a_1(X - X_0) + b_1(Y - Y_0) + c_1(Z - Z_0)}{a_3(X - X_0) + b_3(Y - Y_0) + c_3(Z - Z_0)} = -f \frac{X^*}{Z^*}, \\ y - y_0 &= -f \frac{a_2(X - X_0) + b_2(Y - Y_0) + c_2(Z - Z_0)}{a_3(X - X_0) + b_3(Y - Y_0) + c_3(Z - Z_0)} = -f \frac{Y^*}{Z^*}, \end{aligned} \quad (108)$$

где  $x_0, y_0$  – координаты главной точки снимка;

$f$  – фокусное расстояние съёмочной камеры;

$X_0, Y_0, Z_0$  – координаты точки съёмки;

$a_i, b_i, c_i$  – направляющие косинусы, зависящие от угловых элементов внешнего ориентирования.

Через  $x^*, y^*, z^*$  обозначены числители и знаменатель формулы (98).

Если известны приближенные значения элементов ориентирования снимка, то по формуле (98) можно вычислить координаты изображений опорных точек на снимке. Обозначим их через  $(x)$  и  $(y)$ . Очевидно, что они будут отличаться от измеренных. Обозначим поправки к приближенным значениям элементов ориентирования через  $\delta X_0, \delta Y_0, \delta Z_0, \delta \alpha, \delta \omega, \delta \chi, \delta x_0, \delta y_0, \delta f$ .

Полагая, что имеются избыточные измерения, составим уравнения поправок:

$$\begin{aligned} (x) + \frac{dx}{dX_0} \delta X_0 + \frac{dx}{dY_0} \delta Y_0 + \frac{dx}{dZ_0} \delta Z_0 + \frac{dx}{d\alpha} \delta \alpha + \frac{dx}{d\omega} \delta \omega + \\ + \frac{dx}{d\chi} \delta \chi + \frac{dx}{df} \delta f + \frac{dx}{dx_0} \delta x_0 + \frac{dx}{dy_0} \delta y_0 - x = v, \\ (y) + \frac{dy}{dX_0} \delta X_0 + \frac{dy}{dY_0} \delta Y_0 + \frac{dy}{dZ_0} \delta Z_0 + \frac{dy}{d\alpha} \delta \alpha + \frac{dy}{d\omega} \delta \omega + \\ + \frac{dy}{d\chi} \delta \chi + \frac{dy}{df} \delta f + \frac{dy}{dx_0} \delta x_0 + \frac{dy}{dy_0} \delta y_0 - y = v'. \end{aligned} \quad (109)$$

Частные производные, входящие в уравнения поправок, определяются путем дифференцирования формул (99) и равны:

$$a = \frac{dx}{dX_0} = \frac{1}{Z^*} [a_1 f + a_3 (x - x_0)],$$

$$b = \frac{dx}{dY_0} = \frac{1}{Z^*} [b_1 f + b_3 (x - x_0)],$$

$$c = \frac{dx}{dZ_0} = \frac{1}{Z^*} [c_1 f + c_3 (x - x_0)],$$

$$d = \frac{dx}{d\alpha} = \frac{1}{Z^*} [c_1 (X - X_0) - a_3 (Z - Z_0)] + \frac{x - x_0}{Z^*} [c_3 (X - X_0) - a_3 (Z - Z_0)],$$

$$e = \frac{dx}{d\omega} = -f \sin \chi + (x - x_0) \left[ \operatorname{tg} \omega + \frac{Y - Y_0}{Z^* \cos \omega} \right],$$

$$f = \frac{dx}{d\chi} = y - y_0, \quad g = \frac{dx}{df} = \frac{x - x_0}{f}, \quad h = \frac{dx}{dx_0} = 1, \quad t = \frac{dx}{dy_0} = 0,$$

С учетом принятых обозначений уравнения поправок примут вид:

$$\begin{aligned} (x) + a \delta X_0 + b \delta Y_0 + c \delta Z_0 + d \delta \alpha + e \delta \omega + \\ + f \delta \chi + g \delta f + h \delta x_0 + t \delta y_0 - x = v, \\ (y) + a' \delta X_0 + b' \delta Y_0 + c' \delta Z_0 + d' \delta \alpha + e' \delta \omega + \\ + f' \delta \chi + g' \delta f + h' \delta x_0 + t' \delta y_0 - y = v' \end{aligned} \quad (110)$$

Одна опорная точка дает два уравнения с весами  $p$  и  $p'$  и девятью неизвестными. Следовательно, для решения задачи необходимо не менее пяти опорных точек.

Уравнения (3) решаются при условии

$$[pv^2 + p'v'^2] = \min$$

методом последовательных приближений. Для этого сначала изменяют координаты опорных точек на снимке. Затем по приближенным значениям элементов ориентирования вычисляют координаты этих же опорных точек и коэффициенты уравнений поправок. Составляют уравнения поправок и нормальные уравнения. Решают нормальные уравнения, в результате чего получают поправки к начальному приближению. По первому приближению элементов ориентирования опять вычисляют координаты изображений опорных точек и т.д. Вычисления продолжают до тех пор, пока разность значений каждого неизвестного, полученных в двух последова-

тельных приближениях, не будет по модулю меньше установленного допуска.

## 20.2 Определение элементов ориентирования снимка по звездам

Рассмотрим способ, позволяющий определить направление главного луча, азимут оси  $x$  снимка и элементы внутреннего ориентирования по изображениям звезд на снимке. Обратимся к рис.8.1. На рисунке обозначено  $PP'$ - ось мира,  $P$ - северный полюс мира,  $\gamma B$ - небесный экватор,  $\gamma$ - точка весеннего равноденствия.

Совместим начало прямоугольной системы координат  $XYZ$  с центром  $S$  небесной сферы, ось  $Z$ - с осью мира, а плоскость  $XZ$ - с кругом склонения равноденственных точек.

Пусть при фотографировании звезд с точки  $S$  оптическая ось фотокамеры направлена вдоль оси мира. В этом случае плоскость снимка параллельна плоскости  $XU$ . Пусть также координатные оси  $x^0$  и  $y^0$  параллельны соответственно осям  $X$  и  $Y$ .

Обозначим через  $f$  фокусное расстояние камеры а через  $x^0$  и  $y^0$  – координаты изображения  $\sigma^0$  звезды на снимке. Тогда соотношение между экваториальными координатами звезды и координатами ее изображения на снимке определяется следующими формулами:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{f}{\sqrt{x^{02} + y^{02}}}, \operatorname{tg} \alpha = -\frac{y^0}{x^0}. \quad (111)$$

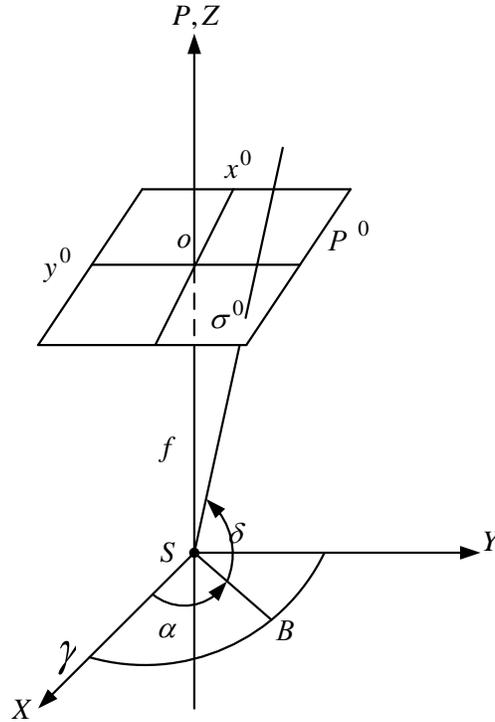


Рисунок 40 – Определение элементов ориентирования снимка по звездам

В общем случае звездный снимок занимает произвольное положение относительно системы координат  $XYZ$ . Обозначим координаты изображения  $\sigma$  звезды на произвольном снимке через  $x$  и  $y$ . Между координатами  $\sigma^0$  и  $\sigma$  существует следующая связь:

$$x^0 = -f \frac{x'}{z'}, \quad y^0 = -f \frac{y'}{z'}, \quad (112)$$

где

$$\left. \begin{aligned} x' &= a_1(x - x_0) + a_2(y - y_0) - a_3f, \\ y &= b_1(x - x_0) + b_2(y - y_0) - b_3f, \\ z' &= c_1(x - x_0) + c_2(y - y_0) - c_3f. \end{aligned} \right\} \quad (113)$$

Здесь  $x_0, y_0$  - координаты главной точки снимка.

Направляющие косинусы  $a_i, b_i, c_i$  определяются углом наклона снимка  $\varepsilon$ , азимутом направления съемки  $t$  и углом поворота снимка  $\chi$ . Если обозначить экваториальные координаты главного луча через  $\delta_0$  и  $\alpha_0$ , то  $\varepsilon = 90^\circ + \delta_0$  и  $t = \alpha_0$ . Тогда, полагая  $\chi = \chi_0$ , получим

$$\left. \begin{aligned}
a_1 &= -\cos \chi_0 \sin \delta_0 \cos \alpha_0 + \sin \chi_0 \sin \alpha_0, \\
a_2 &= -\sin \chi_0 \sin \delta_0 \cos \alpha_0 - \cos \chi_0 \sin \alpha_0, \\
a_3 &= -\cos \delta_0 \cos \alpha_0, \\
b_1 &= -\cos \chi_0 \sin \delta_0 \sin \alpha_0 - \sin \chi_0 \cos \alpha_0, \\
b_2 &= -\sin \chi_0 \sin \delta_0 \sin \alpha_0 + \cos \chi_0 \cos \alpha_0, \\
b_3 &= -\cos \delta_0 \sin \alpha_0, \\
c_1 &= \cos \delta_0 \cos \chi_0, \\
c_2 &= \cos \delta_0 \sin \chi_0, \\
c_3 &= \sin \delta_0.
\end{aligned} \right\} \quad (114)$$

Выразим экваториальные координаты звезды через координаты  $x, y$  ее изображения на снимке. Для этого подставим (103) в формулу (104)

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{z'}{\sqrt{x'^2 + y'^2}}, \operatorname{tg} \alpha = -\frac{y'}{x'}. \quad (115)$$

Пусть известны приближенные значения элементов  $\delta_0, \alpha_0, \chi_0, t, x_0, y_0$ . Измерим координаты  $x, y$  изображения звезды на снимке и вычислим по формулам (103), (104) и (105) экваториальные координаты звезды. Очевидно, что вычисленные координаты не совпадут с координатами, взятыми из Астрономического ежегодника.

Для определения поправок к приближенным значениям элементов ориентирования запишем два уравнения:

$$\left. \begin{aligned}
\varphi = \operatorname{tg} \delta &= (\operatorname{tg} \delta) + \frac{\partial \varphi}{\partial \delta_0} \delta \delta_0 + \frac{\partial \varphi}{\partial \alpha_0} \delta \alpha_0 + \frac{\partial \varphi}{\partial \chi_0} \delta \chi_0 + \\
&+ \frac{\partial \varphi}{\partial f} \delta f + \frac{\partial \varphi}{\partial x_0} \delta x_0 + \frac{\partial \varphi}{\partial y_0} \delta y_0, \\
\varphi' = \operatorname{tg} \alpha &= (\operatorname{tg} \alpha) + \frac{\partial \varphi'}{\partial \delta_0} \delta \delta_0 + \frac{\partial \varphi'}{\partial \alpha_0} \delta \alpha_0 + \frac{\partial \varphi'}{\partial \chi_0} \delta \chi_0 + \\
&+ \frac{\partial \varphi'}{\partial f} \delta f + \frac{\partial \varphi'}{\partial x_0} \delta x_0 + \frac{\partial \varphi'}{\partial y_0} \delta y_0,
\end{aligned} \right\} \quad (116)$$

где  $\delta, \alpha$  – координаты звезды, взятые из астрономического ежегодника;  
 $(\operatorname{tg} \delta), (\operatorname{tg} \alpha)$  – величины, вычисленные с использованием приближенных значений элементов ориентирования.

Частные производные определяются соотношениями:

$$a = \frac{\partial \varphi}{\partial \delta_0} = \left[ \frac{f}{z' \cos \delta_0} - \operatorname{tg} \delta_0 + \frac{1}{z'} (x' \cos \alpha_0 + y' \sin \alpha_0) \operatorname{tg}^2 \delta \right] \operatorname{tg} \delta,$$

$$b = \frac{\partial \varphi}{\partial \alpha_0} = 0,$$

$$c = \frac{\partial \varphi}{\partial \chi_0} = \left\{ c_1 y - c_2 x - \frac{1}{z'} [x'(a_1 y - a_2 x) + y'(b_1 y - b_2 x)] \operatorname{tg}^2 \delta \right\} \operatorname{tg} \delta,$$

$$d = \frac{\partial \varphi}{\partial f} = \frac{1}{z'} \left[ \frac{1}{z'} (a_3 x' + b_3 y') \operatorname{tg}^2 \delta - c_3 \right] \operatorname{tg} \delta,$$

$$e = \frac{\partial \varphi}{\partial x_0} = \frac{1}{z'} \left[ \frac{1}{z'} (a_1 x' + b_1 y') \operatorname{tg}^2 \delta - c_1 \right] \operatorname{tg} \delta,$$

$$a' = \frac{dy}{dX_0} = \frac{1}{Z^*} [a_2 f + a_3 (y - y_0)],$$

$$b' = \frac{dy}{dY_0} = \frac{1}{Z^*} [b_2 f + b_3 (y - y_0)],$$

$$c' = \frac{dy}{dZ_0} = \frac{1}{Z^*} [c_2 f + c_3 (y - y_0)],$$

$$d' = \frac{dy}{d\alpha} = \frac{1}{Z^*} [c_2 (X - X_0) - a_2 (Z - Z_0)] +$$

$$\frac{y - y_0}{Z^*} [c_3 (X - X_0) - a_3 (Z - Z_0)],$$

$$e' = \frac{dy}{d\omega} = -f \cos \chi + (y - y_0) \left[ \operatorname{tg} \omega + \frac{Y - Y_0}{Z^* \cos \omega} \right],$$

$$f' = \frac{dy}{d\chi} = -(x - x_0), \quad g' = \frac{dy}{df} = \frac{1}{f} (y - y_0), \quad h' = \frac{dy}{dx_0} = 0, \quad t' = \frac{dy}{dy_0} = 1.$$

$$f = \frac{\partial \varphi}{\partial y_0} = \frac{1}{z'} \left[ \frac{1}{z'} (a_2 x' + b_2 y') \operatorname{tg}^2 \delta - c_2 \right] \operatorname{tg} \delta,$$

$$a' = \frac{\partial \varphi'}{\partial \delta_0} = -\frac{z'}{y'} (\sin \alpha_0 + \cos \alpha_0 \operatorname{tg} \alpha) \operatorname{tg} \alpha,$$

$$b' = \frac{\partial \varphi'}{\partial \alpha_0} = -(1 + \operatorname{tg}^2 \alpha),$$

$$c' = \frac{\partial \varphi'}{\partial \chi_0} = \frac{1}{y'} [(a_1 y - a_2 x) \operatorname{tg} \alpha + b_1 y - b_2 x] \operatorname{tg} \alpha,$$

$$d' = \frac{\partial \varphi'}{\partial f} = -\frac{1}{y'} (a_3 \operatorname{tg} \alpha + b_3) \operatorname{tg} \alpha,$$

$$e' = \frac{\partial \varphi'}{\partial x_0} = -\frac{1}{y'} (a_1 \operatorname{tg} \alpha + b_1) \operatorname{tg} \alpha,$$

$$fd = \frac{\partial \varphi'}{\partial y_0} = -\frac{1}{y'} (a_2 \operatorname{tg} \alpha + b_2) \operatorname{tg} \alpha.$$

При наличии избыточных измерений уравнение поправок запишется так:

$$\begin{aligned} a\delta\delta_0 + b\delta\alpha_0 + c\delta\chi_0 + d\delta f + e\delta x_0 + f\delta y_0 + l &= v, \\ a'\delta\delta_0 + b'\delta\alpha_0 + c'\delta\chi_0 + d'\delta f + e'\delta x_0 + f'\delta y_0 + l' &= v', \end{aligned} \quad (117)$$

где  $l = (tg\delta) - tg\delta$ ,  $l' = (tg\alpha) - tg\alpha$ .

Одна звезда, изображение которой получено на снимке, дает два уравнения с шестью неизвестными. Таким образом, на одном снимке необходимо иметь изображения как минимум трех звезд, характеристики которых имеются в Астрономическом ежегоднике.

Методика решений уравнений поправок аналогична той, которая была рассмотрена в предыдущем пункте.

## 21 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕВЫШЕНИЙ И ВЫСОТ ТОЧЕК МЕСТНОСТИ

Идеальной парой фотоснимков называется пара снимков, полученных с двух одинаковых высот наблюдения (съемки) и имеющих оси  $x_1$  и  $x_2$  параллельные базису фотографирования, а углы наклона этих снимков  $\alpha$ ,  $\omega$ ,  $K$  равны нулю.

*Примечание:* Важная особенность пары горизонтальных снимков заключается в том, что на идеальной стереопаре нет поперечного параллакса ( $q$ ).

$$q^0 = y_1^0 - y_2^0 = 0. \quad (118)$$

Геометрический смысл продольного параллакса показан на рисунке 41.

Из анализа рисунка необходимо сделать следующие выводы:

1. Продольный параллакс всегда положительная величина  $p > 0$ .
2. Продольный параллакс для идеальной стереопары равен базису фотографирования (съемки) в масштабе изображения данной точки.

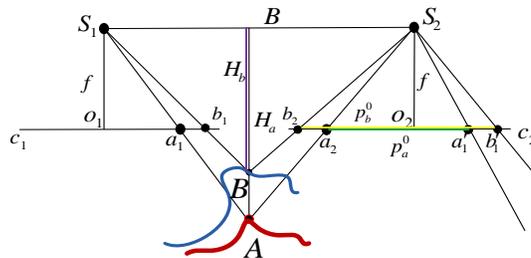


Рисунок 41 – Геометрический смысл продольного параллакса

3. Продольный параллакс уменьшается если увеличивается высота съемки ( $H_a > H_b$ , а  $p_b^0 > p_a^0$ ), то есть точки местности с меньшими абсолютными высотами имеют меньший параллакс, нежели точки с большими абсолютными высотами над уровенной поверхностью.

4. При съемки плоской местности параллакс ( $p^0$ ) всех точек идеальной стереопары равен базису фотографирования, выраженному в масштабе снимка.

5. При фотографировании равнинной и всхолмленной местности продольный параллакс точек идеальной стереопары отличается незначительно и приблизительно равен базису съемки, выраженному в масштабе снимка.

$$p \approx b = l_k \cdot \frac{100 - p\%}{100}. \quad (119)$$

*Пример.*  $H_0 = 3000$  м,  $f = 70$  мм,  $B = 2500$  м,  $A_1 = 500$  м.

$$H_1 = H_0 - A_1 = 3000 - 500 = 2500 \text{ м}, \quad P = \frac{2500 \cdot 70}{2500} = 70 \text{ мм}.$$

$$A_B = A_A + h.$$

$$h = H_A - H_B.$$

$$P_A^0 = B \cdot \frac{f}{H_A},$$

$$P_B^0 = B \cdot \frac{f}{H_B},$$

$$H_A = B \cdot \frac{f}{P_A^0},$$

$$H_B = B \cdot \frac{f}{P_B^0},$$

$$h = B \cdot \frac{f}{P_A^0} - B \cdot \frac{f}{P_B^0} = B \cdot f \cdot \left( \frac{P_B^0 - P_A^0}{P_A^0 \cdot P_B^0} \right) = \frac{B \cdot f}{P_A^0 \cdot P_B^0} \cdot (P_B^0 - P_A^0). \quad (120)$$

Формула для вычисления превышений между двумя точка

$$h = \frac{H_A}{P_B^0} \cdot \Delta P^0 = \frac{H_B}{P_A^0} \cdot \Delta P^0.$$

где  $\Delta P^0 = P_B^0 - P_A^0$ .

### Анализ формул

1. Отношение  $\frac{H_A}{P_B^0} = \frac{H_B}{P_A^0} = k$  – параллактический коэффициент.

2. Поскольку в формуле  $h = \frac{H_A}{P_B^0} \cdot \Delta P^0 = \frac{H_B}{P_A^0} \cdot \Delta P^0$  две величины  $H$  и  $P$  всегда больше 0, то величина  $k$  всегда больше 0, то есть всегда положительна. Отсюда следует, что знак превышения в формуле  $h = \frac{H_A}{P_B^0} \cdot \Delta P^0 = \frac{H_B}{P_A^0} \cdot \Delta P^0$  зависит только от разности продольных параллаксов  $\Delta P_i^0$ . Для того, чтобы правильно определить знак  $\Delta P_i^0$  надо из  $P$  определяемой точки вычесть  $P$  исходной точки. Значение продольных параллаксов измеряется с помощью специальных высокоточных фотограмметрических приборов и по формуле  $\Delta P^0 = P_B^0 - P_A^0$  определяется разность продольных параллаксов.

## 22 ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕВЫШЕНИЙ ПО СНИМКАМ

### *Точность определения превышений по снимкам*

$$\varphi(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0.$$

$$m_\varphi^2 = \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x_1}\right)^2 \cdot m_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x_2}\right)^2 \cdot m_{x_2}^2 + \dots + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x_n}\right)^2 \cdot m_{x_n}^2. \quad (121)$$

где  $\frac{\partial \varphi}{\partial x}$  – частная производная по каждому из аргументов,  $m$  – среднеквадратическая погрешность.

Для вывода конечного выражения используется обобщенная формула, в которой  $h$  – является функцией трех независимых аргументов:

$$h = \frac{H}{P} \cdot \Delta P. \quad (113)$$

Среднеквадратическая погрешность превышения между двумя точками определяется по формуле:

$$m_h^2 = \left(\frac{H}{P}\right)^2 \cdot m_{\Delta P}^2 + \left(\frac{\Delta P}{P}\right)^2 \cdot m_H^2 + \left(\frac{H \cdot \Delta P}{P^2}\right)^2 \cdot m_P^2.$$

Заменим  $\frac{\Delta P}{P} = \frac{h}{H}$ , тогда

$$m_h^2 = \left(\frac{H}{P}\right)^2 \cdot m_{\Delta P}^2 + \left(\frac{h}{H}\right)^2 \cdot m_H^2 + \left(\frac{H \cdot h}{P \cdot H}\right)^2 \cdot m_P^2, \text{ отсюда}$$

$$m_h^2 = \left(\frac{H}{P}\right)^2 \cdot m_{\Delta P}^2 + \left(\frac{h}{H}\right)^2 \cdot m_H^2 + \left(\frac{h}{P}\right)^2 \cdot m_P^2,$$

При применении принципа  $\frac{H}{P} \cdot m_{\Delta p} = \frac{h}{H} \cdot m_H = \frac{h}{P} \cdot m_p$  – равного влияния получается выражение:

$$\begin{cases} m_h = \frac{H}{P} \cdot m_{\Delta p} \cdot \sqrt{3} \\ m_h = \frac{h}{H} \cdot m_H \cdot \sqrt{3} \\ m_h = \frac{h}{P} \cdot m_p \cdot \sqrt{3} \end{cases} \quad (122)$$

Из формулы (7) следует, что

$$\begin{cases} m_{\Delta p} = \frac{m_h \cdot P}{H \cdot \sqrt{3}} \\ m_H = \frac{m_h \cdot H}{h \cdot \sqrt{3}} \\ m_p = \frac{m_h \cdot P}{h \cdot \sqrt{3}} \end{cases} \quad (123)$$

Данные выражения для определения среднеквадратических погрешностей высот съемки, продольных параллаксов точек и их разностей позволяет определить с какой точностью должны определяться эти величины, чтобы СКО определения  $m_h$  не превышала устойчивой величины.

#### Анализ формул

1. Точность определения  $H$  съемки,  $P$  – продольного параллакса,  $\Delta p$  – разности продольных параллаксов как следует из формулы зависит от заданной точности определения превышений  $m_h$  и от самих величин  $h$ ,  $H$ ,  $P$ .

2. Как следует из формулы (8), чем выше требования к точности определения превышений  $m_h$ , тем точнее должны определяться (измеряться) аргументы  $H$ ,  $P$ ,  $\Delta p$ .

3. Практически установлено, что при создании топографических карт высоту съемки  $H$  достаточно определять с точностью десятков метров,  $P$  – с точностью десятых мм (0,1 мм),  $\Delta p$  – с точностью сотых мм (0,01 мм).

## 23 ВЫВОД ФОРМУЛ ПРЯМОЙ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ЗАСЕЧКИ

Один снимок позволяет составить для каждой изобразившейся на нём точки два уравнения с тремя неизвестными координатами  $X, Y, Z$  точки местности.

$$\left. \begin{aligned} X &= X_s + (Z - Z_s) \frac{X'}{Z'}, \\ X &= X_s + (Z - Z_s) \frac{a_1 \cdot x + a_2 \cdot y - a_3 \cdot f}{c_1 \cdot x + c_2 \cdot y - c_3 \cdot f}, \\ Y &= Y_s + (Z - Z_s) \frac{b_1 \cdot x + b_2 \cdot y - b_3 \cdot f}{c_1 \cdot x + c_2 \cdot y - c_3 \cdot f}. \end{aligned} \right\} \quad (124)$$

Однако, данных одного снимка недостаточно для определения пространственного положения точки местности. Поэтому для определения пространственных координат точек местности необходимы два изображения одного участка местности.

**Прямая засечка** – это метод, который обычно используется для определения координат наземных точек  $X, Y$ , и  $Z$ , которые находятся в плоскости перекрытия двух или нескольких снимков, основанный на использовании известных элементов внутреннего и внешнего ориентирования.

Условие коллинеарности гласит, что через соответствующие точки на снимке из двух точек фотографирования проходят световые лучи и пересекаются в некой точке на земной поверхности. Рисунок 41 показывает выполнение прямой засечки, где:

$X_{S_1}, Y_{S_1}, Z_{S_1}$  – линейные элементы внешнего ориентирования первого снимка;

$\alpha_1, \omega_1, \kappa_1$  – угловые элементы внешнего ориентирования первого снимка;

$X_{S_2}, Y_{S_2}, Z_{S_2}$  – линейные элементы внешнего ориентирования второго снимка;

$\alpha_2, \omega_2, \kappa_2$  – угловые элементы внешнего ориентирования второго снимка;

$x_0, y_0, f_k$  – элементы внутреннего ориентирования.

$S_1 S_2 = B$  – базис съемки;

$S_1 o_1 (S_2 o_2)$  – главные лучи – перпендикулярные плоскости снимков и равны фокусному расстоянию  $f_k$ ;

$S_1 p_1 (S_2 p_2)$  – одноименные проектирующие лучи – проходящие через одноименные точки;

$x_1, y_1$  и  $x_2, y_2$  – плоские прямоугольные координаты одноименных точек местности  $m_1$  и  $m_2$ , изображенных на снимках;

$\vec{R}_p(X_p, Y_p, Z_p)$  – пространственные координаты точки  $P$  на земной поверхности;

$\vec{r}_1(X'_1, Y'_1, Z'_1)$  – пространственные координаты точек первого снимка;

$\vec{r}_2(X'_2, Y'_2, Z'_2)$  – пространственные координаты точек второго снимка;

$\vec{R}_0(B_x, B_y, B_z)$  – пространственные координаты базиса съемки;

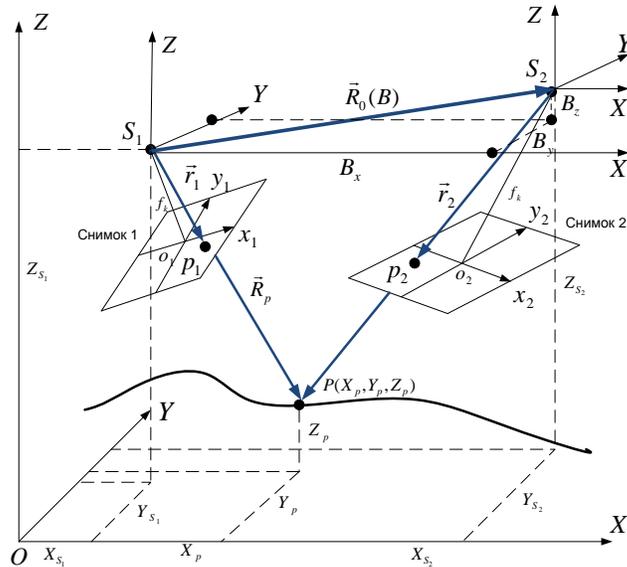


Рисунок 41 – Геометрическая сущность прямой засечки

$$\left. \begin{aligned} B_x &= X_{S_2} - X_{S_1}, \\ B_y &= Y_{S_2} - Y_{S_1}, \\ B_z &= Z_{S_2} - Z_{S_1}. \end{aligned} \right\} \quad (125)$$

Метод прямой засечки основывается на том, что элементы внешнего ориентирования  $X_s, Y_s, Z_s, \alpha, \omega, \kappa$  снимка известны. Элементы внешнего ориентирования вместе с измерениями наземных координат точки  $P$  на снимке 1 и снимке 2 являются исходными данными для вычисления координат  $X_p, Y_p$ , и  $Z_p$  наземной точки  $P$  с помощью уравнения коллинеарности. Для одиночного снимка уравнения координат точек на земной поверхности имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} X &= X_s + (Z - Z_s) \frac{X'}{Z'}, \\ Y &= Y_s + (Z - Z_s) \frac{Y'}{Z'}. \end{aligned} \right\} \quad (126)$$

где  $X', Y', Z'$  – пространственные координаты точек снимка, которые определяются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} X' &= a_1 \cdot (x - x_0) + a_2 \cdot (y - y_0) - a_3 \cdot f, \\ Y' &= b_1 \cdot (x - x_0) + b_2 \cdot (y - y_0) - b_3 \cdot f, \\ Z' &= c_1 \cdot (x - x_0) + c_2 \cdot (y - y_0) - c_3 \cdot f. \end{aligned} \right\}, \quad (127)$$

где  $a_i, b_i, c_i (i = 1, 2, 3)$  – направляющие косинусы луча визирования камеры, вычисляемые по формулам:

$$\begin{aligned} a_1 &= \cos \alpha \cdot \cos \kappa \cdot \sin \omega \cdot \sin \kappa, \\ a_2 &= -\cos \alpha \cdot \sin \kappa \cdot \sin \omega \cdot \cos \kappa, \\ a_3 &= -\sin \alpha \cdot \cos \omega, \\ b_1 &= \cos \omega \cdot \sin \kappa, \\ b_2 &= \cos \omega \cdot \cos \kappa, \\ b_3 &= -\sin \omega, \end{aligned} \quad (128)$$

$$\begin{aligned} c_1 &= \sin \alpha \cdot \cos \kappa + \cos \alpha \cdot \sin \omega \cdot \sin \kappa, \\ c_2 &= -\sin \alpha \cdot \sin \kappa + \cos \alpha \cdot \sin \omega \cdot \cos \kappa, \\ c_3 &= \cos \alpha \cdot \cos \omega. \end{aligned}$$

$$\vec{R}_p = N \cdot \vec{r}_1 \quad (129)$$

$$\left. \begin{aligned} X_p &= N \cdot x_1, \\ Y_p &= N \cdot y_1, \\ Z_p &= N \cdot z_1. \end{aligned} \right\} \quad (130)$$

$$S_2 \vec{P} = \vec{R}_p - \vec{R}_0, \quad (131)$$

$$(\vec{R}_p - \vec{R}_0) \times \vec{r}_2 = 0, \quad (132)$$

$$\vec{R}_p \times \vec{r}_2 - \vec{R}_0 \times \vec{r}_2 = 0, \quad (133)$$

$$N \cdot (\vec{r}_1 \times \vec{r}_2) - (\vec{R}_0 \times \vec{r}_2) = 0, \quad (127)$$

$$\begin{aligned} \vec{r}_1 \times \vec{r}_2 &= \begin{vmatrix} i & j & k \\ X_1 & Y_1 & Z_1 \\ X_2 & Y_2 & Z_2 \end{vmatrix} = i \cdot (Y_1 Z_2 - Y_2 Z_1) - \\ &- j \cdot (X_1 Z_2 - X_2 Z_1) + k \cdot (X_1 Y_2 - X_2 Y_1), \end{aligned} \quad (134)$$

$$\vec{R}_0 \times \vec{r}_2 = \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ B_x & B_y & B_z \\ X_2 & Y_2 & Z_2 \end{vmatrix} = i \cdot (B_y Z_2 - B_z Y_2) -$$

$$- j \cdot (B_x Z_2 - B_z X_2) + k \cdot (B_x Y_2 - B_y X_2).$$

$$N = \frac{B_y Z_2 - B_z Y_2}{Y_1 Z_2 - Y_2 Z_1} = \frac{B_x Z_2 - B_z X_2}{X_1 Z_2 - X_2 Z_1} = \frac{B_x Y_2 - B_y X_2}{X_1 Y_2 - X_2 Y_1}. \quad (136)$$

Метод прямой засечки может быть использован для приложений, связанных со сбором опорных точек, кадастровым картографированием, использующим аэросъемку в качестве методики плановой привязки и высокоточного измерения точек.

## 24 ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ ДЛЯ СТЕРЕОПАРЫ ИДЕАЛЬНЫХ ФОТОСНИМКОВ

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \omega_1 = \omega_2 = \kappa_1 = \kappa_2 = 0. \quad (137)$$

$$B_y = B_z = 0, B_x = B. \quad (138)$$

$$a_{11} = 1, a_{12} = a_{13} = 0, b_{12} = 1, b_{11} = b_{13} = 0,$$

$$c_{13} = 1, c_{11} = c_{12} = 0, a_{21} = 1, a_{22} = a_{23} = 0,$$

$$b_{22} = 1, b_{21} = b_{23} = 0, c_{23} = 1, c_{21} = c_{22} = 0. \quad (139)$$

С учётом формул (131) и (133) пространственные координаты точек идеальной стереопары:

$$x_1 = x_1^0, x_2 = x_2^0,$$

$$y_1 = y_1^0, y_2 = y_2^0,$$

$$z_1 = -f, z_2 = -f. \quad (140)$$

Применяя формулы (134) и (132) получаются выражения:

$$N = \frac{B}{p^0}. \quad (141)$$

Подставляем выражение (135)+(134) в формулу:

$$X = N \cdot x_1$$

$$Y = N \cdot y_1$$

$$Z = N \cdot z_1, \text{ получаем}$$

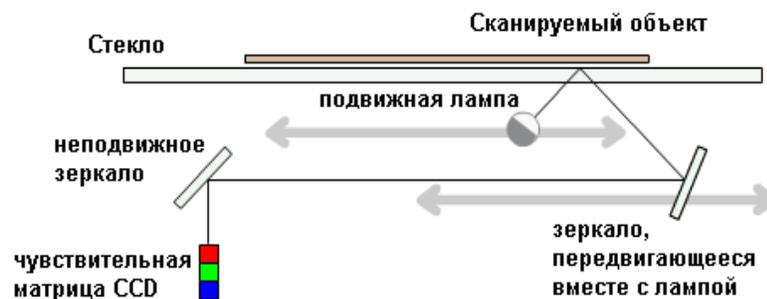
$$X = \frac{B}{p^0} \cdot x_1^0,$$

$$Y = \frac{B}{p^0} \cdot y_1^0,$$

$$Z = -\frac{B}{p^0} \cdot f.$$
(142)

## 25 СКАНИРОВАНИЕ СНИМКОВ. ПОНЯТИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ В ЦИФРОВУЮ ФОРМУ

История сканирования начинается с середины 19 века, когда в 1857 году флорентийский аббат Джованни Казелли (Giovanni Caselli) изобрёл прибор для передачи изображения на расстояние, названный впоследствии пантелеграф. Передаваемая картинка наносилась на барабан токопроводящими чернилами и считывалась с помощью иглы. В 1902 году немецким физиком Артуром Корном (Arthur Korn) была запатентована технология фотоэлектрического сканирования, получившая впоследствии название телефакс. Передаваемое изображение закреплялось на прозрачном вращающемся барабане. Луч света от лампы, перемещающейся вдоль оси барабана, проходил сквозь оригинал и через расположенные на оси барабана призму и объектив попадал на селеновый фотоприёмник. Эта технология до сих пор применяется в барабанных сканерах. В дальнейшем, с развитием полупроводников, усовершенствовался фотоприёмник, был изобретён планшетный способ сканирования, но сам принцип оцифровки изображения остается почти неизменным.



*Рисунок 42 Схема принципа сканирования документа*

Прежде чем перейти к вопросам сканирования карт, рассмотрим содержание процесса сканирования, а также принцип действия и основные характеристики устройства для сканирования.

**Сканирование** – это последовательное преобразование фотографического изображения оптических плотностей в электрические сигналы.

**Корреляция** – это анализ этих сигналов с целью определения наибольшей степени подобия между сигналами.

Сущность сканирования заключается в последовательном освещении изображения пучком света, лазерным лучом.

### **Сканирование с перекрытием отдельных участков топографической карты**

Сканирование состоит в аналого-цифровом преобразовании плоского изображения в цифровую растровую форму с помощью сканера. Сканер – устройство для ввода в компьютер графических изображений. Сканер создает цифровое изображение документа и помещает его в память компьютера.

Конструкция сканера определяется принципом его работы и способом обработки оригинала. Совершенно непохожие друг на друга планшетные, ручные, рулонные и слайдовые сканеры являются, тем не менее, очень близкими по конструкции и принципу действия. Отдельное место занимают барабанные сканеры – это пионеры в области оцифровки изображений. До недавнего времени такие сканеры были доступные лишь профессионалам из-за внушительных габаритов и высокой цены.

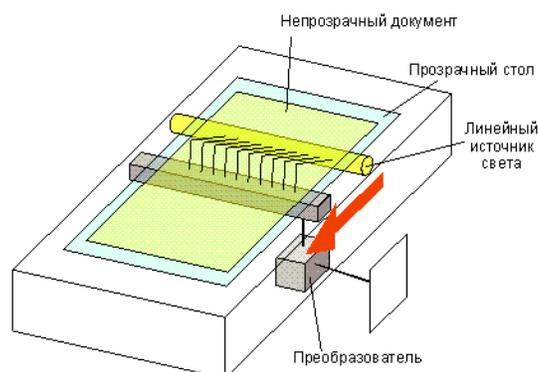
Современный сканер функционально состоит из двух частей: сканирующего механизма с встроенным контроллером (engine) и программной части (TWAIN-модуль, система управления цветом и т.д.).

### **Принцип работы сканера**

Простейший сканер работает следующим образом. Сканируемое изображение освещается белым светом. Отраженный свет через уменьшающую линзу попадает на фоточувствительный полупроводниковый элемент, называемый прибором с зарядовой связью – ПЗС (Charge-Coupled Device, CCD), в основу которого положена чувствительность проводимости  $p - n$  - перехода обыкновенного полупроводникового диода к степени его освещенности. На  $p - n$  - переходе создается заряд, который рассасывается со скоростью, зависящей от освещенности. Чем выше скорость рассасывания, тем больший ток проходит через диод. Каждая строка сканирования изображения соответствует определенным значениям напряжения на ПЗС. Эти значения напряжения преобразуются в цифровую форму через аналого-цифровой преобразователь и передают в компьютер.

Изображение всегда сканируется в формат RAW – а затем конвертируется в обычный графический формат с применением текущих настроек яркости, контрастности, и т.д. Эта конвертация осуществляется либо в самом сканере, либо в компьютере – в зависимости от модели конкретного

сканера. На параметры и качество RAW-данных влияют такие аппаратные настройки сканера, как время экспозиции матрицы, уровни калибровки белого и чёрного и др.



*Рисунок 43* Схема изображения планшетного сканера

Так, в частности работает планшетный сканер. Следует отметить, что планшетный сканер оцифровывает только двумерные изображения, расположенные в плоскости предметного стекла. Его устройство напоминает устройство цифрового фотоаппарата. Если перед линейкой светочувствительных элементов установить один большой объектив, который бы фокусировал изображение на плоскости, в которой перемещаются элементы, то сканер мог бы построчно сканировать и трехмерное изображение. Такие камеры есть и предназначены они для высокоточной съемки трехмерных объектов в стационарных условиях. Из-за построчного сканирования плоскости кадрового окна выдержка, с которой производится съемка, достигает десятков минут. Но качество изображения при этом высочайшее – максимально возможное для цифровой технологии вообще.

Для получения цветных сканируемых изображений существуют два типа сканирования - трехпроходное и однопроходное. При однопроходном сканировании линейка светочувствительных элементов последовательно фиксирует цветовые характеристики изображения для каждого из базовых цветов. То есть при каждом проходе меняется цвет подсветки (путем введения в световой поток фильтров), и линейка оцифровывает изображение для каждого базового цвета (красного, зеленого, синего). При последующем сложении цветов получается полноцветная картинка.

Трехпроходное сканирование применялось в первых цифровых сканерах и сегодня используется только в высокоточных барабанных устройствах. Современные планшетные сканеры работают по однопроходной технологии. Для оцифровки цветных изображений светочувствительные элементы делают составными из трех субэлементов. Каждый субэлемент прикрыт светофильтром одного из базовых цветов. Совокупность трех суб-

элементов со светофильтрами всех базовых цветов составляет триаду (элементы триады расположены параллельными рядами). Благодаря этому, светочувствительные элементы сканирующей линейки способны не только сканировать изображение, но и передать в компьютер его цветовые характеристики.

К основным характеристикам сканера относятся: оптическое разрешение; аппаратное разрешение; тип оптической системы; разрядность цвета; тип подключения к компьютеру.

Физическое разрешение 300 dpi

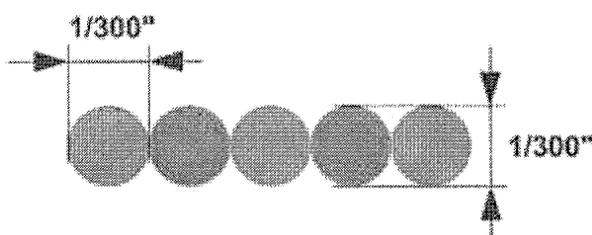


Рисунок 44 Физическое разрешение сканера

**Оптическое разрешение** (реальное или физическое разрешение) – основная характеристика сканера. Сканер снимает изображение не целиком, а по строкам. По вертикали планшетного сканера движется полоска светочувствительных элементов и снимает по точкам изображение строку за строкой. Чем больше светочувствительных элементов у сканера, тем больше точек он может снять с каждой горизонтальной полосы изображения. Обычно оптическое разрешение вычисляют по количеству точек на дюйм – dpi (dots per inch). Стандартный ряд значений разрешения планшетных сканеров выглядит так – 300, 600, 1200, 2400 точек (пикселей) на дюйм. То есть на каждом дюйме (2,54 см) сканирующей линейки расположены в ряд 300, 600, 1200 или 2400 светочувствительных элементов.

Сегодня считается нормой уровень разрешения не менее 600 dpi. Увеличивать разрешение еще дальше – значит, применять более дорогую оптику, более дорогие светочувствительные элементы, а также многократно затягивать время сканирования. Так, для обработки слайдов необходимо более высокое разрешение: не менее 1200 dpi.

**Аппаратное разрешение**, иначе его называют механическим. Рассмотрим суть аппаратного разрешения на примере планшетного сканера. Сканирование производится построчно, за один цикл линейка светочувствительных элементов считывает изображение с узкого линейного участка поверхности оригинала. Для считывания изображения с соседнего участка транспортный механизм, приводимый в действие шаговым электродвига-

телем, смещает линейку на небольшое расстояние, и процесс сканирования повторяется.

Величина шага, с которым перемещается сканирующая линейка, обозначается тоже в пикселях на дюйм. Таким образом, полное значение разрешающей способности планшетного сканера обозначается двумя величинами - разрешением по горизонтали (оптическое разрешение) и разрешением по вертикали (шаг, с которым механизм транспортировки перемещает сканирующую линейку вдоль поверхности оригинала). Координатными осями при этом служат боковые стороны предметного стекла сканера, горизонтальная ось совпадает с короткой стороной, вертикальная - с длинной стороной стекла. И светочувствительная линейка, захватывая участок от одной короткой стороны к другой, перемещается вдоль длинных сторон предметного стекла сканера.

Большинство изготовителей указывают разрешение в виде произведения двух чисел, например, 300x600 или 600x1200. Однако действительное оптическое разрешение относится лишь к одному горизонтальному направлению – оси X – и определяется числом элементов ПЗС и качеством оптики. Второй параметр, приводимый большинством изготовителей, иногда называют механическим разрешением, поскольку он указывает минимальный шаг перемещения механизма сканирования, т.е. число шагов на дюйм, которое делает сканер по вертикальной оси Y. Обычно это число вдвое больше оптического разрешения. Некоторые фирмы, торгующие сканерами, предпочитают указывать первым большее значение, например 1200x600, поскольку это производит более благоприятное впечатление. Следует понимать, что действительному оптическому разрешению соответствует меньшее значение.

**Тип оптической системы** зависит от типа светочувствительных приемных элементов. Различают устройства CCD (Charge-Coupled Device), в которых в качестве светочувствительных элементов применяются полупроводниковые приборы с зарядовой связью, и устройства CIS (Contact Image Sensor), где светочувствительными элементами служат контактные комбинированные датчики.

В CCD-сканерах используется система зеркал, установленная на каретке. Зеркала передают отраженный от изображения свет прямо на светочувствительный элемент – CCD, который в свою очередь генерирует заряд и направляет его к аналого-цифровому преобразователю (АЦП). Изображение считывается построчно, аналоговый сигнал преобразуется в цифровой код – последовательность логических нулей и единиц. Затем компьютерная программа-драйвер согласно цифровым данным восстанавливает изображение, идентичное изображению на поверхности оригинала.

Сенсоры CCD не смогут получить изображение без подсветки, поэтому в сканерах используют флуоресцентные и ксеноновые лампы. Лампы с ксеноном быстро нагреваются и обеспечивают более натуральную подсветку. Из недостатков ксенона отметим высокую стоимость, сильный нагрев и непродолжительный срок службы. Флуоресцентные лампы, в свою очередь, долго нагреваются, но излучают меньше тепла.

Второй тип сенсора – CIS. Этот тип сенсора используется только в сканерах (CCD применяют также в цифровых фото/видеокамерах). Сенсор типа CIS помещается в непосредственной близости от сканируемого объекта, система зеркал не нужна. Вместо сенсора для захвата картинка в CIS используют массив детекторов, накрытых линзами и подсвечиваемых красным, зеленым и синим диодами, которые потребляют крайне мало энергии. Как итог, многие CIS-сканеры не требуют дополнительного питания, им хватает USB/FireWire-шины.

Сканеры - CCD по сравнению с CIS – сканерами имеют глубину резкости в 10 раз больше ( $\pm 3$  мм для CCD – сканеров и  $\pm 0.3$  мм для CIS - сканеров); различают уровни оттенков  $\pm 20\%$ , тогда как CIS сканеры определяют различия в оттенках только  $\pm 40\%$ ; имеют возможность достижения более высокого оптического разрешения. Недостатком является то, что такие сканеры приходится оснащать сложной оптической системой, чтобы проецировать широкую строку изображения на миниатюрную матрицу ПЗС. Следствием этого являются большие размеры и большое энергопотребление (из-за этого питание, как правило, приходится получать только от сети). Сканеры - CIS по сравнению с CCD – сканерами имеют меньшие размеры и вес из-за отсутствия оптической системы и зеркал; меньшую цену, так как CIS-элементы заменяют целый набор компонентов сканера, уменьшая стоимость производства.

Таким образом, оптическая система CCD основана на реальной оптике и дает более высокое качество. Система CIS является системой с сенсорным датчиком, что делает ее более дешевой.

**Разрядность цвета или глубина цвета (color depth)** описывает максимальное количество цветов, которое может воспроизвести сканер. Этот параметр показывает, насколько точна информация об отсканированной точке и обычно выражается в битах на цвет или в битах на цветовой канал. Стандартом в большинстве компьютерных систем является формат *TrueColor*, в котором каждая точка кодируется тремя байтами или 24 битами (в каждом байте - восемь бит). То есть, на представление каждого основного цвета (R - красный, G - зеленый, B - синий; а вместе - RGB) отводится восемь бит. При этом общее количество цветов, которые можно закодировать, составляет более 16 миллионов. Более тонкие оттенки глаз че-

ловека не различает. Внутри сканера цвет может кодироваться и большим числом бит. Для непрофессионального пользователя это не так уж важно - на выходе он все равно получит стандартный 24-х битный цвет. Но увеличение числа разрядов внутри сканера открывает возможность цветовой коррекции изображения без внесения искажений. Причем коррекция может быть как ручной, так и автоматической. Вычислить количество воспроизводимых цветов просто - достаточно возвести двойку в степень разрядности цвета сканера, либо, если разрядность представлена в битах на канал, возвести двойку в степень разрядности цвета в канале и полученное значение возвести в куб. Например, количество цветов, воспроизводимых 24-х битным сканером (8 бит на канал) равно  $16777216$ . Иногда цифры спецификации сканера относятся к внутренней разрядности сканера, которая обычно выше выходной для того, чтобы сканер мог отбросить «шумовые» биты, отфильтровав таким образом образующиеся от влияния перекрестных и внешних помех искажения, и выдать на выходе 24-х битное изображение с максимально чистыми и точными оттенками.

#### **Тип подключения к компьютеру**

Полученное при сканировании изображение нужно передать в компьютер. Для этого сканер снабжён интерфейсом – устройством связи. Различные модели сканеров обладают разными интерфейсами. Наиболее популярные интерфейсы: USB, SCSI и нестандартные интерфейсы

*USB (Universal Serial Bus)* - универсальная последовательная шина). Появление этого стандарта объясняется тем, что возможности обычных портов компьютера (последовательного и параллельного), по мнению этих самых разработчиков, подошли к своему пределу. Порт USB предназначен для подключения практически любой периферии: модемов, принтеров, джойстиков, мышей, сканеров и мониторов, а также телефонов и цифровых камер.

*SCSI (Small Computer Systems Interface)* - интерфейс, разработанный для объединения на одной шине различных по своему назначению устройств, таких как жесткие диски, накопители на магнитооптических дисках, стримеры, сканеры и т.д. Применяется в различных архитектурах компьютерных систем. Стандарт определяет не только физический интерфейс, но и систему команд, управляющих устройствами SCSI.

*Нестандартные интерфейсы*, часто применявшиеся в так называемых ручных сканерах, плохи тем, что требуют установки в компьютер дополнительной интерфейсной карты, а значит - разбора компьютера.

Профессиональные сканеры снабжаются интерфейсом SCSI, а бытовые - USB.

## Сканирование топографических карт

Прежде чем приступать к сканированию, следует определиться в двух параметрах:

- с каким разрешением сканировать;
- с какой битностью (глубиной цвета) сканировать.

Ответы на эти вопросы зависят от того, для каких целей будет использована данная карта. Если требования минимальны, то есть карта будет использоваться только для визуального анализа, то можно особо над этим не задумываться. В таком случае достаточно будет того качества, при котором человеческий глаз различает необходимые детали. Как правило, для топографических карт масштаба 1 : 100 000 и 1 : 200 000 достаточно глубины цвета 256 indexed color (8 bit per pixel) и разрешения 300 dpi.

Если возникает желание «вытащить» из карты максимум возможного, то есть получить возможность математического анализа, полуавтоматической или автоматической векторизации, иметь возможность одновременно просматривать в проектах множество растровых тем, которые не будут загромождать друг друга аналогично векторным слоям, то с самого начала нужно быть готовым уже на этапе сканирования подходить к обработке исходного материала с величайшей тщательностью и аккуратностью.

Для того, чтобы не испытывать дополнительных трудностей в дальнейшей обработке понадобится полноцветное изображение. То есть глубина цвета (True color) — 24 bit per pixel или выше (глубины цвета 24 бита на пиксель вполне достаточно).

Что же касается разрешения, то существует простая формула:  $\delta = 2/n$ , где:  $\delta$  — разрешение, с которым следует сканировать;  $n$  — минимальная толщина линии на карте.

То есть, самая тонкая линия, начерченная на карте, должна состоять как минимум из 2 пикселей. Для топографических карт минимальная толщина линий по нормативам составляет 0.1 миллиметра. Получаем минимально достаточное разрешение — 20 пикселей на миллиметр, или 508 dpi ( $\delta = 2/n$  или 20 пикселей на мм или 508 точек на дюйм).

Если есть желание видеть на экране программы сканирования круглую цифру, то можно округлить разрешение до 600 dpi. Только нам удобнее измерять расстояния в метрах и миллиметрах, а не в дюймах и милях. Поэтому имеет смысл потерпеть значение 508 dpi, чтобы получить круглое число в метрах и миллиметрах (508 dpi — это 20 пикселей на миллиметр). Для топографических карт масштаба 1 : 200 000, это - 10 метров на пиксел.

*Замечание.* Следует учесть, что чем больше разрешение, с которым производится сканирование, тем легче становится процесс цветоделения. При этом увеличивается и размер файла. Причём, объём возрастает быст-

рее, чем разрешение. Так, при увеличении разрешения в 2 раза, объём файла возрастёт в 4 раза.

Вывод: для топографических карт достаточно выполнение следующих требований:

- разрешение — 508 или 600 dpi;
- глубина цвета 24 bpp.

Установив значения требуемых параметров можно приступить к сканированию. Сканировать фрагменты карты следует с перекрытием. Это необходимо для того, чтобы была возможность для соединения (привязки) отдельных фрагментов сканирования друг с другом.

## 26 СОВРЕМЕННЫЕ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИЕ СКАНЕРЫ

*Фотограмметрические сканеры* – это специальные приборы, способные получать изображения высокого качества и высокой точности позиционирования. Геометрическая точность результатов, полученных с помощью этого типа сканеров, подобна традиционным аналоговым и аналитическим фотограмметрическим инструментам. Такие сканеры необходимы для цифровых фотограмметрических приложений, которые имеют высокие требования к точности.

Эти приборы обычно сканируют только пленки, потому что пленки качественнее, чем бумага, хотя и пленка и бумага содержат детали и геометрию снимков. Фотограмметрические сканеры обычно имеют среднеквадратическую ошибку (СКО) точности позиционирования 4 микрона или меньше и возможность сканирования с максимальным разрешением 5...10 микрон (5 микрон эквивалентно примерно 5,000 пикселям на дюйм).

Обычное разрешение в пикселях меняется в зависимости от приложения. Снимки, используемые для триангуляции и дешифрирования, часто сканируют с разрешением 5-10 микрон. Приложения для ортотрансформирования обычно используют разрешение от 15 до 30 микрон на пиксель. Цветные снимки имеют меньшую точность, чем панхроматические, поэтому при ортотрансформировании цветных снимков используется разрешение 20...40 микрон на пиксель.

### *Настольные сканеры*

*Настольные сканеры* – это устройства общего назначения. В них недостает детальности изображения и геометрической точности фотограмметрических сканеров, но они менее дорогостоящие. При использовании

настольного сканера вы должны быть уверены, что площадь сканирования, позволяющая вводить фотографии, не меньше, чем 9x9 дюймов.

Настольные сканеры подходят для меньших областей применения, таких как цифровая фотограмметрия для ГИС или приложения дистанционного зондирования. При калибровке этих сканеров можно усовершенствовать геометрическую точность, но результаты все равно будут хуже, чем при использовании фотограмметрических сканеров. Методы корреляции изображения, которые необходимы для автоматического набора связующих точек и получения значений превышения, часто чувствительны к качеству сканирования. Следовательно, в фотограмметрическом решении могут присутствовать ошибки сканирования. IMAGINE OrthoBASE позволяет вычислять систематические ошибки сканирования.

### *Разрешение сканирования*

Одним из главных факторов, наиболее полно влияющих на точность блочной триангуляции и ортотрансформирования, является **разрешение снимка**. Разрешение снимка обычно определяется разрешением сканирования (при использовании фотоснимков) или разрешением сенсора в пикселях. Для оптимизации точности решения разрешение сканирования должно быть продумано. Подходящее разрешение сканирования определяется требованиями к точности, размером картографируемого проекта и временем, необходимым для обработки проекта. Таблица 7 показывает соотношение между разрешением сканирования в различных масштабах и размером файла, содержащего снимок.

Колонка "Разрешение снимка" содержит разрешение снимка в пикселях. Так, разрешение снимка масштабом 1:40000, сосканированного с разрешением 25 микрон [1016 точек на дюйм], составляет 1x1 метр на пиксель. Размер файла, содержащего снимок размером 9x9 дюймов, будет составлять примерно 85 МВ.

**Таблица 7. Разрешение сканирования**

	12 мкм (2117 dpi <sup>1</sup> )	16 мкм (1588dpi <sup>1</sup> )	25 мкм (1016dpi <sup>1</sup> )	50 мкм (508 dpi <sup>1</sup> )	85 мк (300 dpi <sup>1</sup> )
Масштаб снимка 1 к	Разрешение снимка, м	Разрешение снимка, м	Разрешение снимка, м	Разрешение снимка, м	Разрешение снимка, м
1800	0,0216	0,0288	0,045	0,09	0,153
2400	0,0288	0,0384	0,06	0,12	0,204

3000	0,036	0,048	0,075	0,15	0,255
3600	0,0432	0,0576	0,09	0,18	0,306
4200	0,0504	0,0672	0,0105	0,21	0,357
4800	0,0576	0,0768	0,12	0,24	0,408
5400	0,0648	0,0864	0,135	0,27	0,459
6000	0,072	0,096	0,15	0,3	0,51
6600	0,0792	0,1056	0,165	0,33	0,561
7200	0,0864	0,1152	0,18	0,36	0,612
7800	0,0936	0,1248	0,195	0,39	0,663
8400	0,1008	0,1344	0,21	0,42	0,714
9000	0,108	0,144	0,225	0,45	0,765
9600	0,1152	0,1536	0,24	0,48	0,816
10800	0,1296	0,1728	0,27	0,54	0,918
12000	0,144	0,192	0,3	0,6	1,02
15000	0,18	0,24	0,375	0,75	1,275
18000	0,216	0,288	0,45	0,9	1,53
24000	0,288	0,384	0,6	1,2	2,04
30000	0,36	0,48	0,75	1,5	2,55
40000	0,48	0,64	1	2	3,4
50000	0,6	0,8	1,25	2,5	4,25
60000	0,72	0,96	1,5	3	5,1
Размер черно- белого файла (МВ)	363	204	84	21	7
Размер цвет- ного файла (МВ)	1089	612	252	63	21

## **27 НАЗНАЧЕНИЕ И СУЩНОСТЬ ТРАНСФОРМИРОВАНИЯ СНИМКОВ**

Фотограмметрические задачи проще решаются по горизонтальным снимкам, поскольку горизонтальный снимок равнинной местности есть план. Однако чаще всего на практике, особенно при съемке из космоса, получают наклонные снимки.

Процесс преобразования наклонного снимка в горизонтальный называется *трансформированием*.

В общем случае трансформированием снимка называется преобразование наклонного снимка в горизонтальный снимок заданного масштаба или в снимок соответствующей проекции составляемой карты (плана).

Трансформирование снимков выполняется различными способами: аналитическими, графическими, фотомеханическими, оптическими и графомеханическими.

В каждом из этих способов в зависимости от исходных данных различают два метода трансформирования снимков:

- по элементам внешнего ориентирования (или по установочным элементам);
- по опорным точкам.

Аналитический способ основан на вычислении координат точек горизонтального снимка по измеренным координатам наклонного снимка.

К графическим способам относится способ сложения плоскостей, позволяющий трансформировать снимки по элементам внешнего ориентирования, и способ прямой проективной засечки, решающий эту задачу по опорным точкам. В нашем лекционном курсе данные методы в силу временных ограничений рассмотрены не были.

Фотомеханический способ основан на применении специальных приборов – фототрансформаторов. В фототрансформаторе по наклонному снимку при помощи проекционного объектива строится изображение, соответствующее горизонтальному снимку, которое фиксируется на фотобумагу.

В оптическом способе изображение, соответствующее горизонтальному снимку, получается на планшете путем оптического проектирования наклонного снимка.

Графомеханический способ позволяет получить по наклонному снимку графическое изображение соответствующее горизонтальному снимку, но решение этой задачи обеспечивает механический прибор.

Наиболее широкое применение получили аналитический и фотомеханический способы. Аналитический способ используется при построении фототриангуляционных сетей, а фотомеханический – для составления фотопланов.

На горизонтальном или трансформированном снимках нет смещений, вызванных наклоном снимка, но остаются смещения, обусловленные рельефом местности. Если местность равнинная, то этими смещениями можно пренебречь. В холмистой и горной местности это недопустимо. Чтобы уменьшить эти смещения до допустимых величин такие снимки трансфор-

мируются по частям (по зонам), а при трансформировании снимков горных районов – путем трансформирования их через щель. При этом расстояние от объектива трансформатора до экрана меняется для каждой зоны или для каждого положения щели в соответствии с рельефом местности.

## 28 СУЩНОСТЬ АНАЛИТИЧЕСКОГО СПОСОБА ТРАНСФОРМИРОВАНИЯ

Пусть на наклонном снимке измерены координаты  $x, y$  ряда точек. Тогда координаты  $x^0, y^0$  соответствующих точек горизонтального снимка находятся по формулам:

$$\left. \begin{aligned} x^0 &= -f \frac{a_1(x-x_0)+a_2(y-y_0)-a_3f}{c_1(x-x_0)+c_2(y-y_0)-c_3f}, \\ y^0 &= -f \frac{b_1(x-x_0)+b_2(y-y_0)-b_3f}{c_1(x-x_0)+c_2(y-y_0)-c_3f}, \end{aligned} \right\} \quad (143)$$

где  $f$  – фокусное расстояние объектива;

$a_i, b_i, c_i$  – направляющие косинусы, вычисленные по угловым элементам внешнего ориентирования снимка.

Если элементы внешнего ориентирования снимка неизвестны, то трансформирование можно выполнить по опорным точкам. Число опорных точек, необходимых для трансформирования снимка, определим по формулам, полученным в 136, выражающим зависимость между координатами  $X, Y$  точек местности и их координатами  $x, y$  на наклонном снимке. Положим, что  $X_S = Y_S = 0$  и  $Z - Z_S = -H$ . Тогда

$$\left. \begin{aligned} X &= -H \frac{a_1(x-x_0)+a_2(y-y_0)-a_3f}{c_1(x-x_0)+c_2(y-y_0)-c_3f}, \\ Y &= -H \frac{b_1(x-x_0)+b_2(y-y_0)-b_3f}{c_1(x-x_0)+c_2(y-y_0)-c_3f}. \end{aligned} \right\} \quad (144)$$

Разделим числитель и знаменатель данных формул на  $-c_3f$ . Получим

$$\left. \begin{aligned} X &= \frac{A_1(x-x_0)+A_2(y-y_0)+A_3f}{C_1(x-x_0)+C_2(y-y_0)+1}, \\ Y &= \frac{B_1(x-x_0)+B_2(y-y_0)+B_3f}{C_1(x-x_0)+C_2(y-y_0)+1}, \end{aligned} \right\} \quad (145)$$

где

$$A_1 = H \frac{a_1}{c_3 f}, A_2 = H \frac{a_2}{c_3 f}, A_3 = -H \frac{a_3}{c_3}, B_1 = H \frac{b_1}{c_3 f},$$

$$B_2 = H \frac{b_2}{c_3 f}, B_3 = -H \frac{b_3}{c_3}, C_1 = -\frac{c_1}{c_3 f}, C_2 = -\frac{c_2}{c_3 f}.$$

Эти восемь коэффициентов, определяющие зависимость между наклонным и горизонтальными снимками, называются *элементами трансформирования*.

Одна опорная точка позволяет составить два уравнения, содержащих восемь неизвестных. Таким образом, для определения элементов трансформирования необходимо иметь не менее четырех опорных точек.

## 29 ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОТОМЕХАНИЧЕСКОГО ТРАНСФОРМИРОВАНИЯ СНИМКОВ

Чтобы получить горизонтальный снимок, достаточно по наклонному снимку Р (рисунок 45) восстановить связку проектирующих лучей, существовавшую в момент фотографирования, установить ее относительно экрана Е в такое положение, в котором она находилась относительно горизонтальной плоскости во время съемки, и зафиксировать изображение, построенное на экране.

В качестве основных частей в фототрансформатор входят объектив S, кассета, где расположен снимок Р, экран Е и источник света L.

Фототрансформатор, в котором стоит связка лучей, подобная существовавшей в момент фотографирования, называется *фототрансформатором первого рода*.

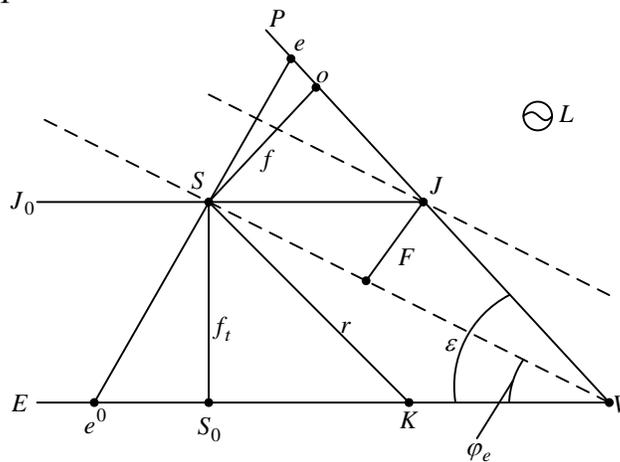


Рисунок 46 – восстановление связки проектирующих лучей

Чтобы изображение, полученное на экране фототрансформатора первого рода, соответствовало горизонтальному снимку и было достаточно

резким, необходимо выполнить следующие геометрические и оптические условия.

К числу геометрических условий относятся:

1. Отрезок  $So$ , соединяющий заднюю узловую точку объектива с главной точкой снимка, должен быть перпендикулярен к плоскости снимка и равен фокусному расстоянию снимка  $f$ .

2. Угол между снимком и экраном должен быть равен углу наклона снимка на момент фотографирования  $\varepsilon$ .

3. Главная вертикаль снимка должна находиться в плоскости угла  $\varepsilon$ .

4. Расстояние  $SS_0 = f_t$  от задней узловой точки объектива до экрана должно быть равно высоте фотографирования, выраженное в заданном масштабе трансформированного снимка  $1:t$ :

$$f_t = \frac{1}{t}H, \quad (146)$$

или, поскольку  $H = fm$ ,

$$f_t = \frac{m}{t}f = nf, \quad (147)$$

где  $m$  - главный масштаб наклонного снимка;

$n = \frac{m}{t}$  - коэффициент трансформирования снимка.

В фототрансформаторе первого рода центр проекции трансформированного снимка совпадает с передней узловой точкой объектива. Поэтому расстояние от этой точки до экрана представляет собой фокусное расстояние  $f_t$  трансформированного снимка.

Чтобы изображение снимка на экране было резким, необходимо выполнить два оптических условия:

1. Расстояние  $d = Se$  от задней узловой точки объектива по главной оптической оси до снимка и расстояние  $d' = Se^0$  от передней узловой точки до экрана должно удовлетворять основному уравнению оптики

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{d'} = \frac{1}{F}, \quad (148)$$

где  $F$  - фокусное расстояние объектива фототрансформатора.

2. Главная плоскость объектива должна проходить через линию пересечения плоскости снимка с плоскостью экрана.

Чтобы показать на рисунке фокусное расстояние объектива, воспользуемся лучом  $SJ$ , параллельным экрану  $E$ , т.е. идущем из бесконечно удаленной точки экрана в главную точку схода  $J$ .

Очевидно, что изображение бесконечно удаленной точки экрана должно быть в главной плоскости объектива, Следовательно, главная фокальная плоскость объектива должна проходить через главную точку схода перпендикулярно к главной оптической оси  $Se$ . Поэтому расстояние  $Ir$  между главной фокальной плоскостью и главной плоскостью объектива равно фокусному расстоянию объектива фототрансформатора.

Из рис.5.30 следует, что

$$F = f \frac{\sin \varphi_e}{\sin \varepsilon}. \quad (149)$$

Поэтому фототрансформатор первого рода должен быть снабжен набором объективов для трансформирования с различными коэффициентами  $n$ .

В настоящее время более широкое применение нашли фототрансформаторы второго рода, которые позволяют трансформировать снимки с различными коэффициентами при помощи одного объектива. Эта задача решается путем построения в приборе не подобной, а преобразованной связки лучей по сравнению со связкой на момент фотографирования.

Возможность трансформирования снимка с преобразованной связкой лучей можно доказать, если использовать формулы, связывающие координаты точек местности (экрана) с координатами ее изображения на снимке (см. 5.10).

$$x^0 = \frac{1}{t} X = -\frac{1}{t} H \frac{x}{y \sin \varepsilon}, \quad y^0 = \frac{1}{t} Y = -\frac{1}{t} H \frac{f}{y \sin^2 \varepsilon}. \quad (150)$$

Эти формулы записаны при условии, что начало координат  $x^0$  и  $y^0$  находится в точке  $K$ , а начало координат  $x$  и  $y$  - в точке  $J$  (рисунок 47).

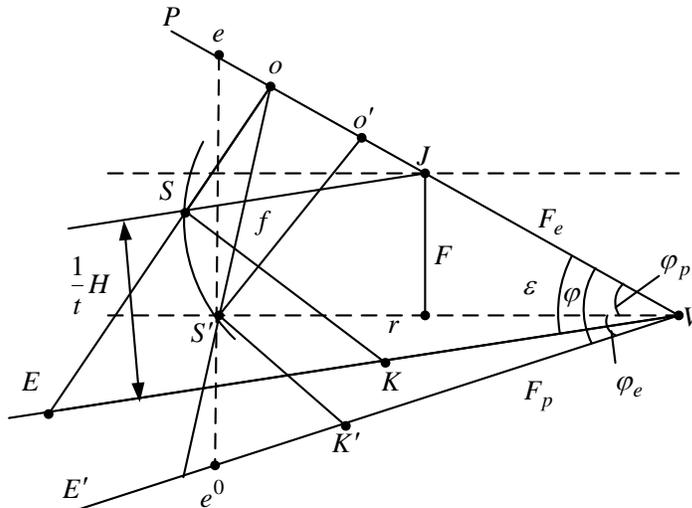


Рисунок 47

Обозначим

$$F_p = \frac{f}{\sin \varepsilon}; F_e = \frac{H}{t \sin \varepsilon}. \quad (151)$$

С учетом этого представим выражение в виде

$$x^0 = -F_e \frac{x}{y}; y^0 = F_p F_e \frac{1}{y}. \quad (152)$$

Данные формулы позволяют сделать следующий важный вывод. Если элементы  $f, H, \varepsilon$  изменяются так, что  $F_p$  и  $F_e$  остаются постоянными, то перспективная зависимость между плоскостями  $P$  и  $E$  не нарушается.

Таким образом, при изменении углов между сторонами параллелограмма  $SVK$  на экране фототрансформатора получаются одинаковые изображения, если длины этих сторон сохраняются.

Это условие выполняется во всех случаях, когда центр проекции  $S$  перемещается по окружности радиусом  $JS$  и центром в главной точке схода  $J$ , а экран вращается вокруг линии основания  $V$ , оставаясь все время параллельным прямой  $JS'$ , соединяющей центр проекции с главной точкой схода.

Стороны параллелограмма  $F_p$  и  $F_e$  называются инвариантами трансформирования снимка.

В фототрансформаторе второго рода необходимо выполнить три геометрических условия:

1. Центр проектирования или узловая точка объектива (предполагается, что передняя и задняя узловые точки фототрансформатора совмещены) должен находиться на окружности, описанной из главной точки схода  $J$  радиусом  $JS = F_p$  в плоскости  $SoJ$ , проходящей через центр проекции и главную вертикаль наклонного снимка.

2. Расстояние от главной точки схода до линии пересечения плоскости наклонного снимка с экраном должно быть

$$JV = \frac{H}{t \sin \varepsilon} = F_e. \quad (153)$$

3. Экран должен быть установлен параллельно линии  $S'J$  и перпендикулярно к плоскости  $SoJ$ .

Таким образом, при выполнении только геометрических условий в фототрансформаторе второго рода положение объектива остается неопределенным, поскольку любая точка дуги  $SS^0$  может быть принята за узловую точку и угол  $\varphi$  не определен.

Данная неопределенность устраняется при выполнении двух оптических условий, которые являются общими для фототрансформаторов первого и второго рода.

Если дано фокусное расстояние объектива фототрансформатора  $F$ , то вполне определяются углы  $\varphi_p$  и  $\varphi_e$ :

$$\sin \varphi_p = \frac{F}{F_e}; \sin \varphi_e = \frac{F}{F_p} \text{ и угол } \varphi = \varphi_e + \varphi_p. \quad (154)$$

### 30 НЕОБХОДИМОСТЬ И ВОЗМОЖНОСТЬ ТРАНСФОРМИРОВАНИЯ СНИМКОВ ХОЛМИСТОЙ И ГОРНОЙ МЕСТНОСТИ

Искажения на снимке возникают не только вследствие его наклона, но и из-за рельефа местности. Особенно такое влияние существенно при трансформировании снимков на поверхность со значительными перепадами высот. В этом случае отклонение истинного положения объекта на трансформированном снимке от его истинного положения будут очень существенны и могут достигать нескольких сотен метров.

При трансформировании снимков линейные смещения из-за рельефа местности не устраняются и в зависимости от его пересеченности станут такими, что трансформирование снимков на одну плоскость окажется невозможным. В таких случаях применяется особый случай трансформирования – процесс ортотрансформирования<sup>5</sup>.

Различают несколько способов трансформирования снимков холмистой и горной местности:

**1. Трансформирование по зонам** – способ очень трудоёмкий. Его целесообразно применять, когда количество зон не превышает трёх.

**2. Способ обратной модели (1952 г).**

**3. Ортотрансформирование** (дифференциальное трансформирование) – процесс преобразования перспективного снимка в плановый с учетом поправок за рельеф в заданной системе координат и в заданном масштабе..

Этот вид трансформирования не нужно путать с аффинным трансформированием, так как цель аффинного трансформирования – избавиться от аффинных искажений (сдвиг и сжатие).

---

**Ортотрансформирование** – это процесс получения ортофотоснимка путем последовательного проектирования исходного фотоснимка на светочувствительный материал малыми участками.<sup>5</sup>

### 31 ПРИНЦИП ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ТРАНСФОРМИРОВАНИЯ (ОРТОТРАНСФОРМИРОВАНИЯ)

В 1927 году французский ученый Жербет подал идею процесса ортотрансформирования. В 1954 году в НИИ ВТС советским ученым Жуковым был разработан щелевой фототрансформатор (ФТЩ).

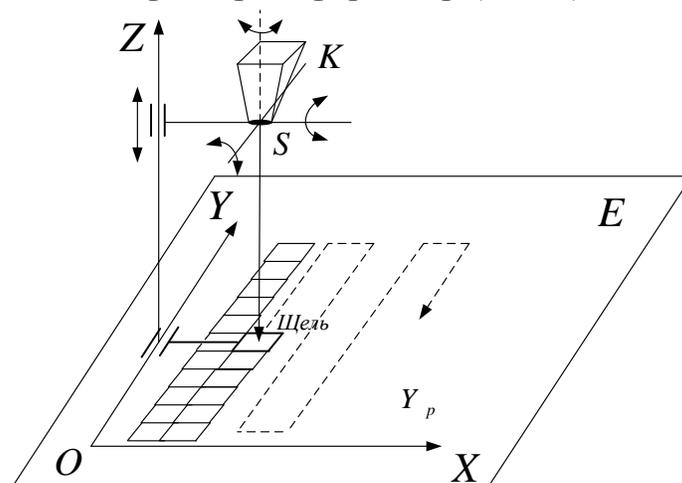


Рисунок 48 – Геометрическая сущность ортотрансформирования

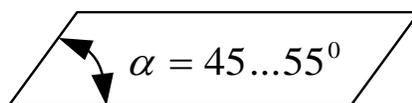


Рисунок 48-2 – Форма щели пригодная для процесса ортотрансформирования

Для трансформирования исходного снимка элементарными участками используют движущуюся щель (рисунок 48). Щель перемещается по параллельным маршрутам и последовательно проектирует на экран элементарные участки изображения. Скорость перемещения щели зависит от ширины щели и времени экспонирования.

$$v = \frac{d}{t} \tag{155}$$

где  $d$  – ширина щели (путь),  $t$  – время экспонирования. Во избежание полосатости изображения форма щели должна быть в виде параллелограмма (рисунок 2).

Длина и ширина щели, то есть ее размер меняется в зависимости от рельефа подстилающей поверхности изображенного на снимке. При увеличении размера щели сокращается объем работы по ортотрансформированию, но из-за этого увеличиваются ошибки из-за рельефа местности. По-

этому в каждом конкретном случае предвычисляют размер щели и направляют перед объективом нужную щель. На экран помещается светочувствительный материал. При проектировании постоянно изменяется высота проектирования в соответствии с профилем местности в маршруте (превышениям). В результате фотолабораторной обработки получается ортоизображение (ортоснимок) в едином масштабе.

Таким образом, *ортоснимок* – это совокупность элементарных участков, полученных ортогональным проектированием исходного изображения. В качестве исходной информации о рельефе местности может быть использована цифровая модель местности (рельефа) или горизонтали с имеющейся топографической карты.

При ортотрансформировании одиночного снимка за один прием используется способ, известный как обратная засечка. При этом для каждого изображения необходимо иметь как минимум три опорные точки. Таким образом, для трансформирования 50 аэрофотоснимков необходимо как минимум 150 опорных точек. Определение опорных точек включает в себя нахождение и измерение каждой опорной точки для каждого изображения вручную. С помощью измеренных опорных точек методом обратной засечки вычисляют положение и ориентацию камеры/сенсора на момент фотографирования. Эта информация вместе с ЦММ используется для расчета отрицательных влияний, вызываемых геометрическими искажениями. Дополнительные виды ошибок при этом не рассматриваются.

Методы ортотрансформирования одиночного изображения не используют внутренние связи между соседними снимками в блоке, необходимые для минимизации и распределения ошибок, обычно связанных с опорными точками, размерами изображения и информацией о камере/сенсоре. Однако в процессе создания мозаики, смещение между соседними снимками обычно вызывается именно теми ошибками, которые не были минимизированы и распределены по всему блоку.

## 32 НАЗНАЧЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

*Фототриангуляция* – это способ определения геодезических координат местности, основанный на обработке перекрывающихся изображений. Совокупность точек, геодезические координаты которых получены в процессе построения триангуляции называется *фотограмметрической сетью*.

*Фототриангуляцию* делят на пространственную и плановую (или плоскостную) (рисунок 49).



Рисунок 49 – Классификация фотограмметрических сетей

**Фотограмметрическая сеть** предназначена для:

1. Определения геодезических координат трансформационных точек при изготовлении специальных фотодокументов.

2. Определения геодезических координат опорных точек. Необходимых для внешнего ориентирования снимков на высокоточных фотограмметрических приборах.

3. Связи систем координат островов, материков и определения общей фигуры Земли как единственно возможной.

4. Получения геодезической основы при картографировании труднодоступных и недоступных районов (территория занята противником).

5. Использования фотограмметрических сетей при топогеодезическом обеспечении войск:

– для определения геодезических координат контурных точек при создании карт геодезических данных;

– для определения геодезических координат опорных точек с целью нанесения на снимки и фотодокументы километровой сетки;

– для определения геодезических координат опорных точек с целью создание трансформационных снимков, фотопланов и фотокарт;

– для создания геодезической основы для ракетных войск и артиллерии;

– для обеспечения геодезической основы маршрутов выдвижения ракетных войск и артиллерии для стрельбы и пуска ракет сходу;

– для определения стационарных координат целей противника).

Пространственная фототриангуляция основывается на всех математических зависимостях, имеющих между перекрывающимися снимками, и она позволяет определять по измерениям снимков координаты и отметки точек местности. Плоскостная фототриангуляция основывается на свойстве

планового снимка, заключающемся в том, что центральные углы на снимке практически равны углам на местности. Поэтому при этой фототриангуляции измеряют на снимке только центральные углы (вершины всех углов выбирают в одной центральной точке, лежащей вблизи главной точки).

Плоскостную фототриангуляцию называют также радиальной фототриангуляцией и радиалтриангуляцией, она позволяет определять по измерениям снимков только плановое положение точек. При этом считается, что углы, измеренные при центральной точке, выбранной вблизи точек нулевых искажений, надира или главной точки, мало искажаются за наклон снимка и превышения точек местности. Однако это не так, и в общем случае на наклонном снимке нет точки, при которой углы равны соответствующим горизонтальным углам на плоской местности, поэтому все центральные углы на снимке имеют искажение относительно соответствующих углов местности. Следовательно, радиальная фототриангуляция не может являться строгим методом, что обуславливает ее меньшую точность относительно пространственной фототриангуляции. Поэтому в последнее время радиальную фототриангуляцию используют лишь в отдельных случаях.

Радиальную фототриангуляцию разделяют в зависимости от технических средств, используемых для ее построения, на графическую, механическую (аналоговую), аналитическую, графо-аналитическую и др. В графической фототриангуляции углы измеряют графически, копируя центральные направления со снимка на восковку, кальку или прозрачный пластик. Полученные восковки направлений используют для построения фототриангуляционного ряда. В механической (щелевой) фототриангуляции центральные направления фиксируют пробивкой щелей на плотной бумаге, картоне, пластике. Из полученных щелевых шаблонов с помощью штифтов составляют фототриангуляционную сеть. В аналитической фототриангуляции центральные углы измеряют на специальном приборе – радиалтриангуляторе и полученные значения углов используют для вычисления координат точек фототриангуляционной сети. Вместо радиалтриангулятора можно использовать стереокомпаратор, на котором измеряют координаты точек снимка. По координатам можно определить центральные углы снимка и тем самым построить фототриангуляционную сеть. Ее можно построить и не переходя от координат точек снимка к центральным углам.

Графическую фототриангуляцию можно строить путем развития сетей треугольников, четырехугольников; одномаршрутных рядов с последующим соединением в многомаршрутные сети; одновременным развитием двухмаршрутных и многомаршрутных сетей. Из всех видов графической фототриангуляции наиболее точным является способ графической ра-

диалтриангуляции, называемый *ромбической графической* фототриангуляцией, имеющей форму элементарного звена фототриангуляционного ряда, близкую к ромбу. Для построения фототриангуляционного ряда любым способом необходимо, чтобы снимки имели продольные перекрытия свыше 60%. В результате образуются тройные продольные перекрытия снимков, что и позволяет геометрически связывать между собой отдельные звенья фототриангуляции в общий, построенный в единой координатной системе фототриангуляционный ряд.

### 33 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОТОТРИАНГУЛЯЦИИ

Геометрическая сущность заключается в построении системы треугольников, которые образованы одноименными проектирующими лучами и базисом проектирования (рисунок 50).

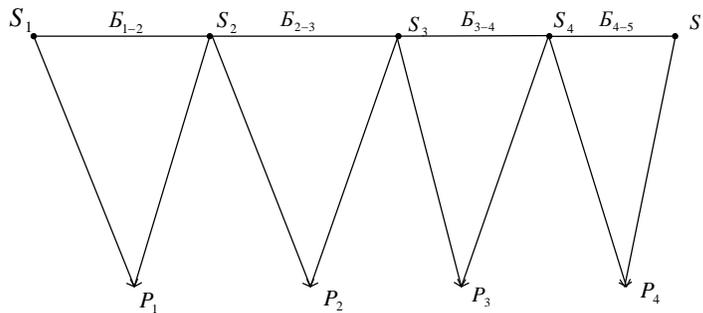


Рисунок 50 – Геометрическая сущность фототриангуляции

Соединение элементарных звеньев в единую модель маршрута или блока производится по связующим точкам (общим точкам между смежными моделями). В результате соединения звеньев образуется свободная фотограмметрическая сеть.

$$\begin{aligned} x_p - x_0 &= -f \cdot \left[ \frac{m_{11} \cdot (X_p - X_s) + m_{12} \cdot (Y_p - Y_s) + m_{13} \cdot (Z_p - Z_s)}{m_{31} \cdot (X_p - X_s) + m_{32} \cdot (Y_p - Y_s) + m_{33} \cdot (Z_p - Z_s)} \right] \\ y_p - y_0 &= -f \cdot \left[ \frac{m_{21} \cdot (X_p - X_s) + m_{22} \cdot (Y_p - Y_s) + m_{23} \cdot (Z_p - Z_s)}{m_{31} \cdot (X_p - X_s) + m_{32} \cdot (Y_p - Y_s) + m_{33} \cdot (Z_p - Z_s)} \right], \end{aligned} \quad (156)$$

где  $x_p, y_p$  – плоские прямоугольные координаты точек на изображении;  
 $x_0, y_0, f$  – элементы внутреннего ориентирования;  
 $X_p, Y_p, Z_p$  – пространственные координаты точки на поверхности Земли;  
 $X_s, Y_s, Z_s$  – координаты вектора положения КА;

$m_{ij}$  – коэффициенты направляющих косинусов луча визирования в приборной системе координат.

**Блочная триангуляция** – это процесс установления математической связи между снимками, содержащимися в общей модели, моделью камеры/сенсора и поверхностью земли. Данные, полученные в результате блочной триангуляции, необходимы в качестве исходной информации для ортотрансформирования, создания ЦММ и стереопары. Термин аэротриангуляция обычно используется при обработке данных аэросъемки. Термин блочная триангуляция или просто триангуляция используется при обработке спутниковых снимков. Методы отличаются только видом снимков, используемых для обработки.

Классическая триангуляция, применяющая оптико-механические аналоговые и аналитические стереопроекторы, главным образом используется для сбора опорных точек с помощью метода, известного как расширение опорной сети. Для сбора опорных точек на больших площадях фотограмметрические методы подходят лучше, чем традиционные методы наземной съемки, так как затраты при использовании наземной съемки очень велики. Расширение опорной сети включает в себя измерение по фотографиям вручную наземных точек, которые находятся в области перекрытия снимков. Эти наземные точки обычно называются связующими точками. Наземные координаты связующих точек могут быть определены с использованием фотограмметрических методов, применяющих аналоговые или аналитические стереопроекторы. Эти точки затем определяются как наземные опорные точки. С приходом цифровой фотограмметрии классическая фотограмметрия расширила свои функциональные возможности. IMAGINE OrthoBASE использует математический метод, известный как уравнивание блока по методу связок для аэротриангуляции. Уравнивание по методу связок обеспечивает три главные функции:

- определение местоположения и ориентации каждого снимка в проекте на момент съемки. Результирующие параметры определяются как параметры внешнего ориентирования. Для оценки параметров внешнего ориентирования необходимы минимум три опорные точки по всему блоку, независимо от количества снимков, содержащихся в проекте;

- определение наземных координат любой из связующих точек, которая была измерена вручную или автоматически в области перекрытия нескольких снимков. Высокоточное определение наземных координат связующих точек по снимку более удобно для формирования опорных точек, чем наземная съемка. Также, если сформировано большое количество наземных точек, в IMAGINE OrthoBASE с использованием инструмента

Create Surface (Создать Поверхность) может быть получена цифровая модель местности;

– минимизация и распределение ошибок, связанных со снимком, измерениями, опорными точками и другими факторами. С помощью уравнивания по методу связей можно обработать информацию для всего блока в одном уравнении (то есть связке), используя статистические методы (то есть, регулирующий компонент) автоматического определения, распределения и удаления ошибок.

Так как изображения обрабатываются за один прием, проблема смещения полученных снимков относительно друг друга при создании мозаики решена.

### **34 АНАЛИТИЧЕСКАЯ ФОТОТРИАНГУЛЯЦИЯ**

*Аналитическая фототриангуляция* (97% по сгущению планово-высотной основы) – это способ определения геодезических координат местности, основанный на обработке перекрывающихся изображений с использованием высокоточных вычислительных машин и автоматизированных стереокомпараторов.

#### **Преимущества аналитической фототриангуляции**

1. Высокая точность определения геодезических координат точек местности. Это достигается применением высокоточных измерительных приборов (ЭВМ) для измерения плоских прямоугольных координат точек снимков с возможностью учёта всех видов систематических ошибок снимков, которые можно описать математически (строгие математические зависимости).

2. Высокая производительность, которая достигается применением высокоточных автоматизированных стереокомпараторов, позволяющих в автоматизированном режиме зафиксировать результаты измерения снимков на носителе исходной информации.

3. Универсальность, которая позволяет применять для построения фотограмметрических сетей разнородные изображения.

#### **Способы маршрутной аналитической фототриангуляции**

Способы аналитической фототриангуляции подразделяются на три основных вида:

1) Способ частично-зависимых моделей. Сущность этого способа заключается в том, что в системе координат  $S_1X_1Y_1Z_1$  строятся все модели, масштаб которой произвольный.

2) Способ независимых моделей. Данный способ основан на построении абсолютно-независимых моделей, которые объединяются в общую модель по связующим точкам.

3) Способ связок. Этот способ применяется не так широко при построении маршрутной фототриангуляции и при построении блочных сетей.

### 35 СИСТЕМЫ КООРДИНАТ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В АНАЛИТИЧЕСКОЙ ФОТОТРИАНГУЛЯЦИИ

1) Прямоугольная система координат снимка (рисунок 51)

$$\left. \begin{matrix} x_1, y_1 \\ x_2, y_2 \end{matrix} \right\} \Rightarrow \left. \begin{matrix} X_1, Y_1, Z_1 \\ X_2, Y_2, Z_2 \end{matrix} \right\} \Rightarrow X, Y, Z (\text{модель}) \Rightarrow X_2, Y_2, Z_2 (B, L, H - \text{местность}) \quad (157)$$

где: 1)  $O_1x_1y_1$  и  $O_2x_2y_2$  – плоская прямоугольная система координат снимка. В качестве осей координат в этих системах применяются линии, соединяющие противоположные координатные метки 1, 2, 3 и 4 (рисунок 51).

где  $O_1$  – центр снимка (начало системы координат);

1, 2, 3, 4 – координатные метки снимка;

$O_1xy$  – система координат снимка;

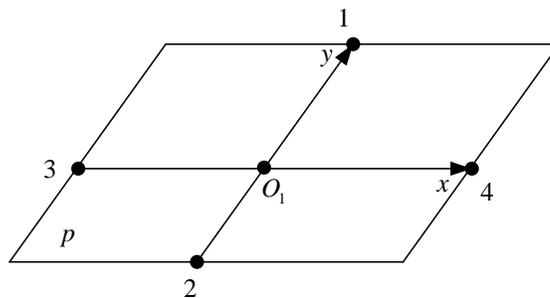


Рисунок 51 Прямоугольная система координат снимка

2) Вспомогательная система координат снимка (рисунок 52)  $S_1x_1y_1z_1$  и  $S_2x_2y_2z_2$ . Начало систем координат совмещается с центрами проекций  $S_1$  и  $S_2$ .

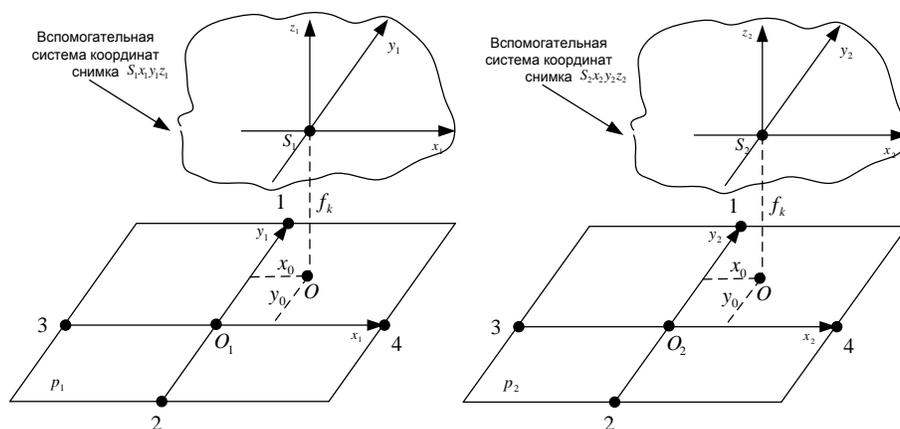


Рисунок 52 Вспомогательная система координат снимка

3) Базисная система координат  $S_1x'_1y'_1z'_1$  и  $S_2x'_2y'_2z'_2$ . Оси координат параллельны между собой и отличаются только началом. Начало системы координат совмещается с центром проекции левого снимка  $S_1$  (рисунок 52). Ось  $x'$  совмещается с базисом съёмки. Ось  $z'$  лежит в главной базисной плоскости левого снимка.  $y'$  – дополняет систему до правой. В этой системе координат определяются пространственные координаты точек снимков  $x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2$  и пространственные координаты точек модели  $x, y, z$ .

4) Пространственная система координат модели  $S_1X_1Y_1Z_1$  и  $S_2X_2Y_2Z_2$ . Начало системы координат совмещается с точкой съёмки левого снимка. Ось  $X$  приблизительно направлена вдоль линии съёмки. Ось  $Z$  приблизительно совмещается с нормалью к Земному эллипсоиду. Ось  $Y$  дополняет систему до правой. В этой системе координат определяются пространственные координаты точек  $X_1, Y_1, Z_1$  для левого снимка и пространственные координаты точек  $X_2, Y_2, Z_2$  для правого снимка, а также пространственные координаты точек модели  $X, Y, Z$ , пространственные координаты точек модели маршрута.

### 36 ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ КООРДИНАТ ОПОРНЫХ ТОЧЕК И ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИХ КООРДИНАТ ТОЧЕК СЕТИ

1. Координаты точек свободной фотограмметрической сети определяются в пространственной прямоугольной системе координат, масштаб

которой в общем случае по всем направлениям постоянный. Это обеспечивает определение координат без каких-либо методических ошибок

2. Плановые координаты опорных точек даются в плоской прямоугольной системе координат, которая в пределах каждой  $b^0$  зоне имеет своё начало. Плановые координаты в этой системе вычисляются в проекции Гаусса, масштаб которой непостоянный и на границе зоны может достигать величины 1:1000.

3. Высоты опорных точек заданы в Балтийской системе высот и отсчитываются по нормальям к поверхности Референс-эллипсоида, то есть от уровенной поверхности, а фотограмметрические высоты от плоскости  $XU$  по перпендикулярам.

4. При построении фототриангуляции на большие расстояния она может располагаться в нескольких  $b^0$ -х зонах.

При ориентировании фотограмметрических сетей большой протяжённости используют геоцентрические координаты опорных точек.

Начало этой системы  $O_{\bar{A}}$  совмещают с центром Земного эллипсоида. Ось  $X_{\bar{A}}$  геоцентрической системе координат совмещают с линией пересечения экватора и плоскости, проходящей через Гринвический меридиан (начальный). Ось  $Z_{\bar{A}}$  системы координат совмещается с осью вращения земного эллипсоида. Ось  $Y_{\bar{A}}$  – дополняет систему до правой. Однако эта система координат (хотя она является единой) для внешнего ориентирования ещё не пригодна, так как её оси не параллельны осям фотограмметрической системы координат.

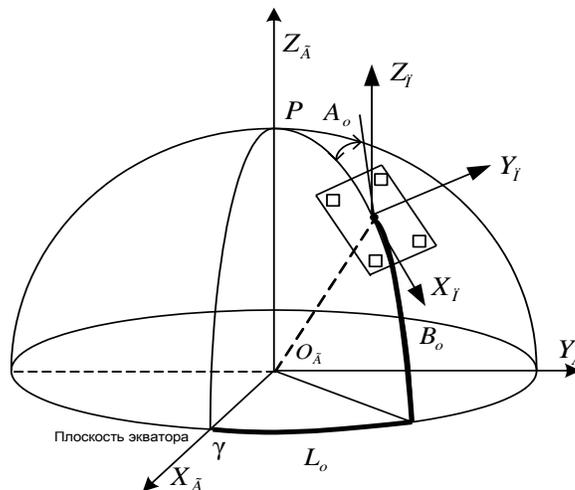


Рисунок 53 – Преобразования координат с применением промежуточной системы координат

На практике используется промежуточная система координат (рисунок 53), начало которой совмещается с центром тяжести опорной точки. Ось  $X_{\bar{f}}$  – направлена вдоль маршрута. Ось  $Z_{\bar{f}}$  совмещается с нормалью к поверхности Земного эллипсоида, а ось  $Y_{\bar{f}}$  дополняет систему до правой.

$A_0$  – азимут съёмки;  $L_0$  – долгота точки;  $B_0$  – широта точки.

Чтобы перейти к промежуточной системе координат, в которой выполнено внешнее ориентирование и устранение деформации модели, необходимо:

- выполнить параллельный перенос геоцентрической системы координат и совместить точки  $O_{\bar{A}}$  и  $O_{i0}$ ;
- повернуть геоцентрическую систему координат на углы  $A_0, L_0, B_0$ .
- после этих преобразований оси геоцентрической и промежуточной систем координат станут приблизительно параллельными.

### **37 ВНЕШНЕЕ ОРИЕНТИРОВАНИЕ СВОБОДНОЙ СЕТИ И ПЕРЕХОД К ГЕОДЕЗИЧЕСКИМ КООРДИНАТАМ**

От геодезических координат  $\rightarrow$  к геодезическим сферическим координатам  $B, L \rightarrow$  к геоцентрическим  $X_{\bar{A}}, Y_{\bar{A}}, Z_{\bar{A}} \rightarrow$  к промежуточным  $X_{\bar{f}}, Y_{\bar{f}}, Z_{\bar{f}}$ .

*Переход от геоцентрических в промежуточные координаты*

$$X_{O\bar{A}} = \frac{\sum_1^n X_{\bar{A}}}{n}, Y_{O\bar{A}} = \frac{\sum_1^n Y_{\bar{A}}}{n}, Z_{O\bar{A}} = \frac{\sum_1^n Z_{\bar{A}}}{n}. \quad (158)$$

Затем осуществляется параллельный перенос:

$$\begin{aligned} X'_n &= X_{\bar{A}} - X_{O\bar{A}}, \\ Y'_n &= Y_{\bar{A}} - Y_{O\bar{A}}, \\ Z'_n &= Z_{\bar{A}} - Z_{O\bar{A}}. \end{aligned} \quad (159)$$

Следующим шагом является разворот на углы  $A_0, L_0, B_0$ :

$$B_0 = \frac{\sum B}{n}, L_0 = \frac{\sum L}{n}, A_0 \text{ – определяется по карте.}$$

Если маршрут – по параллелям  $\rightarrow A_0 = 90^0$ ;

Если маршрут – по меридианам  $\rightarrow A_0 = 0^0$  или  $A_0 = 180^0$ .

$$\left. \begin{aligned} X_i &= X'_i \cdot a_1 + Y'_i \cdot b_1 + Z'_i \cdot c_1 \\ Y_i &= X'_i \cdot a_2 + Y'_i \cdot b_2 + Z'_i \cdot c_2 \\ Z_i &= X'_i \cdot a_3 + Y'_i \cdot b_3 + Z'_i \cdot c_3 \end{aligned} \right\}, \quad (160)$$

где  $a_i, b_i, c_i$  – значение направляющих косинусов, вычисленных по углам  $A_0, L_0, B_0$ .

После проделанных операции оси геодезической и фотограмметрической систем координат будут приблизительно параллельно. Следующий этап заключается в процессе внешнего ориентирования и устранения деформации модели.

Устранение деформации модели маршрута выполняется также с использованием полиномов. Для каждой опорной точки составляется уравнение деформации, уравнение поправок, система нормальных уравнений, после решения которых находятся неизвестные коэффициенты характеризующие деформацию модели маршрута. Поправки вводятся во все точки. После этих операций осуществляется обратный переход от координат  $X_i, Y_i, Z_i$  промежуточной системы к геодезическим  $B, L$ , к сферическим координатам  $\rightarrow$  к геоцентрическим  $X_{\bar{A}}, Y_{\bar{A}}, Z_{\bar{A}}$   $\rightarrow$  к прямоугольным.

### **38 СУЩНОСТЬ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНОГОМАРШРУТНОЙ ФОТОТРИАНГУЛЯЦИИ**

**Триангуляция** – есть процесс установления математической зависимости между изображениями, сенсором и землёй. Основная цель пространственной фототриангуляции – максимально сократить трудоёмкие полевые геодезические работы, заменив их камеральными. Пространственная фототриангуляция может применяться и для решения нетопографических задач, например, для изучения траектории, скорости и других параметров, характеризующих поведение самолёта и других летящих объектов.

Сущность пространственной фототриангуляции состоит в построении модели местности по снимкам, принадлежащим одному или нескольким маршрутам, и ориентировании её относительно опорной системы координат (1...3). В зависимости от числа маршрутов, используемых для построения модели местности, пространственную фототриангуляцию подразделяют на одномаршрутную или маршрутную и многомаршрутную или блоковую.

Маршрутная фототриангуляция строится по снимкам, принадлежащим одному маршруту. При этом маршрут должен иметь опорные точки,

необходимые для ориентирования модели относительно опорной системы координат. Маршрутная или блоковая фототриангуляция развивается по снимкам, принадлежащим двум маршрутам и более. Для её построения нет необходимости обеспечивать опорными точками каждый маршрут, достаточно иметь несколько опорных точек на весь блок. Блоковая фототриангуляция позволяет в значительной степени сократить полевые геодезические работы по сравнению с маршрутной, что имеет исключительно важное значение, особенно при картографировании труднодоступных и недоступных территорий.

Различают ещё фототриангуляцию без использования элементов внешнего ориентирования снимков и фототриангуляцию с использованием элементов внешнего ориентирования для части снимков, зарегистрированных в полёте. Использование в фототриангуляции элементов внешнего ориентирования снимков и других дополнительных данных, например координат центров проекций, приводит также к значительному сокращению полевых геодезических работ.

К источникам ошибок относятся:

- дисторсия объектива фотокамеры;
- кривизна Земли;
- деформации снимков другие.

Модуль IMAGINE OrthoBASE позволяет проводить триангуляцию и создавать ортофото для широкого набора снимков. Встроенные модели сенсоров обеспечивают поддержку стандартных, аэрофотосъёмочных камер: 35 мм и цифровых любительских камер на ПЗС матрицах, видеокамер, данных SPOT и IRS-1C. Пользователю предоставляется возможность задания параметров своих сенсоров в рамках обобщённой модели оптико-электронного сенсора (generic pushbroom sensor). Для проведения триангуляции могут использоваться не только аэро- и космические изображения, но и изображения, полученные под большим углом к снимаемому объекту или к земной поверхности (close-range photogrammetry – короткобазисная фотограмметрия).

IMAGINE OrthoBASE – очень гибкий программный продукт, который совместим как с другими существующими фотограмметрическими пакетами, так и с аналитическими стереоплоттерами (позволяет импортировать элементы внешнего ориентирования).

IMAGINE OrthoBASE поставляется как дополнительный модуль расширения для ERDAS IMAGINE Advantage и является альтернативой для персонального компьютера с Windows другому программному продукту – IMAGINE OrthoMAX для UNIX рабочих станций.

## 39 БЛОЧНАЯ ФОТОТРИАНГУЛЯЦИЯ

**Блочная триангуляция** – это процесс установления математической связи между снимками, содержащимися в проекте, моделью камеры/сенсора и поверхностью земли. Данные, полученные в результате блочной триангуляции, необходимы в качестве исходной информации для ортотрансформирования, создания ЦММ и стереопары. Термин аэротриангуляция обычно используется при обработке данных аэросъемки. Термин блочная триангуляция или просто триангуляция используется при обработке спутниковых снимков. Методы отличаются только видом снимков, используемых для обработки.

Классическая триангуляция, применяющая оптико-механические аналоговые и аналитические стереопроекторы, главным образом используется для сбора опорных точек с помощью метода, известного как расширение опорной сети. Для сбора опорных точек на больших площадях фотограмметрические методы подходят лучше, чем традиционные методы наземной съемки, так как затраты при использовании наземной съемки очень велики. Расширение опорной сети включает в себя измерение по фотографиям вручную наземных точек, которые находятся в области перекрытия снимков. Эти наземные точки обычно называются связующими точками. Наземные координаты связующих точек могут быть определены с использованием фотограмметрических методов, применяющих аналоговые или аналитические стереопроекторы. Эти точки затем определяются как наземные опорные точки. С приходом цифровой фотограмметрии классическая фотограмметрия расширила свои функциональные возможности. IMAGINE OrthoBASE использует математический метод, известный как уравнивание блока по методу связей для аэротриангуляции. Уравнивание по методу связей обеспечивает три главные функции:

- определение местоположения и ориентации каждого снимка в проекте на момент съемки. Результирующие параметры определяются как параметры внешнего ориентирования. Для оценки параметров внешнего ориентирования необходимы минимум три опорные точки по всему блоку, независимо от количества снимков, содержащихся в проекте;

- определение наземных координат любой из связующих точек, которая была измерена вручную или автоматически в области перекрытия нескольких снимков. Высокоточное определение наземных координат связующих точек по снимку более удобно для формирования опорных точек, чем наземная съемка. Также, если сформировано большое количество наземных точек, в IMAGINE OrthoBASE с использованием инструмента

Create Surface (Создать Поверхность) может быть получена цифровая модель местности;

– минимизация и распределение ошибок, связанных со снимком, измерениями, опорными точками и другими факторами. С помощью уравнивания по методу связок можно обработать информацию для всего блока в одном уравнении (т.е. связке), используя статистические методы (то есть, регулирующий компонент) автоматического определения, распределения и удаления ошибок.

Так как изображения обрабатываются за один прием, проблема взаимного смещения полученных снимков при создании мозаики решена.

#### 40 КЛАССИФИКАЦИЯ ОШИБОК ФОТОТРИАНГУЛЯЦИИ

**Фототриангуляция** – это способ определения геодезических координат местности, основанный на обработке перекрывающихся изображений. Совокупность точек, геодезические координаты которых получены в процессе построения триангуляции называется **фотограмметрической сетью**.

**Фотограмметрическая сеть** предназначена для:

1. определения геодезических координат трансформационных точек при изготовлении специальных фотодокументов;

2. определения геодезических координат опорных точек, необходимых для внешнего ориентирования снимков на высокоточных фотограмметрических приборах;

3. связи систем координат островов, материков и определения общей фигуры Земли как единственно возможной;

4. получения геодезической основы при картографировании труднодоступных и недоступных районов (территория, занятая противником);

5. использования фотограмметрических сетей при топогеодезическом обеспечении войск, в частности:

– для определения геодезических координат контурных точек при создании карт геодезических данных;

– для определения геодезических координат опорных точек с целью нанесения на снимки и фотодокументы километровой сетки;

– для определения геодезических координат опорных точек с целью создание трансформационных снимков, фотопланов и фотокарт;

– для создания геодезической основы для ракетных войск и артиллерии;

– для обеспечения геодезической основы маршрутов выдвижения ракетных войск и артиллерии для стрельбы и пуска ракет сходу;

– для определения стационарных координат целей противника).



Рисунок 54 – Классификация ошибок фототриангуляции

1. Ошибки геодезической основы воздействуют на процесс построения фототриангуляции на этапе внешнего ориентирования и устранения деформации сети через ошибки геодезических координат опорных точек, точек полевой подготовки и ошибки дополнительных данных (элементы внешнего ориентирования).

2. Ошибки геометрического построения изображения вызываются физическими факторами.

3. Ошибки измерения снимков связаны с инструментальными погрешностями приборов, организацией работ и личными ошибками оператора.

4. Методические ошибки возникают в случае применения нестрогих математических зависимостей или несоответствия геодезической и фотограмметрической систем координат.

Промахи – это погрешности, приводящие к явному искажению результатов измерений. Все измерения, содержащие промахи должны быть исключены. Главным образом, промахи вызваны неопытностью, невнимательностью, усталостью наблюдателя. Наиболее часто встречаются промахи:

- неправильное снятие отсчётов по шкалам прибора, сделанный не в том направлении шкалы (10,450...9,550);
- неправильная запись отсчётов со шкал прибора.

Грубые ошибки возникают в следствии сбоя приборов (ЭВМ) и вызывают большие отклонения измерений.

В свою очередь все погрешности подразделяют на **систематические и случайные**.

### Источники ошибок

#### *Источники погрешностей фототриангуляции*

- 1) погрешности координат опорных точек;
- 2) погрешности дополнительных данных;
- 3) погрешности снимков:
  - дисторсия объектива;
  - рефракция;

– деформация материала.

*Основные источники измерения снимков*

- инструментальные погрешности прибора (ЭВМ);
- погрешности ориентирования снимков на приборе;
- погрешности опознавания точек на изображении.

#### **41 ВЛИЯНИЕ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ОШИБОК НА ДЕФОРМАЦИЮ МАРШРУТНОЙ ФОТОТРИАНГУЛЯЦИИ**

Под воздействием погрешностей снимков, прибора и наблюдателя возникают погрешности определения элементов взаимного ориентирования. Перечисленные погрешности оказывают влияния на точность измерения плоских (пиксельных) координат точек снимков  $x_1, y_1$  и  $x_2, y_2$  (рисунок 1).

Погрешности координат точек одиночной модели $\delta X, \delta Y, \delta Z$	Погрешности ЭВО присоединяемой модели	Погрешности координат точек модели маршрута (фотограмметрические погрешности)
--	---------------------------------------	---

$$\begin{aligned}
 \delta X &= m \cdot \left[ \delta x_1 + \left( \frac{f \cdot x_1}{b} + \frac{b \cdot x_1}{f} - \frac{2 \cdot x_1}{f} + \frac{x_1^2}{b \cdot f} \right) \cdot \delta \Delta \alpha - \left( \frac{x_1 \cdot y}{f} - \frac{x_1^2 \cdot y}{b \cdot f} \right) \cdot \delta \Delta \omega - \right. \\
 &\quad \left. - \frac{x_1 \cdot y}{b} \cdot \delta \Delta \chi - \left( \frac{b \cdot x_1}{f} - \frac{x_1^2}{f} \right) \cdot \delta v' \right], \\
 \delta Y &= m \cdot \left[ \delta y_1 + \left( \frac{f \cdot y}{b} + \frac{b \cdot y}{f} - \frac{2 \cdot x_1 \cdot y}{f} + \frac{x_1^2 \cdot y}{b \cdot f} \right) \cdot \delta \Delta \alpha - \left( \frac{y^2}{f} - \frac{x_1 \cdot y^2}{b \cdot f} \right) \cdot \delta \Delta \omega - \right. \\
 &\quad \left. - \frac{y^2}{b} \cdot \delta \Delta \chi - \left( \frac{b \cdot y}{f} - \frac{x_1 \cdot y}{f} \right) \cdot \delta v' \right], \\
 \delta Z &= m \cdot \left[ \delta f - \left( \frac{f^2}{b} + b - 2 \cdot x_1 + \frac{x_1^2}{b} \right) \cdot \delta \Delta \alpha - \left( y - \frac{x_1 \cdot y}{f} \right) \cdot \delta \Delta \omega - \right. \\
 &\quad \left. - \frac{f \cdot y}{b} \cdot \delta \Delta \chi - (b - x_1) \cdot \delta v' \right]. \tag{161}
 \end{aligned}$$

Предполагается, что при построении первой модели допущена погрешность  $\delta Z_1$  (рисунок 55).

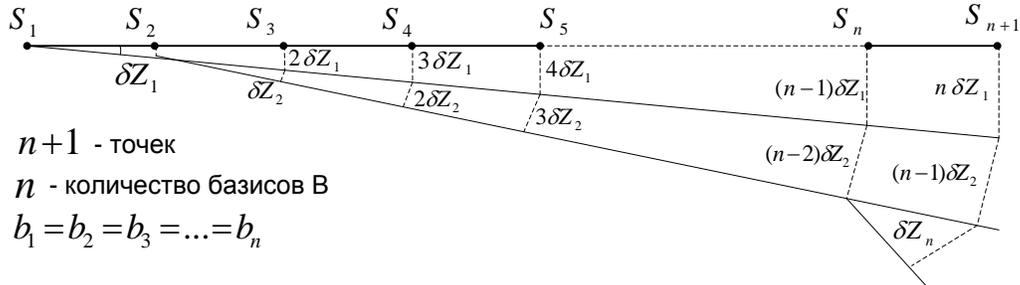


Рисунок 55 – Накопление ошибок при построении маршрутной фототриангуляции

$$\delta Z'_n = n \cdot \delta Z_1 + (n-1) \cdot \delta Z_2 + (n-2) \cdot \delta Z_3 + \dots + 2 \cdot \delta Z_{n-1} + \delta Z_n \quad (162)$$

Предполагается, что  $\delta Z_1 = \delta Z_2 = \delta Z_3 = \dots = \delta Z_n = \delta Z$ , тогда

$$\delta Z'_n = [n + (n-1) + (n-2) + \dots + 2 + 1] \cdot \delta Z = \frac{1+n}{2} \cdot n \cdot \delta Z. \quad (163)$$

$$S'_\Sigma = \frac{S_1 + S_n}{2} \cdot n = \frac{(1+n)}{2} \cdot n. \quad (164)$$

$$\delta X'_n = \frac{n \cdot (1+n)}{2} \cdot \delta X,$$

$$\delta Y'_n = \frac{n \cdot (1+n)}{2} \cdot \delta Y,$$

$$\delta Z'_n = \frac{n \cdot (1+n)}{2} \cdot \delta Z. \quad (165)$$

Формулы (5) характеризуют накопление погрешностей в маршрутной сети.  $\delta X$ ,  $\delta Y$ ,  $\delta Z$  – погрешности определения координат точек модели, вычисленные по формулам (150). Формулы (156) позволяют оценивать накопление погрешностей если опорные точки расположены в начале маршрута. Если опорные точки располагаются в конце маршрута, то формулы принимают вид (рисунок 56).

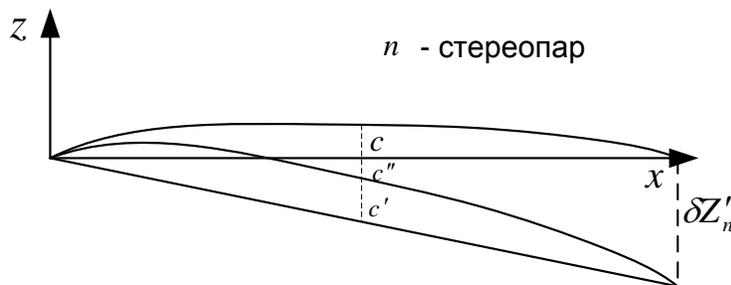


Рисунок 56 – Накопление погрешности при построении сети фототриангуляции в случае расположения опорных точек в конце маршрута

Максимальное значение погрешности в середине сети.

$$\begin{aligned}
 cc' &= \frac{1}{2} \cdot \delta Z'_n, \\
 cc'' &= \delta Z'_{n/2}, \\
 c'c'' &= \delta Z'_c = \delta Z'_{n/2} - \frac{1}{2} \cdot \delta Z'_n, \\
 \delta Z'_c &= \left[ \frac{n/2 \cdot (1+n/2)}{2} - \frac{1}{2} \cdot \frac{n \cdot (1+n)}{2} \right] \cdot \delta Z = -\frac{n^2}{8} \cdot \delta Z
 \end{aligned} \tag{166}$$

Для всех точек погрешности в измерениях координат принимают вид:

$$\begin{aligned}
 \delta X'_c &= -\frac{n^2}{8} \cdot \delta X, \\
 \delta Y'_c &= -\frac{n^2}{8} \cdot \delta Y, \\
 \delta Z'_c &= -\frac{n^2}{8} \cdot \delta Z.
 \end{aligned} \tag{167}$$

Из анализа зависимостей (7) следует, что накопление погрешностей в сети триангуляции приблизительно равны квадрату числа стереопар в маршруте, то есть накапливаются ошибки по параболической зависимости.

Из формул (5) и (7) следует, что наличие опорных точек на обоих концах маршрута снижает накопление ошибки более, чем в 4 (четыре) раза.

Максимальные погрешности имеют точки расположенные середине сети, равноудалённые от опорных точек.

Ошибки в координатах точек моделей маршрута из-за влияния систематических погрешностей снимков могут достигать значительных величин.

Для минимизации погрешностей необходимо:

- обеспечить маршрут необходимым количеством опорных точек;
- определить ЭВЗО;
- при вычислениях использовать полиномы и уравнения для устранения деформации, которые полно бы описывали её.

## **42 ВЛИЯНИЕ СЛУЧАЙНЫХ ОШИБОК НА ТОЧНОСТЬ ПОСТРОЕНИЯ ФОТОТРИАНГУЛЯЦИИ**

Для определения влияния случайных ошибок на точность построения фототриангуляции оценивается среднеквадратическая погрешность измерения.

$$m_{z'_n}^2 = [n^2 \cdot m_{z_1}^2 + (n-1)^2 \cdot m_{z_2}^2 + (n-2)^2 \cdot m_{z_3}^2 + \dots + 2^2 \cdot m_{z_{n-1}}^2 + m_{z_n}^2] \quad (168)$$

Для равноточных измерений  $m_{z_1} = m_{z_2} = m_{z_3} = \dots = m_{z_n} = m_z$ . В этом случае формула (8) принимает вид:

$$m_{z'_n}^2 = [n^2 + (n-1)^2 + (n-2)^2 + \dots + 2^2 + 1] \cdot m_z^2. \quad (169)$$

$$S_\Sigma = \frac{n \cdot (2 \cdot n + 1) \cdot (n + 1)}{6} = \frac{2 \cdot n^3 + 3 \cdot n^2 + n}{6} \quad (170)$$

$$m_{x_n} = \left( \frac{2 \cdot n^3 + 3 \cdot n^2 + n}{6} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot m_x,$$

$$m_{y_n} = \left( \frac{2 \cdot n^3 + 3 \cdot n^2 + n}{6} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot m_y,$$

$$m_{z_n} = \left( \frac{2 \cdot n^3 + 3 \cdot n^2 + n}{6} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot m_z. \quad (171)$$

Если число базисов  $n \geq 5$ , то  $2 \cdot n^3 \gg 3 \cdot n^2 \gg n$ . В этом случае  $3 \cdot n^2 + n$  – исключают из вычислений. Формулы (162) принимают вид:

$$m_{x_n} = \left( \frac{2 \cdot n^3}{6} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot m_x = 0,58 \cdot n^{\frac{3}{2}} \cdot m_x,$$

$$m_{y_n} = \left( \frac{2 \cdot n^3}{6} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot m_y = 0,58 \cdot n^{\frac{3}{2}} \cdot m_y,$$

$$m_{z_n} = \left( \frac{2 \cdot n^3}{6} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot m_z = 0,58 \cdot n^{\frac{3}{2}} \cdot m_z. \quad (172)$$

где  $m_x, m_y, m_z$  – СКП определения координат точек одиночной модели.

$$m_x = m m_q \left( 1 + \frac{f^4}{b^4} \right)^{\frac{1}{2}},$$

$$m_y = m m_q,$$

$$m_z = m m_q \left( 1 + \frac{f^6}{b^6} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (173)$$

Подставляем (164) в (163), формулы принимают вид:

$$m_{x_n} = 0,58 \cdot m \cdot m_q \cdot n^{\frac{3}{2}} \cdot \left( 1 + \frac{f^4}{b^4} \right)^{\frac{1}{2}},$$

$$m_{y_n} = 0,58 \cdot m \cdot m_q \cdot n^{\frac{3}{2}},$$

$$m_{Z_n} = 0,58 \cdot m \cdot m_q \cdot n^{\frac{3}{2}} \cdot \left(1 + \frac{f^6}{b^6}\right)^{\frac{1}{2}}. \quad (174)$$

Формулы (13) позволяют оценить точность построения маршрута фототриангуляции в конце ряда, когда опорные точки расположены только в начале маршрута. Если опорные точки располагаются по обоим концам маршрута, то максимальную погрешность можно ожидать в середине сети для точек равноудалённых от ОТ.

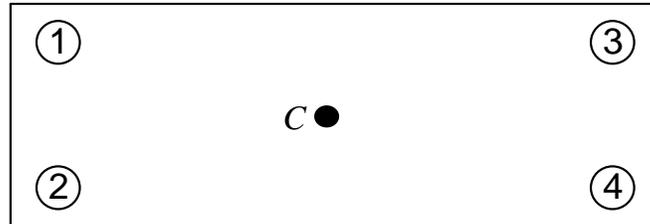


Рисунок 57 – Расположение опорных точек в начале и конце маршрута

$$m_{X_c} = 0,14 \cdot m \cdot m_q \cdot n^{\frac{3}{2}} \cdot \left(1 + \frac{f^4}{b^4}\right)^{\frac{1}{2}},$$

$$m_{Y_c} = 0,14 \cdot m \cdot m_q \cdot n^{\frac{3}{2}},$$

$$m_{Z_c} = 0,14 \cdot m \cdot m_q \cdot n^{\frac{3}{2}} \cdot \left(1 + \frac{f^6}{b^6}\right)^{\frac{1}{2}}. \quad (175)$$

где  $m$  – знаменатель масштаба снимков;  $m_q$  – среднеквадратическая погрешность измерения координат точек и параллаксов;  $n$  – количество базисов между соседними парами опорных точек в маршруте.

#### Выводы

1. Формулы (13) позволяют предвычислить ожидаемую точность построения фототриангуляции в самом слабом звене маршрута, расположенным на равном удалении от опорных точек (в точке  $C$  середине маршрута).

2. Накопление ошибок при построении маршрутной сети приблизительно равно величине  $n \cdot \sqrt{n} = n^{\frac{3}{2}}$ .

3. Под величиной  $n$  понимается количество базисов между соседними парами опорных точек.

4. Из формул (13) следует, что погрешности плановых координат и высот точек сети возрастают пропорционально увеличению знаменателя масштаба снимка, пропорционально увеличению погрешности измерения

координат точек снимка ( $m_q$ ) и пропорционально отношению  $f$  к базису  $b$  съёмки ( $\frac{f}{b}$ ).

5. Из формул (13) следует, что чем меньше величина  $f$  – фокусного расстояния, или чем больше  $b$  – базис наблюдения в масштабе съёмки, тем точнее определение координат точек модели маршрута.

### 43 НАЗНАЧЕНИЕ ОПОРНЫХ ТОЧЕК И ТРЕБОВАНИЯ К ИХ ТОЧНОСТИ

**Опорными точками** называются хорошо распознаваемые на изображениях контура, закреплённые на местности соответствующим образом, координаты которых определены на местности геодезическими методами.

Опорные точки являются важной частью, способствующей созданию точного соотношения между снимками в проекте, камерой/сенсором и поверхностью. Опорные точки расположены на поверхности земли в местах, которые имеют хорошо распознаваемые особенности и известные наземные координаты  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  (рисунок 58).



Рисунок 58. Схема планового положения и фотография наземной опорной точки на местности

Полные опорные точки имеют координаты  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  (превышение точки). Горизонтальные точки имеют координаты  $X$  и  $Y$ , вертикальные точки – только координату  $Z$ . Обычно в качестве опорных точек используются следующие особенности на поверхности земли:

- пересечения дорог;
- сооружения инфраструктуры (пожарные гидранты и крышки канализационных люков);
- границы сельскохозяйственных участков земли;

– геодезические знаки;

В зависимости от типа картографируемой территории, опорные точки можно получать следующими способами:

– теодолитная съемка (миллиметровая или сантиметровая точность);

– пункты наземной опорной сети (миллиметровая или сантиметровая точность);

– наземные GPS (сантиметровая или метровая точность);

– контурные и топографические карты (точность варьируется в зависимости от масштаба, примерно от нескольких метров до 40 и более метров);

– цифровые ортотрансформированные изображения (точность координат  $X$ ,  $Y$  зависит от разрешения ортотрансформированного изображения);

– ЦММ (для сбора вертикальных опорных точек, имеющих координаты  $Z$ , точность зависит от разрешения и точности исходной ЦММ).



*Рис. 59. Расположение наземной опорной точки на снимке с КА LOS/PRISM*

Когда снимки или фотографии получены, опорные точки записываются и впоследствии отображаются на снимке. В IMAGINE OrthoBASE изображение опорных точек появляется на снимке или в области перекрытия снимков в процессе их измерения.

Для блочной триангуляции рекомендуется использовать большее количество опорных точек, чем обычно. Дополнительные опорные точки могут использоваться в качестве контрольных точек для независимой проверки общего качества и точности блочной триангуляции. При анализе контрольных точек сравниваются исходные координаты контрольных точек и координаты, полученные в процессе фотограмметрического вычисления. Результатом анализа является СКО, которая определяет степень соответствия между вычисленными и начальными величинами. Меньшая величина СКО указывает на лучшие результаты.

## 44 ТРЕБОВАНИЯ К ОБЕСПЕЧЕНИЮ ФОТОТРИАНГУЛЯЦИИ ОПОРНЫМИ ТОЧКАМИ

Минимальные требования к опорным точкам для точного картографируемого проекта изменяются в зависимости от размера проекта. Что касается установления связи между плоскостью снимка и поверхностью земли, минимальное количество опорных точек теоретически может быть равно трем: двум, имеющим координаты  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ , и еще одной, имеющей координату  $Z$ . Всего получается семь отсчетов (рис. 60).

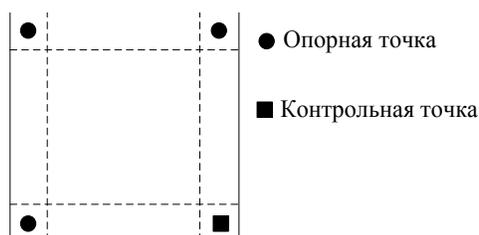


Рисунок 60 – Минимальное количество опорных точек на снимок



Рис. 61. Местоположение наземных опорных точек, которые использовались для фототриангуляции

Для получения соотношения между плоскостью снимка и поверхностью объекта должны быть установлены семь параметров, определяющих это соотношение. Семь параметров включают в себя коэффициент масштаба (разницу масштабов между плоскостью изображения и по-

верхностью земли), координаты  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ , которые характеризуют расположение плоскости снимка относительно поверхности объекта, и три угла поворота (омега, фи, и каппа), которые определяют углы поворота плоскости снимка относительно поверхности земли.

Для вычисления однозначного решения необходимо как минимум семь параметров. Соотношение может быть определено с использованием трех опорных точек: двух, имеющих координаты  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ , и одной, имеющей координату  $Z$ . Однако для увеличения точности картографируемого проекта рекомендуется использовать большее количество опорных точек.

## **45 СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ЦИФРОВОЙ ИНФОРМАЦИИ О РЕЛЬЕФЕ МЕСТНОСТИ**

### *Общие сведения о ЦМР как составной части ЭК, ЦММ*

Цифровое моделирование рельефа, анализ и изучение его свойств по построенным моделям являются неотъемлемой частью исследований в науках о Земле [13]. До конца 20 века основная информация о местности представлялась в графической форме (топографические, тематические, рельефные карты, фотодокументы и др.). В настоящее время в топогеодезическом обеспечении Вооружённых Сил Российской Федерации (ВС РФ) приняты цифровые карты местности, электронные карты, разрабатываются другие виды цифровой картографической продукции: цифровые карты местности повышенной точности, цифровые топографические карты, пространственные модели местности и т.п. Основой для представления данных для ГИС и автоматизированной картографии являются цифровые модели.

Цифровая модель рельефа [1-3,8,15], ЦМР (digital terrain model, DTM; digital elevation model, DEM; Digital Terrain Elevation Data, DTED) – средство цифрового представления 3-мерных пространственных объектов (поверхностей, рельефов) в виде трехмерных данных (three-dimensional data, 3-dimensional data, 3-D data, volumetric data) как совокупности высотных отметок (heights, spotheights) или отметок глубин (depths, spotdepths) и иных значений аппликата (координаты  $Z$ ) в узлах регулярной сети с образованием матрицы высот (altitude matrix), нерегулярной треугольной сети (TIN) или как совокупность записей горизонталей (изогипс, изобат) или иных изолиний (contours, contour lines, isolines, isarithms, isarithmic lines). Наиболее распространенными способами цифрового представления рельефа является растровое представление и особая модель пространственных данных, основанная на сети TIN и аппроксимирующая рельеф многогранной поверхностью с высотными отметками (отметками глубин) в узлах треугольной се-

ти. Процесс цифрового моделирования рельефа включает создание ЦМР, их обработку и использование.

Источниками исходных данных для создания ЦМР суши служат топографические карты, аэрофотоснимки, космические снимки и другие ДДЗ, данные альтиметрической съемки, систем спутникового позиционирования, нивелирования и других методов геодезии (рисунок 61).

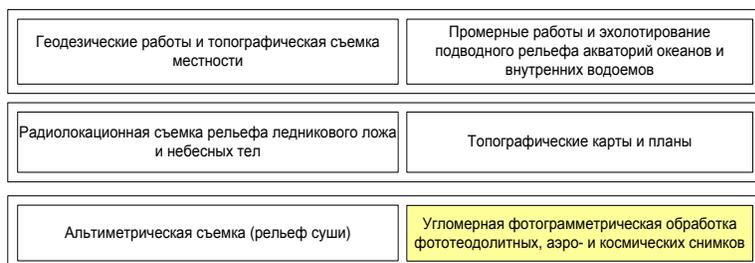


Рисунок 61 – Источники данных для ЦМР

Для подводного рельефа акваторий (батиметрии) исходными данными служат морские навигационные карты, данные промерных работ, эхолотирования, в том числе с использованием гидролокатора бокового обзора, для рельефа поверхности и ложа ледников – аэросъемка, материалы фототеодолитной и радиолокационной съемки.

Обработка ЦМР служит для получения производных морфометрических или иных данных, включая:

- вычисление углов наклона и экспозиции склонов; анализ видимости/невидимости;
- построение трехмерных изображений (см. визуализация), в том числе блок-диаграмм;
- построение профилей поперечного сечения (cross-section, profile);
- оценку формы склонов через кривизну (curvature) их поперечного и продольного сечения, измеряемую радиусом кривизны главного нормального сечения или ее знаком, т.е. выпуклостью/вогнутостью (convexity/concavity);
- вычисление положительных и отрицательных объемов (cut/fill analysis);
- генерацию линий сети тальвегов (ravines, ravine-lines) и водоразделов (ridges, ridge-lines, watersheds), образующих каркасную сеть рельефа, его структурных линий, или сепаратрисс (drainage network, drainage lines) и иных особых точек и линий рельефа (surface specific points and lines): локальных минимумов, или впадин (pits) и локальных максимумов, или вершин (peaks), седловин (passes), бровок, линий обрывов и иных нарушений

"гладкости" поверхности (breaks, break lines), плоских поверхностей с нулевой крутизной (flats);

- интерполяцию высот; построение изолиний по множеству значений высот (line fitting, surface fitting);

- автоматизацию аналитической отмывки рельефа (hill shading) путем расчета относительных освещенностей склонов при вертикальном, боковом или комбинированном освещении (reflectance) от одного или более источников;

- цифровое ортотрансформирование при цифровой обработке изображений и другие вычислительные операции и графо-аналитические построения.

**Методы и алгоритмы создания и обработки ЦМР** применимы к иным физическим или статистическим рельефам и полям: погребенному рельефу, барическому рельефу и т.п. (ряд исследователей и направлений различают цифровые модели высот (DEM (1)) и производные от них цифровые модели рельефа (DTM). В этом случае под последними понимается совокупность производных морфометрических показателей. Данная необходимость различения связана с наименованием и содержанием американского стандарта на ЦМР (DEM (2)) [8,14,15].

К основным свойствам современных картографических моделей, в том числе и цифровых, относятся [12]:

- пространственно-временное подобие;
- содержательное соответствие;
- абстрактность;
- избирательность и синтетичность;
- масштаб и метричность;
- наглядность и обзорность;
- однозначность и непрерывность;
- логичность и упорядоченность легенды.

Топографическая ЦМР должна удовлетворять требованиям, предъявляемые к ЦММ. Она должна:

- иметь форму представления рельефа в виде матрицы значений абсолютных высот точек рельефа местности размером  $M \times N$ ;

- быть сформированной в границах прямоугольного участка, включающего территорию, покрываемую номенклатурным листом топографической карты масштаба 1:25000 (участок должен быть ориентирован параллельно осям  $X$  и  $Y$  системы координат проекции Гаусса-Крюгера);

- левая нижняя угловая точка участка должна быть расположена вблизи юго-западного угла рамки данного номенклатурного листа топографической карты и находиться за пределами этого листа

(координаты указанной точки в проекции Гаусса должны быть кратными шагу дискретизации);

- шаг дискретизации матрицы должен быть постоянным и равным  $25 \times n$  метров (для стандартных топографических ЦМР), где  $n \geq 1$ ;
- наименьшее расстояние по соответствующей линии километровой сетки от каждой из сторон рамки номенклатурного листа до границ участка не должно превышать величины шага дискретизации матрицы.

Первые эксперименты по созданию ЦМР относятся к самым ранним этапам геоинформатики и автоматизированной картографии первой половины 60-х годов. С тех пор разработаны методы и алгоритмы решения различных задач. Созданы мощные программные средства моделирования, в том числе крупные: национальные и глобальные массивы данных о рельефе, накоплен опыт решения с их помощью разнообразных научных и прикладных задач. С внедрением компьютерных технологий изменились не только виды и формы предоставления картографической информации о местности. Серьезные изменения претерпели технологии обработки фотоснимков, по которым создается такая информация. Особенно значительные изменения в технологии фотограмметрической обработки фотоснимков внесло внедрение ЭВМ. До настоящего времени практически 80 % всех видов цифровых моделей и матриц рельефа (ЦМР) создаются по топографическим картам. Современные ЦМР – производные топографических карт.

При цифровом моделировании рельефа основное внимание уделяется обеспечению точности воссоздания рельефа по модели с помощью математической интерполяции и аппроксимации – полиномов (мультикватриковой, билинейной, бикубической сплайн-интерполяции и др.) [19].

Как правило, конечной целью создания ЦМР является проведение изолиний на модели и её 2D- (либо 3D-) визуализация.

До сих пор не разрешено противоречие при создании ЦМР:

- с одной стороны, обеспечение необходимой точности воссоздания рельефа,
- с другой – минимизация объёма ЦМР при необходимости обработки больших массивов исходных данных.

С целью оптимизации задачи исследования были направлены по пути совершенствования алгоритмов обработки (чтобы уменьшить зависимость эффективности от объёма ЦМР) и сокращения числа точек в ЦМР путем разрежения матрицы высот. Это привело, в конечном счете, к тому, что возвратились к идее записи рельефа посредством специально отобранных наиболее характерных точек (способу, используемым топографами при полевых съёмках рельефа местности необходимостью обработки больших массивов), по сути – к структурно-цифровому моделированию рельефа.

Построение структурно-цифровых моделей рельефа (С-ЦМР) требует определенного знания структуры изучаемого рельефа, который исследуется, то есть структуры рельефа-поля. В результате топографо-геодезические, инженерные задачи столкнулись с необходимостью исследовать рельеф средствами геоморфологии [8,14].

Охарактеризованные подходы – сеточный и структурный являются альтернативными, так как основываются на взаимоисключающих посылах.

Первый подход предполагает равнозначность точек в ЦМР и допускает возможность игнорировать особые, наиболее характерные точки рельефа, находящиеся на линиях тальвегов и водоразделов, перегибах ската, т.е. именно те точки, которые всегда в первую очередь привлекают внимание и топографа, и геоморфолога. Он сходен с аналитической моделью рельефа-поля, так как и в том, и в другом случае предполагается непрерывность и плавность рельефа (соответствие его свойствам аналитических функций).

Второй подход строится на представлении о характерных точках и линиях рельефа, образующих его каркас, и возможности игнорировать все другие точки из-за их малой информативности. Таким образом, в соответствии с этим подходом для правильного воспроизведения характера и облика рельефа необходимо и достаточно правильно передать его каркас (то, что игнорируется в первом подходе) с помощью точек, положение которых детерминировано структурой рельефа. Очевидно, что этот подход лучше учитывает специфические свойства рельефа-поля, передавая его структуру, отличную от структуры других пространственных явлений, поэтому он представляется более объективным.

### ***Классификация ЦМР***

Современные практические методы и способы создания ЦМР основываются на использовании различных исходных материалов. Наибольшее распространение получили два вида методик создания ЦМР.

Первый вид лежит в основе методов, использующих результаты фотограмметрической обработки материалов дистанционного зондирования. Разработаны методики создания ЦМР и точность результатов весьма убедительна. Однако созданные, таким способом, модели рельефа не находят должного практического применения, так как они создаются в основном на основе регулярной сетки исходных данных.

Второй вид лежит в основе методов построения ЦМР путем интерполяции оцифрованных изолиний топографических карт, называемых иногда методом трассирования горизонталей. Этот метод не нов, имеет свои сильные и слабые стороны. Из его недостатков можно назвать трудоемкость и

недостаточно удовлетворительную точность моделирования. Но, несмотря на эти недостатки, можно утверждать, что оцифрованные горизонталы топографических карт еще несколько лет будут безальтернативными источниками данных для подобного моделирования.

Оба вида широко применяются на производстве и не являются альтернативными, а взаимно дополняют друг друга и используются, как правило, совместно.

Методы построения цифровых моделей рельефа отличаются не только по схемам получения исходной информации, но и по способам интерполирования высот.

Технологии создания ЦМР по фотоснимкам не отличаются многообразием: в настоящее время цифровую информацию о рельефе получают с использованием двух методов:

- автоматического, основанного на цифровой корреляции оптических плотностей снимков стереопары и отождествлении одноименных точек снимков по некоторому формальному правилу;

- автоматизированного, основанного на работе человека-оператора на аналитических или цифровых стереофотограмметрических приборах.

По способам формирования БЦД как основы для создания ЦМР подразделяются на:

- регулярные;
- полурегулярные;
- хаотические (нерегулярные).

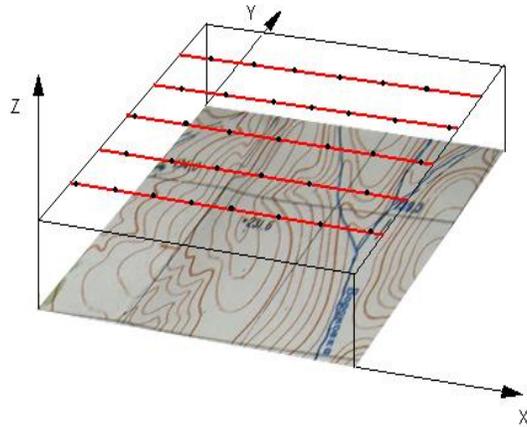
В ЦМР, построенных по регулярным системам (сетке) точек измерений точки расположены в узлах сети, состоящей из квадратов (реже прямоугольников или равносторонних треугольников).

Методика построения регулярной модели разработана наиболее детально и реализована в универсальных фотограмметрических приборах отечественного производства типа СПА и др.

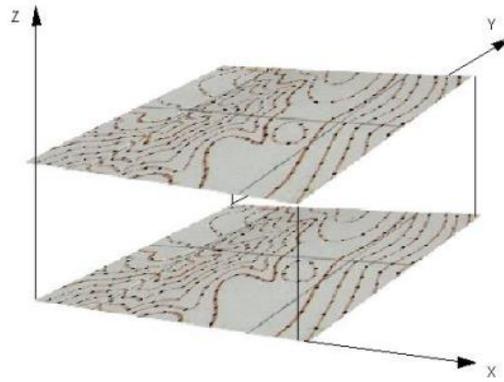
Полурегулярные модели показаны на рис. 62, 63. На рис. 62 показана модель, состоящая из взаимно параллельных профилей. Интервалы между точками в профилях неодинаковые, так как точки выбраны в характерных местах, а между профилями – одинаковые.

Во втором случае одинаковые расстояния сохраняются между точками по горизонталям при неодинаковых расстояниях между горизонталями.

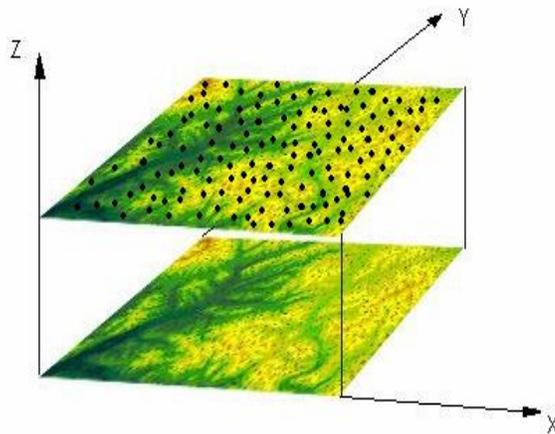
Таким образом, в регулярных ЦМР для определения планового положения точек модели достаточно задать плановые координаты начальной точки и размер стороны сетки, а в полурегулярных моделях задаётся или расстояние между линиями, или расстояние между точками.



*Рисунок 62 Полурегулярная система точек измерений, состоящая из взаимно параллельных профилей*



*Рисунок 63 Полурегулярная система точек измерений, расположенных на горизонталях*



*Рисунок 64 – Нерегулярные измерения, состоящие из характерных точек рельефа*

В нерегулярных (хаотических) моделях (рис. 64) точки располагаются бессистемно. Такая ЦМР может быть получена, например, если она составлена характерными точками рельефа местности. По существу, хаотическая модель ЦМР может быть образована точками, отражающими положение характерных линий и точек рельефа.

ЦМР, наряду с использованием для решения ряда прикладных инженерных задач, применяются для автоматизации процесса составления карт, а конкретнее – для автоматизации процесса получения графических оригиналов рельефа. С этой целью при математической обработке цифровой информации о рельефе должна решаться задача определения высоты любой точки области моделирования по её плановым координатам, отслеживания горизонталей, если необходимо их сглаживание, а затем и выдача в графической форме на автоматическом координатографе. Применяемые для этой цели алгоритмы отличаются друг от друга по степени учёта структуры моделируемой топографической поверхности, по способу построения аппроксимирующей поверхности, по применяемому математическому методу восстановления высот точек, по способу отслеживания горизонталей и другим особенностям.

#### **46 ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЦИФРОВОЙ ИНФОРМАЦИИ О РЕЛЬЕФЕ МЕСТНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЕЦИАЛЬНЫХ ПРИБОРОВ**

Технологии создания ЦМР на основе регулярной системы измерений (сетки) основаны на обработке аэрофотоснимков и космических снимков с применением аналитических фотограмметрических приборов.

Технологическая схема создания ЦМР по аэрофотоснимкам и космическим снимкам представляет собой следующую последовательность работ [6]:

1. Подготовительные работы;
2. Развитие фотограмметрической сети планово-высотных опорных точек;
3. Внутреннее ориентирование снимков (построение стереомодели);
4. Внешнее (геодезическое) ориентирование стереомодели;
5. Формирование массива исходных данных для создания ЦМР;
6. Редактирование ЦМР;
7. Контроль и документальное оформление результатов.

Все процессы выполняются традиционными методами, хорошо изучены и подробно описаны в руководствах, инструкциях и наставлениях и реализованы в универсальных фотограмметрических приборах

аналогового типа отечественного и зарубежного производства [1,3,4,14]. Процесс формирования массива точек для создания ЦМР состоит, в основном, в измерении высот точек отдельных профилей стереомодели в автоматическом режиме. Шаг дискретности выбирается оператором в зависимости от масштаба и назначения создаваемой ЦМР.

Данный метод создания ЦМР составляет сравнительно небольшую долю от общего объема работ на современном этапе цифрового моделирования рельефа.

В современном топогеодезическом производстве и топогеодезическом обеспечении ВС РФ широкое распространение получила следующая технологическая схема создания ЦМР по полурегулярной системе высотных отметок, основанных на векторизации горизонталей карты [7]:

1. Подготовительные работы;
2. Получение съёмочного оригинала рельефа на УФП;
3. Сканирование съёмочного оригинала рельефа;
4. Векторизация изолиний (горизонталей) по растру в среде ГИС;
5. Формирование ЦМР;
6. Редактирование ЦМР;
7. Контроль и документальное оформление результатов.

В качестве исходного материала для создания подобных ЦМР используются готовые карты либо съёмочные оригиналы рельефа.

Подготовительные работы начинаются с получения задания на проведение работ. Затем выполняются сбор, анализ и систематизация исходных материалов, разработка технического проекта редакционных указаний, а также подготовка исполнителей к работе.

Выполнение подготовительных работ производится по традиционной методике, применяемой в фотограмметрическом производстве.

Получение съёмочного оригинала рельефа на УФП производится в упрощённом варианте:

1. Подготовительные работы;
2. Построение стереомодели местности (взаимное ориентирование модели);
3. Геодезическое (внешнее) ориентирование модели;
4. Вычерчивание горизонталей и высотных отметок.

Картографирование остальных элементов рельефа, обозначаемых немасштабными условными знаками, выполняется на отдельном оригинале (съёмочный оригинал микрорельефа) стандартными приёмами дешифрирования материалов аэрофотосъёмки и космической съёмки.

Дальнейшая обработка созданного съёмочного оригинала рельефа заключается в сканировании исходного материала с целью получения его растрового изображения. Растр импортируется в геоинформационную си-

стему (ГИС), где выполняется его внешнее (геодезическое) ориентирование. Затем выполняется векторизация горизонталей. Конечный этап: создание ЦМР на основе сформированного массива данных и её редактирование.

## **47 ВИДЫ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ МЕСТНОСТИ (ЦММ)**

### **1 Понятие ЦММ**

Тенденция увеличения использования ЦММ объясняется ростом требований практики к адекватностям моделей используемых в задачах научного и практического значения. Перечислим только некоторые группы этих задач.

1) Вычисление таких данных, как высоты, углы наклона и экспозиции склонов, зоны видимости (невидимости), профили поперечного сечения рельефа, величины объемов, линии рельефа (водоразделы, сети тальвегов) и т.д.

2) Проведение точных картометрических расчетов (определение расстояний, площадей).

3) Оценка проходимости местности. При определении проходимости учитывается не только дорожная сеть, гидрография, растительность и грунты района, но и рельеф местности. Учет рельефа необходим не только для определения условий проходимости вне дорог, но и при решении задач связанных с выбором рациональных маршрутов движения. В этих задачах учет рельефа местности необходим для определения допустимой скорости движения по дорогам боевой и транспортной техники в условиях ограниченной видимости (ночное и вечернее время) и неблагоприятных погодных условий (гололед, туман, снегопад).

4) Учет защитных свойств местности от воздействия поражающих факторов как ядерного, так и обычного оружия требует анализа рельефа местности. Программная реализация имеющихся методик невозможна без использования ЦМР. Использование ЦМР необходимо также и при прогнозировании последствий применения оружия.

5) Оценка условий маскировки и наблюдения с наземных наблюдательных пунктов, воздушных и космических средств наблюдения.

6) Автоматизация задач выбора мест наилучшего обзора, выбора укрытий от средств воздушного наблюдения и т.д. Изучение условий ведения огня, связанное с выбором позиций для средств поражения также проводится с учетом рельефа.

7) Расчет последствий весенних паводков, таяния снегов и прорыва плотин водохранилищ. Расчет уровня затопления в этих и других ситуациях требует в качестве исходных данных ЦМР. Эти задачи связаны также с

задачами расчета переноса отравляющих веществ дождевой водой (паводковыми водами) и их накопление на местности.

8) Прогнозирование развития низовых лесных и степных пожаров. Использование ЦМР повышает адекватность используемых моделей, что необходимо для планирования действий не только противопожарных служб, но и войсковых подразделений выполняющих задачи в непосредственной близости от очагов этих пожаров.

9) Повышение качества дешифрирования данных дистанционного зондирования Земли. Использование ЦМР может повысить точность получаемых данных средствами радиолокации.

10) Решение задач планирования развертывания сетей УКВ – связи. ГИС, ориентированные на этот класс задач, разрабатываются в Санкт-Петербурге в Военной Академии Связи и в отраслевом НИИ Радио.

11) Использование методики цифрового моделирования рельефа применительно к геофизическим полям различной природы, например для моделирования барических полей, позволяет создавать инструментальные средства исследования синоптических, геологических и других явлений.

Приведенный перечень возможных направлений применения цифровых моделей рельефа свидетельствует об актуальности рассмотрения вопросов использования ЦМР.

Цифровая модель рельефа местности (ЦМРМ) является составной частью электронной карты. Рассматривая роль и место ЦМРМ в технологии обработки, анализа и хранения информации, необходимо дать определение ЦМРМ и электронных карт (ЭК).

Под ЦМРМ понимается численное представление участка земной поверхности, где точечные, линейные и площадные объекты характеризуются кодами составленного словаря объектов и пространственными координатами  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  в соответствии с системой координат исходной картографической основы. Координата  $Z$  несет информацию о превышении или понижении точки в трехмерной модели изображаемого пространства, но использование величины  $Z$  не ограничивается её применением только как характеристики земной поверхности.

Под ЭК понимается объединенная общим замыслом, упорядоченная и согласованная на математической основе, содержанию, нагрузке и условным знакам совокупность картографических моделей, сформированных в соответствии с требованиями пользователем на машинных носителях (магнитных лентах и дисках, оптических дисках) программными и техническими средствами с использованием разработанных ЦМРМ, снимков и других источников информации о местности.

В отличие от ЦМРМ электронные карты, наряду с указанными параметрами ЦМРМ, имеют условные знаки (рисунок, размеры, цвет), подписи

названий (шрифт, размеры, цвет) и, что весьма важно, пространственно-логические связи между объектами и элементами изображения. Более того, ЭК разных видов и масштабов могут иметь связи между собой.

Объект является основной информационно-логической единицей ЭК, соответствующей объекту (части объекта) местности и сохраняющей постоянными значения имеющихся качественных и количественных характеристик. Информация об объектах включает семантическую часть (сведения о качественных и количественных характеристиках) и метрическую часть (данные о координатах). Для адекватного отражения в цифровом виде всем объектам и их характеристикам присваиваются кодовые обозначения.

Электронные карты классифицируются:

1. По назначению:

– для отображения обстановки на экранах индивидуального и коллективного пользования, моделирования ситуаций и решения расчетных задач с использованием компьютерных средств;

– для применения в автоматизированных системах управления и навигации (наземной, воздушной и космической);

2. По тематике, видам и масштабам:

– тематические карты разных масштабов;

– электронные карты планов городов масштабов 1:10000 и 1:25000;

– электронные топографические карты масштабов 1:25000, 1:50000, 1:100000, 1:200000, 1:500000 и 1:1000000;

– электронные авиационные карты масштабов 1:500000, 1:1000000, 1:2000000, 1:4000000, 1:8000000 и 1:32000000;

– электронные космонавигационные карты масштабов 1:5000000, 1:10000000, 1:20000000 и 1:40000000;

3. По способам представления пространственной информации:

– двумерные модели ( $X, Y$ );

– трехмерные модели ( $X, Y, Z$ ), основой которых являются ЦМРМ;

– четырехмерные, или пространственно-временные модели ( $X, Y, Z, T$ ),

4. По форме представления

– линейные,

– векторные,

– матричные,

– растровые.

Под линейной формой понимается способ представления метрической картографической информации (информации о местоположении объектов) в виде последовательного набора координат точек контура объекта.

Под векторной формой – способ представления метрической картографической информации в виде наборов векторов заданной длины и ориентации.

Под матричной формой – способ представления метрической и семантической картографической информации в виде характеристик, отнесенных к узлам сетки с известными значениями их координат.

В линейной, векторной и матричной формах обеспечивается координатно-кодированная привязка объектов, а, следовательно, и возможность управления ЭК до уровня объекта и его характеристик.

Под растровой формой понимается способ представления информации ЭК в виде матрицы, элементами которой являются значения кодов цвета картографического изображения ЭК в растровой форме обеспечивает управление изображением на уровне цвета, в соответствие с которым могут быть поставлены определенные типы объектов.

Создание ЭК в линейной или векторной формах осуществляется путем символизации ЦКО с использованием определенной системы правил цифрового описания картографической информации и библиотек условные знаков для различных видов и масштабов ЭК. В процессе символизации осуществляется привязка условных знаков в соответствии с местоположением объектов на местности и правилами их отображения, размещение подписей названий, согласование информации в пределах листа карты и с соседними листами.

Создание ЭК в матричной и растровых формах может осуществляться на основе информации, представленной в линейной или векторной форме, а также в растровой форме – путем непосредственного сканирования картографического изображения и его последующего редактирования.

Примером ЭК в растровой форме, предназначенной в основном для отображения информации, служит так называемая телевизионная (видеодисковая) карта, являющаяся изображением обычной карты, записанным телевизионной камерой по кадрам на видеодиске.

Основными этапами технологии создания ЭК в векторной форме являются:

1. Подготовка исходных картографических материалов.
2. Цифрование, обработка и редактирование цифровой картографической информации.
3. Символизация, формирование и хранение ЭК в архиве.

Цель первого этапа – приведение в определенную систему предстоящих действий оператора по цифрованию методом прослеживания линий сложного и большого по объему картографического изображения, а также подготовка к вводу семантической информации. Для указания оператору необходимой последовательности цифрования элементов содержания на листах прозрачного

пластика изготавливаются специальные оригиналы. Для подготовки к цифрованию семантики объектов составляются таблицы, в которые заносятся код объекта номер в пределах листа карты, признак локализации объекта (точечный, линейный, площадной), качественные и количественные характеристики.

Второй этап выполняется на АРМ оператора. При этом выходными материалами являются массивы цифровых данных семантики и метрики, контрольные копии.

Важнейшей частью технологии создания ЭК являются общее и специализированное программное обеспечение. Общее программное обеспечение (ПО) предназначено для загрузки специализированного ПО и выполнения низкоуровневых операций ввода-вывода. Специализированное ПО предназначается для выполнения следующих технологических операций: подготовка исходных данных для обработки информации, привязка листа исходной карты, цифрование объектов (точечных, линейных и площадных), исправление семантической и метрической информации, трансформирование метрической информации, воспроизведение контрольных копий, автономный ввод семантической и метрической информации, формирование ЭК в выходной структуре на машинном носителе с использованием библиотеки условных знаков и контроль.

Технология создания (ввода) ЭК в растровой форме предусматривает выполнение следующих процессов:

1. Подготовка исходных картографических материалов.
2. Сканирование картографических материалов, редактирование картографической видеоинформации.
3. Запись и хранение ЭК в архиве.

Первый процесс предусматривает соединение в блок (склеивание) исходных листов карт на основе координатной сетки.

Выполнение второго процесса заключается в сканировании блока листов карт по кадрам (по подготовленному сценарию) или считывании отдельных листов карт с использованием сканера.

Содержание третьего процесса заключается в архивировании введенных ЭК.

Картографические изображения, составляющие ЭК, должны быть согласованы и унифицированы по математической основе, содержанию и условным знакам.

Согласование и унификация математической основы картографических изображений могут быть достигнуты применением единого масштабного ряда, позволяющего отображать местность с необходимой детализацией и точностью, а также проекций, обеспечивающих сплошное (без разрывов) карто-

графирование любых территорий земного шара с минимальными искажениями, и принятых систем координат.

Связь между картографическими изображениями, имеющими разные проекции и системы координат, должна осуществляться посредством соответствующих алгоритмов преобразований. Возможен также вариант использования уравнений универсальной равноугольной проекции.

Для согласования и унификации содержания и условных знаков картографических изображений целесообразно разработать методы их анализа и синтеза, управления информативностью, оптимизации содержания и нагрузки, а также создания простой, легко запоминающейся системы условных знаков, имеющей изобразительные средства, позволяющие получать наглядное представление о классификации объектов, их взаимном расположении, связях, семантических и метрических характеристиках.

Обновление ЭК производится с целью приведения их содержания (контуров) в соответствие с современным состоянием местности. Обновление ЭК выполняется путем цифрования исправленных издательских оригиналов карт с привлечением дополнительных и справочных материалов, а также материалов видового наблюдения.

Системой обеспечения ЭК должна предусматриваться поставка для ГИС пакетов прикладных программ, реализующих основные функции управления картографическими изображениями ЭК на экранах индивидуального и коллективного пользования, хранения, ведения и обновления информационных массивов, библиотеки условных знаков и шрифтов, доступа к объектам и различным частям изображения, различных манипуляций с изображениями на экране, масштабирование, вырезка по "окну", передвижение изображения, его разворот, съем координат, "сшивки" смежных листов карт для обеспечения непрерывной визуализации заданного района, редактирования картографического изображения, использования унифицированных интерфейсов, обеспечивающих работу пользователей.

Создание ЭК осуществляется по уровням (слоям), одним из которых является ЦМРМ. На нижнем уровне формируется наиболее подробное представление о местности в виде базовых ЭК. На каждом более высоком уровне степень подробности картографических изображений путем их генерализации постепенно уменьшается. На высшем уровне синтезируется наиболее обобщенное представление о местности. Такой подход позволяет на каждом уровне создавать картографические изображения различной сложности с более четким анализом возможности выполнения предъявляемых к ним требований.

Концептуальной основой создания ЭК служит системный подход, который заключается в разработке методов построения картографических изоб-

ражений как единой информационной базы, созданной на основе оптимального использования существующих карт и имеющих иерархическую модульную структуру с различными уровнями детализации информации о местности. Принцип блочно-иерархического, логического построения ЭК с последовательным уменьшением масштабов картографических изображений и гибкости поисковой стратегии предусматривает четкое определение места каждого картографического изображения в системе ЭК и указание его связей с изображением, находящимся на том же или других уровнях. По этому принципу ЭК интегрируются в систему, которая обеспечивает закономерную повторяемость изображений (моделей) путем организации их в циклы, а, следовательно, гибкость автоматического поиска и управления картографическими изображениями. В настоящее время существует два основных типа моделей ЦМРМ:

- модель триангуляционной сети (ТС),
- модель регулярной сети (РС).

Каждая из моделей имеет свои преимущества и выбор используемого типа модели в том или ином случае зависит от возлагаемых на нее задач.

## ***2.2. Типы топографических данных, используемых при создании ЦММ.***

Под топографическими данными (элементами) понимаются любые физические или абстрактные объекты, которые тем или иным образом характеризуют находящиеся на поверхности земли объекты и непосредственно саму земную поверхность.

Под физическими данными понимаются любые, природные или созданные человеком, наблюдаемые объекты на поверхности земли, какими являются, например, русла рек, горные хребты, автомобильная или железнодорожная сети и т.д.

Под абстрактными данными понимаются данные, полученные при первичной обработке информации, характеризующей рельеф местности. Такими данными могут являться вертикальные профили, горизонтالي местности, границы исследуемого района и т.д. В процессе синтеза ЦМРМ используются три типа картографических данных: точки, линейно-протяженные объекты и площадные участки местности.

### ***2.1.1 Данные о точках местности***

Данные о точках местности представляют собой набор информации об отдельных точках и окрестности этих точек определенных размеров и включают в себя:

- контрольные точки;
- регулярные точки;
- точки высот местности;

- точки низин;
- точки локальных высот.

Контрольные точки имеют точно измеренные координаты и используются в процессе оценки точности построения модели местности, а также могут использоваться в процессе координатной привязки снимков к ЦМРМ. Хотя контрольные точки и являются неотъемлемыми атрибутами модели ТС, они не участвуют в процессе триангуляции.

Регулярные точки – основной тип картографических данных, формирующий модель ТС. Обычно они расположены неравномерно и содержат координаты  $X$ ,  $Y$ , и  $Z$ .

Точки высот – это точки местности с известными высотами, которые не имеют никакой специальной связи друг с другом, и относительно которых все окружающие точки по всей ЦМРМ имеют более низкие высоты.

Точки низин – точки местности, имеющие наименьшую высоту по отношению к другим окружающим их точкам местности.

Точки локальных вершин – точки местности, имеющие наибольшую, в окрестности данных точек, высоту по отношению к другим окружающим их точкам местности.

### ***2.2.2 Данные о линейно-протяженных объектах местности***

Данные о линейно-протяженных объектах местности представляют собой набор взаимосвязанных точек. Линии, которые они составляют, не имеют физической ширины или имеют ширину, но отображаются единственной линией в определенном масштабе. Такими данными могут являться, например, горные хребты, русла рек, горизонтالي местности. Данные о линейно-протяженных объектах местности включают в себя:

- линии конечной длины;
- генерируемые линии конечной длины;
- горизонтали местности;
- линии оврагов;
- линии горных хребтов.

Линии конечной длины состоят из совокупности взаимосвязанных точек, которые применяются для отображения резких изменений в характере рельефа местности, например, начала крутого склона или края обрыва. Учет линий данного типа в процессе триангуляции позволяет обеспечить более высокую точность построения и целостность структуры модели ТС, так как грани треугольников, составляющих модель ТС, в данном случае не пересекают линий, характеризующих резкие перепады высот.

Генерируемые линии конечной длины создаются на основе совокупности данных о горизонталях местности. Это происходит в том случае, когда во входные данные наблюдается недостаток информации о линиях конечной

длины. Для построения модели ТС входные данные должны содержать полное описание линий конечной длины. Создание дополнительных линий конечной длины при построении модели ТС обеспечивает более точное описание поверхности земли.

Горизонтالي – кривые линии, состоящие из точек с одинаковыми высотами.

Линии оврагов используются для отображения низин или других участков местности и характеризуют изменения высот, где все точки с обеих сторон линии оврагов имеют большие высоты, чем высота самой линии. Линии оврагов являются противоположностью линий горных хребтов.

Линии горных хребтов - тип линии, который используется для отображения горных хребтов или других участков местности и характеризует изменения высот, где все точки с обеих сторон линий данного типа имеют более низкие высоты, чем высота самой линии.

### ***2.2.3 Данные о площадных участках местности***

Данные о площадных участках местности представлены в виде конечных очерченных областей, описание которых возможно уравнениями плоскости. Такого рода данными могут задаваться, например, модели озер, технических стоянок и другие плоские области. Данные о площадных участках местности включают в себя:

- края модели;
- неопределенные области;
- плоские области.

Края модели - тип данных, который определяет внешние пределы разрабатываемой ЦМРМ. Данные этого типа состоят из ряда взаимосвязанных точек, выполняющих определенные функции. Края модели являются границами, замыкающими область, содержащую точки с известными координатами и высотами. Примером может служить береговая линия острова, которая регистрирует границу между океаном и сушей. За пределами (краями) модели невозможно проводить триангуляционные работы. Каждая модель может содержать только одну граничную линию данного типа.

Неизвестные площади – это области, в пределах которых неизвестны высоты точек, например, таких, как области, на которых произрастает плотная растительность, или съемка которых производилась в сложных метеоусловиях. В таких областях также невозможно проводить триангуляционные работы.

Плоские области – тип данных, отображающие участки местности, имеющие постоянный наклон. Именно такой тип данных можно использовать для отображения моделей водных поверхностей, мест для стоянок техники, взлетно-посадочные полосы и т.д.

Для построения наиболее точно описывающей реальную местность ЦМРМ необходимо использовать как можно больше различных типов топографических данных о земной поверхности.

### **3. Методика создания и применения ЦММ при решении задач ВКР**

3.1. Методика построения ЦММ.

3.2. Создание слоя объектов на основе стереопары.

3.3. Расчет зоны радиовидимости.

Одним из видов анализа ЦМРМ является анализ зон видимости (ЗВ) из заданной точки. Данная задача имеет широкое применение при построении зон радиовидимости для радиолокационных станций, радиостанций, либо просто для определения зоны видимости на местности из произвольной её точки.

Исходными данными для определения зоны видимости являются:

- пространственные координаты точки, из которой производится определение ЗВ. На данном этапе достаточно задание только координат  $X$  и  $Y$  с помощью "мыши" после выбора раздела в меню "Установить точку наблюдателя". Третья координата точки  $Z$  может быть вычислена;
- высота наблюдателя. Она определяет превышение над местностью точки, из которой производится наблюдение – точки наблюдателя.

Рассмотрим алгоритм вычисления зон видимости для высотного растра, разработанный в рамках данной дипломной работы.

Пусть точка наблюдателя  $A$  задаётся координатами  $(X_h, Y_h, Z_h)$ , текущая точка  $M(i, j, Z)$ , причём первые две координаты берутся из изображения высотного растра, а третья координата вычисляется по формуле 3.3.1. Нам нужно определить, видна ли точка  $M$  из точки  $A$  (на месте точки  $M$  поочерёдно является каждая точка изображения, для которого определяется видимость).

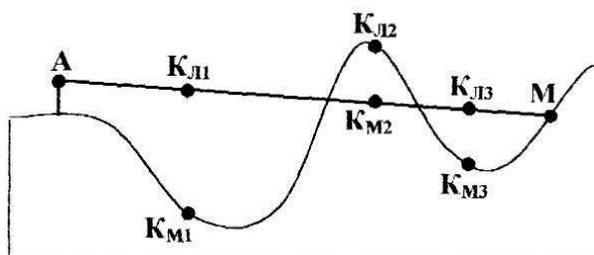


Рисунок 65. Определение зоны видимости

Для этого строится воображаемая линия из точки наблюдателя  $A$  в точку  $M$  и обрабатываем каждую точку линии  $K$  по направлению из точки  $A$  в точку  $M$ . Вычисляем координаты точек линии  $AM$  и высоту точки на местности, спроецированной с линии на местность. Этими точками соответственно будут

точки  $K_l$  и  $K_m$ . Если высота точки  $K_l$  меньше высоты точки  $K_m$ , то определяем, что точка  $M$  однозначно не видна из точки  $A$  и устанавливаем логическое состояние "Невидимость" в значение "Истина" для остальных точек линии  $AM$ . (Важное замечание: когда точка  $K$  находится в точке  $A$  в начальный момент работы данной процедуры, это состояние сброшено в значение "Ложь"). Если высота точки  $K_l$  больше  $K_m$  (нет преграды на пути из точки  $A$  в точку  $M$ ) и не установлено состояние "Невидимость", то до данного момента предполагается, что точка  $M$  видна из точки  $A$ , иначе точка  $M$  не видна.

Проведя данные вычисления для каждой точки полутонового изображения высотного растра, получим изображение с нанесёнными на нём зонами видимости.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебном пособии рассматривались основные вопросы применения фотограмметрии для ортотрансформирования, автоматического вычисления превышений, создания стереопар, дешифрирования, высокоточного определения координат точек, их точного положения на изображении и расширения опорной сети.

Для любых вышеупомянутых задач соотношение между камерой/сенсором, снимками в проекте и точками на поверхности должны быть определены. Для определения этого соотношения используются следующие переменные:

- элементы внешнего ориентирования для каждого снимка;
- элементы внутреннего ориентирования для каждого снимка;
- точность представления на земле.

В фотограмметрии существуют известные проблемы, связанные с определением элементов внутреннего и внешнего ориентирования для каждого снимка в проекте при использовании минимального количества опорных точек. Благодаря тому, что сбор опорных наземных точек сопряжен с затратами времени и труда, многие фотограмметрические методы не используют большого количества опорных точек. К тому же, элементы внешнего ориентирования снимка обычно неизвестны.

Методы фотограмметрии, такие как обратная засечка, прямая засечка и уравнивание блока по методу связей используются для определения переменных, необходимых для проведения ортотрансформирования, автоматического вычисления ЦММ, создания стереопар, высокоточного определения точек и расширения опорной сети, в зависимости от представленных исходных данных.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

Перечислить виды съемок местности.

1. Перечислить виды снимков местности.
2. Как производится сбор и оценивание качества материалов аэрокосмической съёмки?
3. Перечислить модели основных видов космических камер.
4. Назвать системы координат основных видов космических камер.
5. Назвать элементы центральной проекции снимка.
6. Назвать элементы ориентирования снимка.
7. Назвать формулу зависимости между координатами точек местности и координатами ее изображения на снимке
8. В чем состоит геометрический смысл обратной засечки (формулы обратной связи)?
9. В чем состоит геометрическая сущность масштаба снимка?
10. Перечислить геометрические искажения снимков.
11. Перечислить искажения снимков, вызываемые физическими факторами.
12. Назвать элементы стереопары снимков.
13. В чем состоит принцип построения модели местности?
14. Назвать системы координат, применяемые в фотограмметрии.

## Список литературы

1. Фотограмметрия / А.Н. Лобанов. – М.: Недра, 1984.
2. Фотограмметрия: Учеб. Пособие / В.М. Сердюков. – М.: Высшая школа, 1983.
3. Фотограмметрия / А.Н. Лобанов. – М.: Недра, 1984.
4. Военная топография / А. А. Псарев, А. Н. Коваленко, А.М. Куприн, Б.И. Пирнак. – М.: Воениздат, 1986.
5. Псарев А.А., Коваленко А.Н. Топографическая подготовка командира. – М.: Воениздат, 1989.
6. Козин Е.В. Сборник заданий на групповые упражнения по военной топографии. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2005.
7. Руководство по фотограмметрическим работам часть 3 / Создание оригиналов специальных карт и фотодокументов о местности. – М.: РИО ВТС, 1983.
8. Условные знаки топографических карт масштабов 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000. – М.: Воениздат, ВТУ Ген. Штаба, 1983.

Козин Евгений Вячеславович, Карманов Андрей Геннадиевич,  
Карманова Наталия Андреевна

## **ФОТОГРАММЕТРИЯ**

Учебное пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж 30 экземпляров

Отпечатано на ризографе

**Редакционно-издательский отдел**

**Университета ИТМО**

197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49