

# **1. Введение. Дистанционное зондирование Земли.**

## **1.1 Основы дистанционного зондирования Земли.**

Схема дистанционного зондирования. Электромагнитное излучение. Диапазоны электромагнитного излучения. Спектральные диапазоны, используемые в дистанционном зондировании. Преимущества и недостатки данных дистанционного зондирования. Области применения данных дистанционного зондирования.

### *Схема дистанционного зондирования*

Дистанционное зондирование – это метод получения информации об отдаленных объектах без прямого контакта с ними. Бесконтактная передача информации возможна благодаря естественно существующим или искусственно генерируемым силовым полям, которые распространяются между приемником излучений (чувствительным сенсором) и изучаемым объектом (целью). К основным используемым силовым полям относятся, электромагнитное излучение. При настройке приемника на определенные излучения на системе датчиков фиксируется, изображается состояние радиации, исходящей от объекта исследования, и такие изображения можно анализировать.

Принцип дистанционного зондирования с использованием волн электромагнитного спектра проиллюстрирован на рисунке 1. Энергия исходит из источника излучения. Пассивный (естественный) источник энергии – это Солнце. Активным источником энергии может быть лампа, лазер или микроволновый передатчик с его антенной. Радиация проникает через вакуум со скоростью света приблизительно в 300 000 км/с. Она достигает объекта, где взаимодействует с ним. Часть энергии отражается по направлению к приемнику. В приемнике, размещенном на специальной платформе, интенсивность поступающей радиации квантуется и запоминается. Значения запомненной энергии преобразуются в графические образы – изображение.

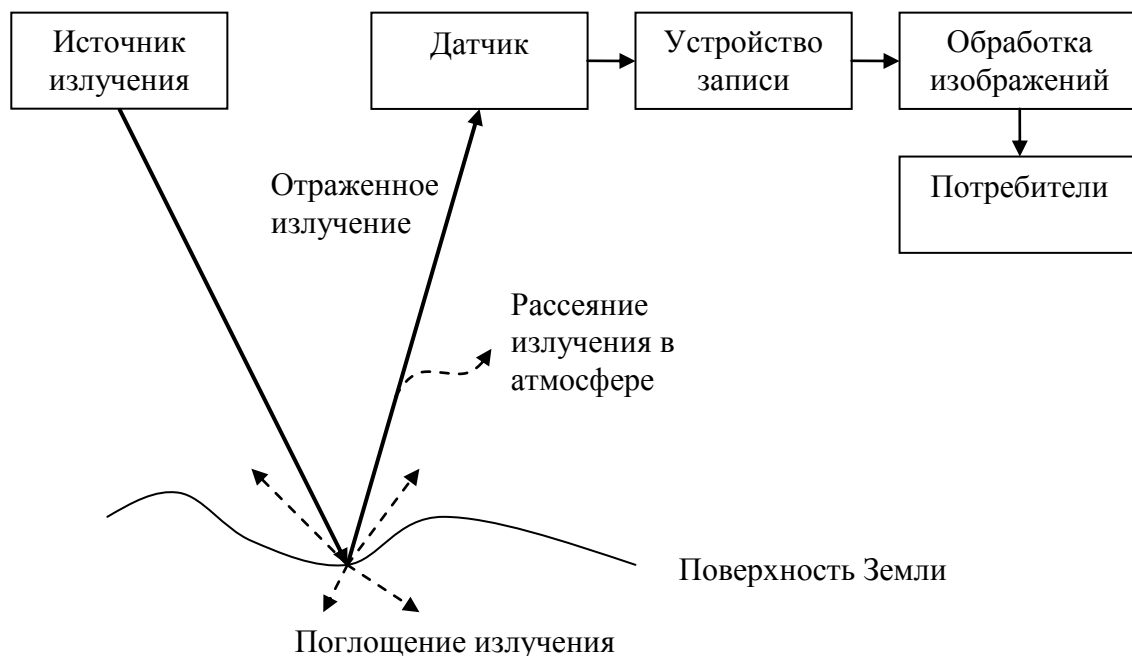


Рисунок 1 - Схема дистанционного зондирования

В процессе передачи излучения от объекта к датчику, происходит поглощение и рассеяние излучения в атмосфере, что приводит к искажению сигнала. Поэтому существуют различные виды обработки данных дистанционного зондирования предназначенные для снижения влияния атмосферы на изображения объектов местности.

*Электромагнитное излучение. Диапазоны электромагнитного излучения. Спектральные диапазоны, используемые в дистанционном зондировании.*

В дистанционном зондировании используются наиболее информативные диапазоны электромагнитного излучения: оптический (длина волн  $\lambda = 0,1 - 1000$  мкм) и радиодиапазон ( $\lambda$  более 1 мм).

Оптический диапазон делят на области и зоны спектра.

При съемке земной поверхности, как правило, регистрируется отраженное от объектов солнечное излучение. Солнце – основной естественный источник электромагнитного излучения.

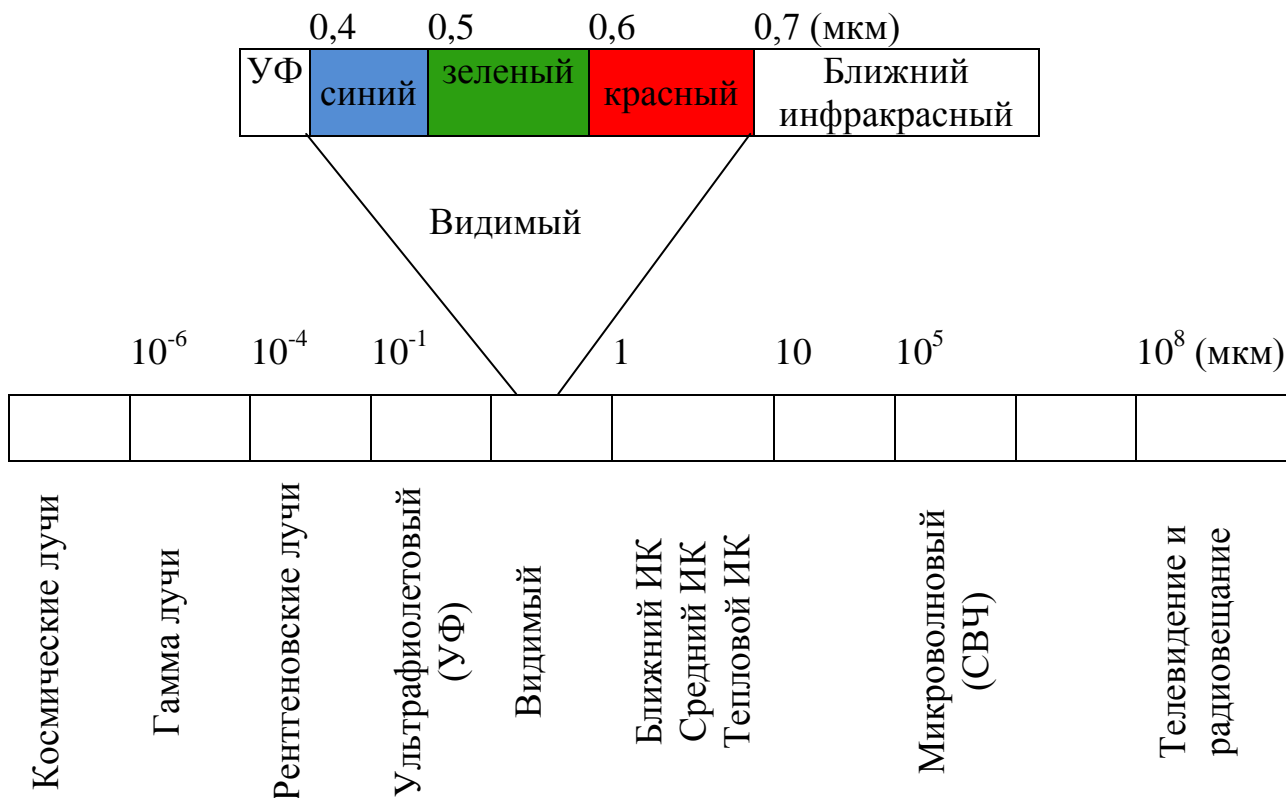


Рисунок 2 – Диапазоны спектра

Оптический диапазон делится на: ультрафиолетовую ( $\lambda=0,10-0,40\text{мкм}$ ), видимую ( $\lambda=0,40-0,75\text{мкм}$ ) и инфракрасную ( $\lambda=0,75-1000\text{мкм}$ ) области.

Ультрафиолетовая и инфракрасная области спектра в свою очередь делятся на ближнюю, среднюю и дальнюю зоны. А видимая область делится на синюю, зеленую и красную зоны.

В качестве искусственных источников излучения используются лазеры и радары.

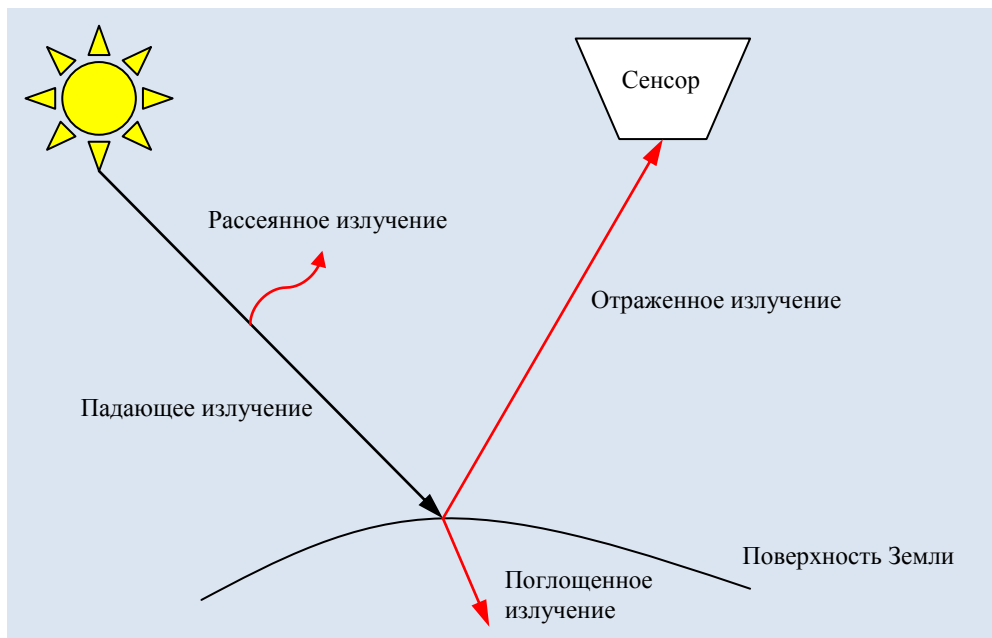


Рисунок 3 - Взаимодействие излучения с атмосферой

Пока солнечное излучение достигнет земли, оно проходит через атмосферу. Можно выделить следующие виды взаимодействия излучения с атмосферой: поглощение, отражение и рассеивание.

При прохождении электромагнитного излучения через атмосферу, оно частично поглощается молекулами различных газов. На рисунке \_\_ показана кривая прозрачности атмосферы.

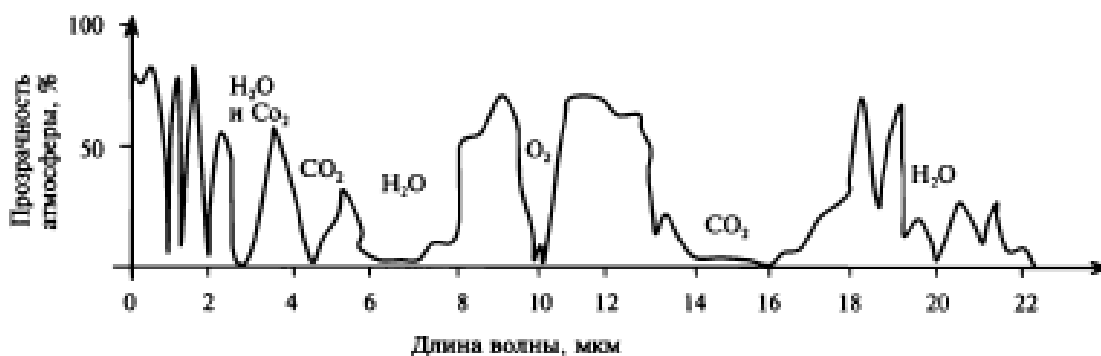


Рис. 2.5. Окна прозрачности атмосферы [48]

Рисунок 4 – Окна прозрачности атмосферы

Из рисунка видно, что достаточно большая часть диапазона бесполезна для дистанционного зондирования, так как не пропускает излучение. Соответственно в дистанционном зондировании используются те диапазоны, которые атмосфера пропускает, так называемые «окна прозрачности»

атмосферы» ( $\lambda=0,4-2,0\text{мкм}$ , два узких в районе 3 и 5 мкм,  $\lambda=8-14\text{мкм}$ ,  $\lambda$  больше 1 мм).

Рассеивание энергии происходит из-за взаимодействия электромагнитных волн с молекулами газов и частицами, присутствующими в атмосфере.

Отражение и поглощение излучения поверхностью земли зависит от вещества объектов и физических условий. Даже у объектов одного типа соотношение поглощения и отражения излучения зависит от длины волны. Таким образом, два объекта могут быть неразличимы в одном спектральном диапазоне и различимы в другом. В видимой части спектра эти различия воспринимаются как изменение цвета. То есть, например, если объект отражает большую часть излучения синего диапазона спектра, то он изобразится синим цветом на снимке. Таким образом, отражательные свойства различных типов объектов имеют важное значение при их идентификации. Отражательные свойства земной поверхности характеризует функция, называемая *спектральной отражательной способностью*.

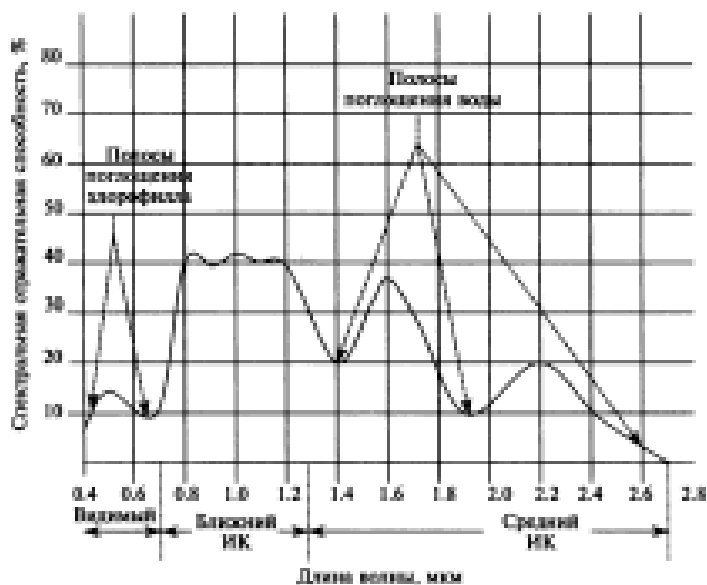


Рис. 1.9. Кривая спектральной отражательной способности зеленого растительного покрова

Рисунок 5 – Кривая отражательной способности растительности

График зависимости спектральной отражательной способности объекта от длины волны называется *кривой спектральной отражательной*

*способности.* По этому графику можно изучать спектральные отражательные характеристики объектов для того, чтобы выбрать диапазон электромагнитного спектра для наилучшего распознавания данных объектов на снимках.

*Преимущества и недостатки данных дистанционного зондирования.*

Основные преимуществами использования данных дистанционного зондирования:

- возможность получения информации в различных спектральных диапазонах;
- космические снимки охватывают большие площади;
- высокая периодичность получения данных;
- возможность получить данные о труднодоступных областях;
- в основном все работы камеральные;
- возможность получать данные разного разрешения в зависимости от решаемой задачи;
- возможность трехмерного анализа пространственных данных.

Основные недостатки использования данных дистанционного зондирования:

- требуется высокая квалификация и практический опыт оператора для их обработки;
- неэффективны при исследовании небольших территорий;
- высокая стоимость программного обеспечения.

*Области применения данных дистанционного зондирования.*

Задачи, решаемые с помощью данных дистанционного зондирования:

1. Определение метрических характеристик (границы, координаты, размеры, площади и т.д.) объектов местности.
2. Создание карт и планов.
3. Создание ортофотопланов.
4. Создание цифровых моделей рельефа и местности.
5. Выявление изменений произошедших на местности.
6. Оценка состояния территорий.
7. Создание трехмерных реалистичных измерительных моделей объектов.

Данные дистанционного зондирования и результаты их обработки применяются при:

1. инвентаризации природных ресурсов
2. исследовании природных ресурсов;
3. мониторинге стихийных бедствий и оценка их последствий;
4. изучении влияния антропогенного воздействия на окружающую среду;
5. планировании и управлении развитием территорий;
6. освоении недр;
7. ведении сельского и лесного хозяйства и др.

## **1.2 Классификация съемочных систем дистанционного зондирования.**

Классификация методов дистанционного зондирования. Основные характеристики съемочных систем. 1

### *Классификация методов дистанционного зондирования*

При классификации съемочных систем могут использоваться различные критерии, при этом их можно разделить на: воздушные и космические, пассивные и активные, однозональные и многозональные, фотографические и нефотграфические и др.

Все съемочные системы можно разделить на две большие группы: пассивные и активные.

К пассивным съемочным системам относятся:

1. фотографические;
2. телевизионные;
3. на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС);
4. сканерные;

К активным съемочным системам относятся:

1. радиолокационные;
2. лазерные.

*Основные характеристики съемочных систем*

Основными критериями съемочных систем являются: пространственное разрешение, спектральное разрешение, радиометрическое разрешение, временное разрешение.

Пространственное разрешение – это возможность отдельно воспроизводить на снимке мелкие детали снимаемого объекта.

Разрешающая способность  $R$  определяется числом отдельно воспроизводимых черных линий в 1 мм изображения при таком же белом интервале между ними.

Разрешающую способность съемочной системы определяется путем съемки миры (рисунок 6).

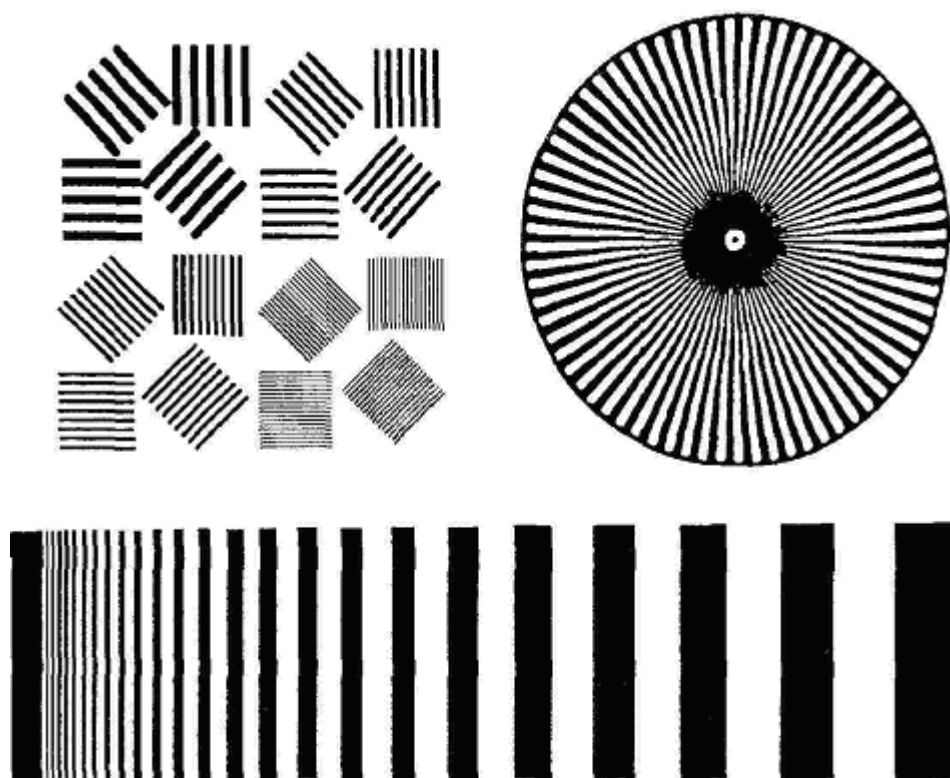


Рисунок 6 – Тест-объекты (миры)

Когда речь идет о сканерных или цифровых съемочных системах, где приемниками излучения служат ПЗС-линейки или ПЗС-матрицы, разрешающая способность определяется размером элемента сканирования на местности. Например, разрешающая способность сканерной съемочной системы 4 метра, это значит, что один пиксель ПЗС-линейки соответствует 4 метрам на местности.



Под спектральной разрешающей способностью понимают минимальную ширину спектральной зоны, в которой проводят съемку. При увеличении количества диапазонов и уменьшении каждого из них будет достигнута более высокая спектральная разрешающая способность. Увеличение спектральной разрешающей способности способствует лучшему выявлению различных типов объектов по изображениям.

Радиометрическое разрешение определяется чувствительностью сенсора к вариациям интенсивности электромагнитного излучения то есть наименьшей разницей в уровнях энергии излучения, которую можно зарегистрировать с помощью данной аппаратуры. Для фотографических съемочных систем радиометрическое разрешение определяет возможность определения малейших вариаций оттенков серого цвета, а для цифровых – числом уровней квантования.

Временное разрешение определяется периодичностью сбора данных, то есть период съемки одного и того же участка местности. Данные могут собираться ежедневно, раз в несколько дней, ежемесячно и т.д.

### **1.3 Фотографические съемочные системы**

Фотоаппараты, применяемые для аэрокосмической съемки, их характеристики. Кадровые фотографические съемочные системы. Устройство АФА. Планирование и выполнение аэрофотосъемки. 3

*Фотоаппараты, применяемые для аэрокосмической съемки, их характеристики. Кадровые фотографические съемочные системы. Устройство АФА.*

Аэрофотоаппарат (АФА) – оптико-электромеханическое устройство, предназначенное для фотографирования земной поверхности с различных летательных аппаратов.

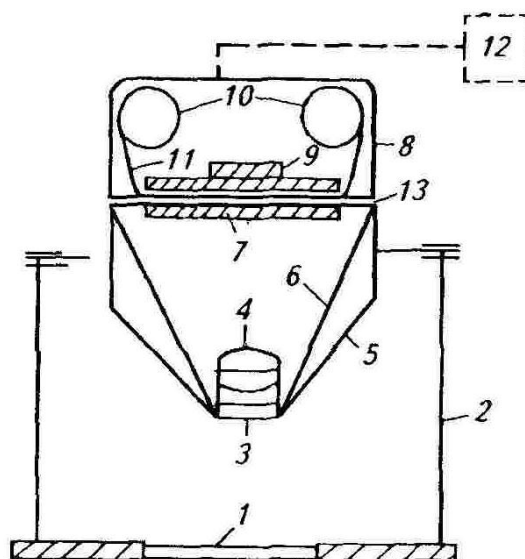
В аэрофотокамере располагается оптическая система – объектив и затвор. Основные характеристики объектива: фокусное расстояние и разрешающая способность.

Фокусное расстояние АФА – это расстояние от задней узловой точки объектива до фокальной плоскости АФА.

Разрешающая способность объектива характеризует возможности объектива разделять в создаваемом изображении близко расположенные мелкие детали.

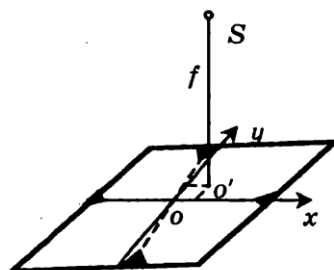
Кассета предназначена для размещения аэрофотоплёнки и приведения её в плоскость прикладной рамки во время экспонирования.

Командный прибор служит для автоматического дистанционного управления АФА.



- |                         |                                   |
|-------------------------|-----------------------------------|
| 1. стекло люка          | 8. приемная и передающая кассеты  |
| 2. аэрофотоустановка    | 9. прижимной стол                 |
| 3. светофильтр          | 10. приемная и передающая катушки |
| 4. объектив             | 11. аэроплёнка                    |
| 5. корпус камеры        | 12. пульт управления              |
| 6. оптический блок      | 13. прикладная рамка              |
| 7. выравнивающее стекло |                                   |

Рисунок 7 – Принципиальная схема аэрофотоаппарата



$o'$  – главная точка снимка

$S$  – точка фотографирования (центр проекции)

$F$  – фокусное расстояние объектива

## Рисунок 8 – Прикладная рамка аэрофотокамеры

Достоинства фотографических съемочных систем:

- + изображение представляет аналоговую модель снимаемого объекта
- + достаточно строгая пропорциональность цвета на снимке яркостям объектов
- + фотографический процесс изучен достаточно
- + фотоматериал имеет достаточно стабильные характеристики и свойства
- + высокая разрешающая способность

Недостатки фотографических съемочных систем:

- ограничение спектральной зоны съемки (0,3-1,1 мкм)
- необходимость проведения фотохимической обработки
- неоперативность доставки получаемой информации
- зависимость от погодных условий
- необходимость сканирования аэрофотоснимков

### *Планирование и выполнение аэрофотосъемки*

Основным документом для выполнения аэрофотосъемки является технический проект, которым определяются основные параметры аэрофотосъемки (высота фотографирования, продольное и поперечное перекрытия, базис фотографирования, расстояние между маршрутами, количество требуемых фотоматериалов).

На первом этапе определяются границы съемочных участков. Для этого по заданным значениям масштаба аэрофотосъемки и фокусного расстояния вычисляется высота фотографирования и по формуле (1) проверяют, удовлетворяют ли характеристики рельефа местности требованиям аэрофотосъемки.

$$(h_{\max} - h_{\min}) / H < 0.2, \quad (1)$$

Если условие не выполняется, то объект разбивается на отдельные съемочные участки, для каждого из которых вычисляются свои параметры, кроме того размер съемочного участка не должен быть слишком большим, чтобы аэрофотосъемка была выполнена в один полет.

Границами съемочных участков служат, как правило, рамки топографических трапеций, но можно использовать и другой подход. Для каждого съемочного участка вычисляются величины, приведенные в таблице.

Основными параметрами аэрофотосъемки являются: масштаб фотографирования ( $m$ ), высота фотографирования ( $H_\phi$ ), фокусное расстояние АФА ( $f$ ), а также продольное и поперечное перекрытия аэрофотоснимков ( $P_x$  и  $P_y$ ). Первые три параметра связаны соотношением:

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{H_\phi}$$

Высоту фотографирования относительно средней плоскости участка аэрофотосъемки  $H_\phi$  найдем по формуле:

$$H = m \cdot f.$$

Продольные и поперечные перекрытия снимков, определяются в соответствии с “Основными положениями по аэрофотосъемке”, выполняемой для создания и обновления карт.

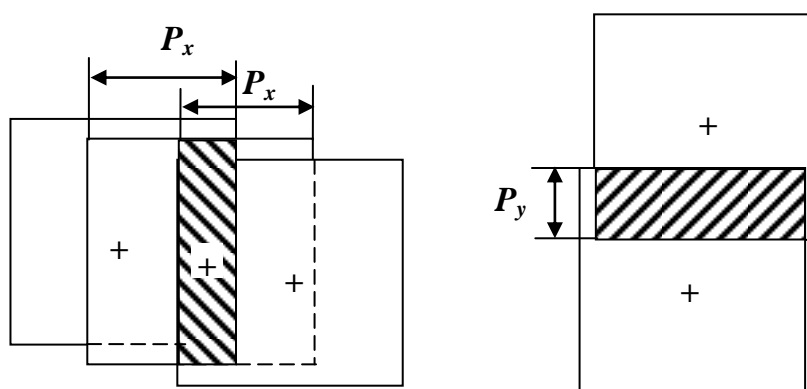


Рисунок 9 – Продольное и поперечное перекрытие снимков  
Продольное перекрытие определяется в соответствии с таблицей 5.

Таблица 5 – Таблица расчета продольного перекрытия снимков

Заданное $P_x\%$	Минимальное $P_0\%$	Максимальное $P_x\%$	
		$h:H < 0,2$	$h:H > 0,2$
60	56	66	70
80	78	83	85
90	89	92	93

Продольное перекрытие снимков рассчитывается по формуле:

$$P_X = P_0 + \Delta P_h + \Delta P_H \quad (16)$$

где  $P_0$  – минимальное заданное продольное перекрытие снимков,

$\Delta P_h$  – поправка за рельеф местности вычисляется по формуле:

$$\Delta P_h = \frac{h}{H_\phi} (100 - P_0) \quad (17)$$

$h$  – наибольшее превышение точек местности над средней плоскостью съемочного участка,

$\Delta P_H$  – навигационная поправка, которая согласно основных положений по аэрофотосъемке составляет 4-6% и зависит от масштаба аэрофотосъемки.

Поперечное перекрытие снимков определяется по таблице 6.

Таблица 6 – Таблица расчета поперечного перекрытия снимков

Масштаб аэрофотосъемки	Поперечное перекрытие %		
	Расчетное	Минимальное	Максимальное
Мельче 1:25000	$30 + 70 \frac{h}{H_\phi}$	20	+10
1:25000-1:10000	$35 + 65 \frac{h}{H_\phi}$	20	+15
Крупнее 1:10000	$40 + 60 \frac{h}{H_\phi}$	20	+20

Расчет базиса фотографирования на местности производится по формуле:

$$B_X = l_x \left(1 - \frac{P_x}{100}\right) \frac{H_\phi}{f}, \quad (18)$$

Расчет расстояния между осями маршрутов рассчитывается по формуле:

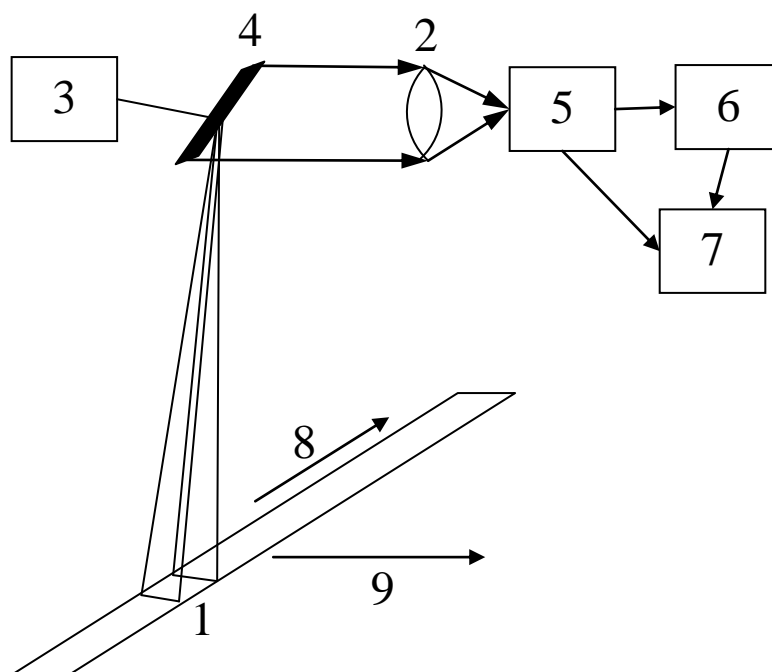
$$B_Y = l_y \left(1 - \frac{P_y}{100}\right) \frac{H_\Phi}{f}, \quad (19)$$

где  $l_x, l_y$  – формат кадра в миллиметрах.

#### 1.4 Оптико-механические и оптико-электронные сканеры

Принцип действия оптико-механических и оптико-электронных сканеров. Отличие геометрии формирования сканерного снимка от кадрового. 2

*Принцип действия оптико-механических и оптико-электронных сканеров. Отличие геометрии формирования сканерного снимка от кадрового.*

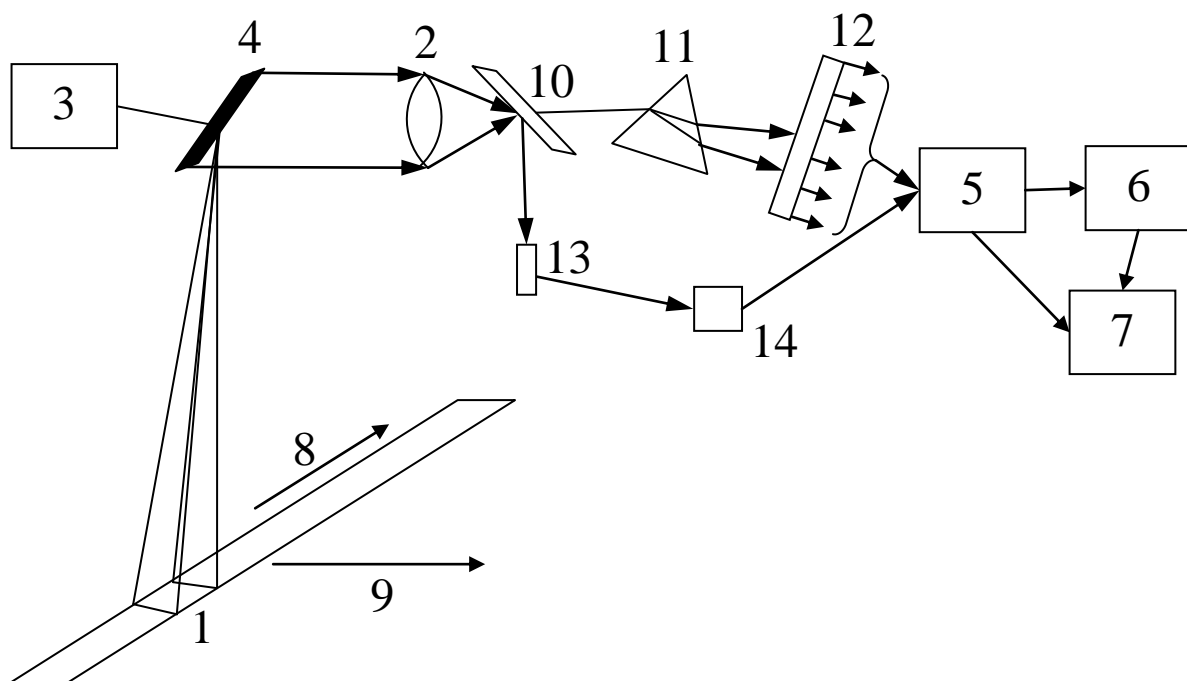


- 1 – площадка мгновенного обзора
- 2 – объектив
- 3 – механизм вращения
- 4 – сканирующее зеркало
- 5 – приемник излучения

- 6 – устройство магнитной записи
- 7 – передающее устройство
- 8 – направление сканирования
- 9 – направление съемки

Рисунок 10 – Принцип действия оптико-механического сканера

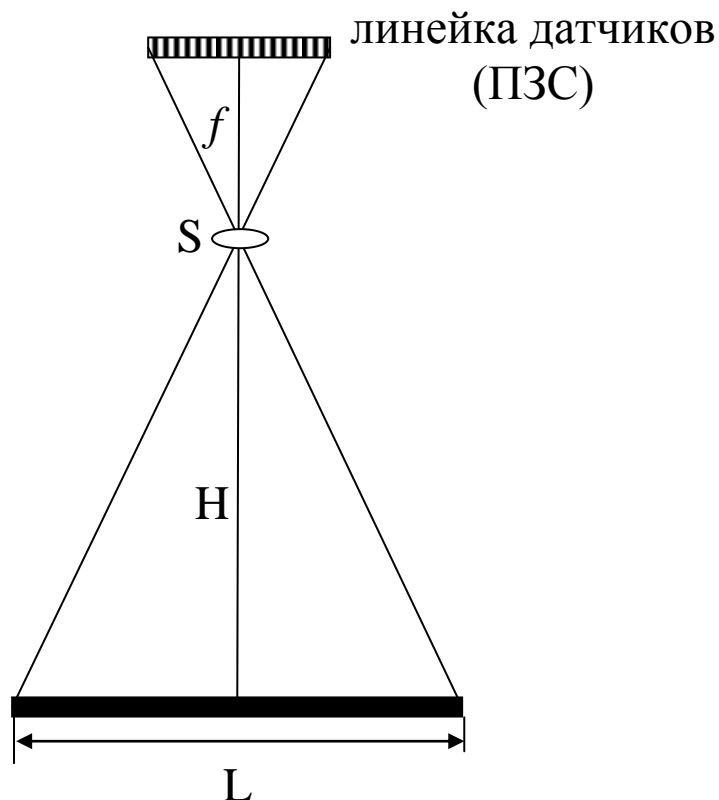
Оптико-механический сканер содержит только один чувствительный элемент – датчик, который позволяет измерять яркость небольшого участка, пикселя земной поверхности. Сканирующее зеркало просматривает полосу местности, что позволяет зарегистрировать яркость целого ряда пикселей земной поверхности за короткий промежуток времени. Поскольку сканер размещается на движущейся платформе, он аналогично записывает данные о следующей полосе пикселей земной поверхности. По мере движения платформы сканирующий механизм позволяет получить изображение на целую площадь. Принцип работы сканера показан на рисунке



- 1 – площадка мгновенного обзора
- 2 – объектив
- 3 – механизм вращения
- 4 – сканирующее зеркало
- 5 – приемник излучения
- 6 – устройство магнитной записи
- 7 – передающее устройство
- 8 – направление сканирования

- 9 – направление съемки
- 10 – полупрозрачное зеркало
- 11 – разделяющая призма
- 12 – линейка детекторов для различных участков спектра
- 13 – термальный детектор
- 14 – детектор для дальнего инфракрасного участка спектра

Рисунок 11 – Принцип действия многоспектрального оптико-механического сканера



$f$  – фокусное расстояние камеры

S – точка фотографирования (объектив)

H – высота фотографирования

L – ширина полосы захвата

Рисунок 12 – Принцип действия оптико-электронного сканера

В оптико-электронном сканере линейка датчиков ориентирована перпендикулярно направлению движения платформы. Отдельному чувствительному элементу линейки, имеющему размер  $a'$  поперек траектории полета, на земной поверхности соответствует пиксель с размером  $a$ .

Сканерное изображение отличается от кадрового тем, что кадровое изображение формируется по законам центральной проекции, а в сканерном по законам центральной проекции формируется каждая строка, соответственно каждая строка будет иметь элементы внешнего ориентирования.

Достоинства сканерных съемочных систем:

- + широкий спектральный диапазон съемки



- + оперативность доставки получаемой информации
- + высокая периодичность получения информации
- + не требуется сканирование изображений

Недостатки сканерных съемочных систем:

- зависимость от погодных условий
- необходимо учитывать, что каждая строка изображения имеет свои элементы внешнего ориентирования

Как уже говорилось, сканеры могут работать в достаточно широком диапазоне спектра, и следует выделить тепловую съемку, то есть съемку, ведущуюся в инфракрасной и тепловой зоне электромагнитного спектра.

Принцип получения изображения основан на измерении температур объектов местности. Само же изображение аналогично фотографическому.

Достоинства и недостатки тепловых съемочных систем:

- + возможность выполнять съемку, как в дневное, так и в ночное время
- + используются для картографирования подземных коммуникаций, выявления техногенных нарушений и изучения негативных экологических процессов
- высокого разрешения на местности можно достичь только на малых высотах

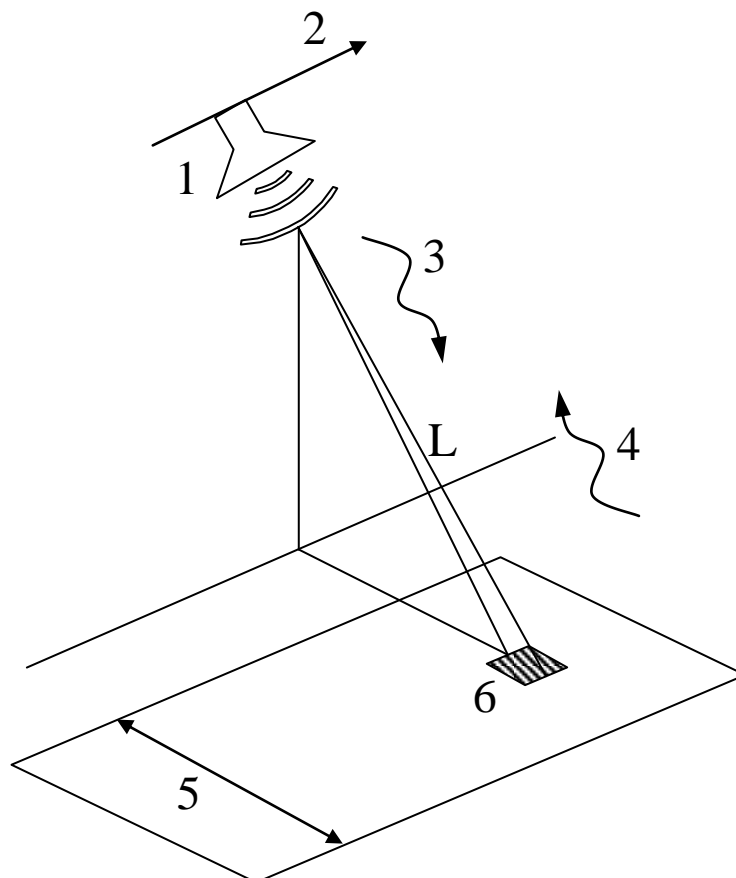
## **1.5 Радиолокационные и лазерные съемочные системы**

Принцип действия активных съемочных систем. 2

*Принцип действия активных съемочных систем*

*Радиолокационные съемочные системы*

Принцип действия активных съемочных систем заключается в следующем: на носитель устанавливается передатчик с антенной, который посылает в направлении Земли импульс, и после некоторой паузы выполняется прием отраженного сигнала. Интенсивность отраженного сигнала зависит от дальности и различна для различных типов объектов.



- 1 – антенна
- 2 – направление движения
- 3 – зондирующий сигнал
- 4 – отраженный сигнал
- 5 – полоса наблюдения
- 6 – объект

Рисунок 13 – Принцип действия радиолокационных съемочных систем

Отраженный сигнал вернется назад через интервал времени:

$$\Delta t = 2L/c,$$

где  $c$  – скорость света,

$L$  – расстояние от объекта до спутника,

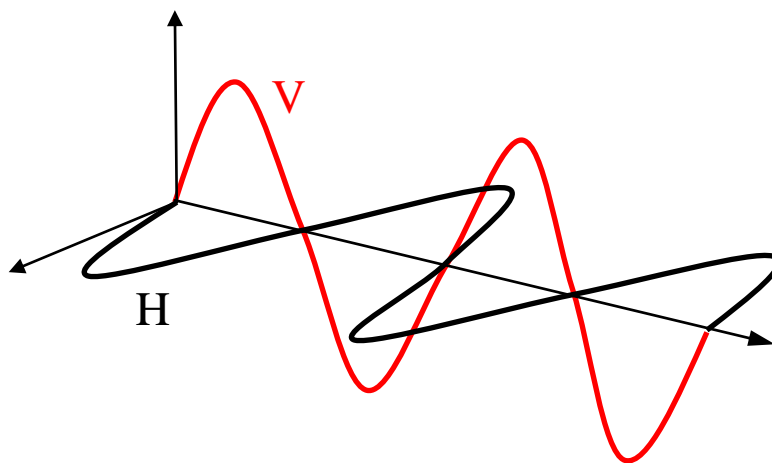
2 учитывается, так как сигнал проходит путь  $L$  дважды.

Таким образом, измеряя  $\Delta t$ , можно найти расстояние до объекта.

Радиолокатор перемещается вместе с носителем, считывая по строкам сигнал, таким же образом, как и сканеры.

Важным физическим параметром радарной съемки является поляризация. Поляризация это передаваемый и получаемый сигнал, распространяющийся в определенной плоскости.

Поляризационные плоскости обычно бывают горизонтальные Н и вертикальные V.



HH и VV - одинаковые поляризации или совместные поляризации.

HV и VH - перекрестные или непарные поляризации

Рисунок 14 – Виды поляризации

Вертикально-поляризованная волна будет взаимодействовать с вертикальными стеблями слоя растений

Горизонтально-поляризованная волна будет проникать сквозь слой растений.

Комбинирование разных поляризаций может улучшать различные классификации, например – определение различных классов растительности.

Достоинства радиолокационных съемочных систем

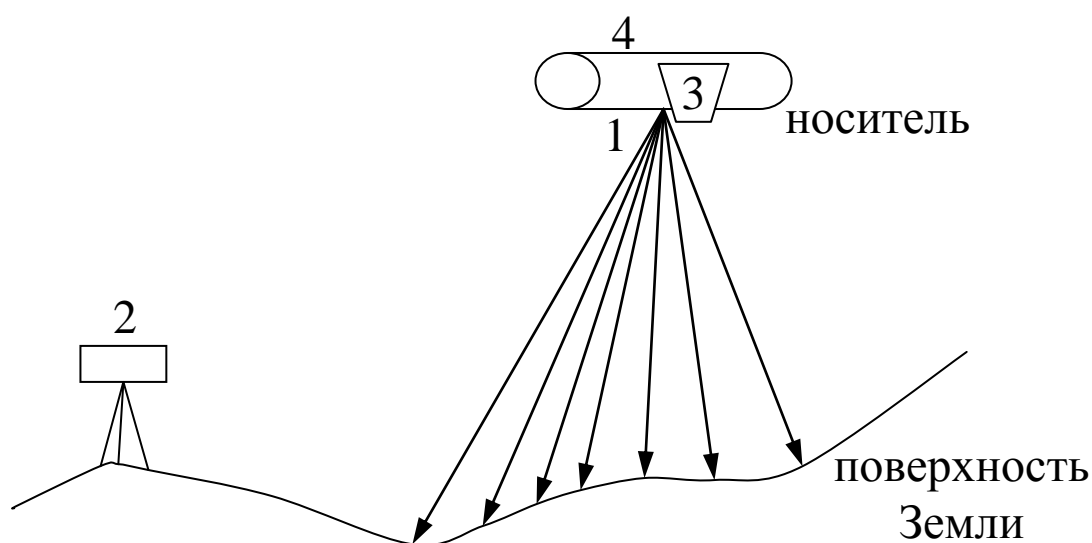
- + не зависит от облачности, тумана и смены дня и ночи
- + космические РЛС имеют преимущество глобального доступа, широкого охвата (то есть местности, видимой на земле), регулярного повтора изображений, большого архива данных, низкой стоимости получения данных, приемлемого разрешения изображений
- + бортовая самолётная РЛС имеет преимущество высокого разрешения

- + применяют для изучения водных поверхностей, определения границ береговых линий, зон подтопления и т.п.

Недостатки радиолокационных съемочных систем

- более низкая разрешающая способность, по сравнению с аэрофотосъемкой и цифровой съемкой
- стоимость выше, чем аэрофотосъемка и цифровая съемка
- 

*Лазерные съемочные системы*



- 1 – лазерный сканер
- 2 – базовая станция GPS
- 3 – аэрофотоаппарат
- 4 – навигационная система GPS/IMU

Рисунок 15 – Схема воздушного лазерного сканирования

Активным элементом лидара является лазер, работающий, как правило, в импульсном режиме с рабочей длиной волны в ближнем инфракрасном диапазоне спектра. Лазер излучает коротковолновые импульсы, направление распространения которых регулируется оптической системой и сканирующим элементом. В каждом элементарном измерении в процессе сканирования регистрируются наклонная дальность (псевдодальность) до точки отражения и значение угла, определяющего направление распространения зондирующего луча в системе координат сканера. В

зависимости от модели воздушного лазерного сканера возможна регистрация более одного (до десяти) отражений для каждого единичного импульса, что приводит к увеличению плотности точек лазерных отражений (ТЛО).

Отраженный сигнал после приема дискретизируется, то есть преобразуется в цифровой вид.

Помимо регистрации пространственных координат точек производится определение интенсивности отраженного сигнала.

В состав съемочной аппаратуры входят: лазерный сканер, навигационная система (GPS/IMU), цифровой аэрофотоаппарат и сеть наземных базовых станций.

Навигационная система (GPS/IMU) обеспечивает набор элементов внешнего ориентирования для каждого отражения.

Аэрофотоаппарат осуществляет получение цифровых аэрофотоснимков.

Сеть наземных базовых станций необходима для уточнения пространственного положения носителя во время полета.

Достоинства лазерных съемочных систем:

- + результат съемки - трехмерное цифровое изображение
- + эффективны при обследовании линий электропередач, городов и т.п.
- + высокая точность получаемой информации
- + высокая производительность
- + высокая оперативность сбора данных
- + не зависит от сезонных ограничений

Недостатки лазерных съемочных систем:

- высокая стоимость
- зависимость от состояния атмосферы
- невозможность его применения при съемке местности с больших высот, снижение точности с увеличением высоты съемки

## 2. Фотограмметрическая обработка одиночных снимков

### 2.1 Теория построения изображения на фотоснимке.

*Геометрические и физические свойства снимка. Принципиальная схема построения изображения методом центрального проектирования.*

Для получения снимка цифрового или фотографического используется оптическая камера.

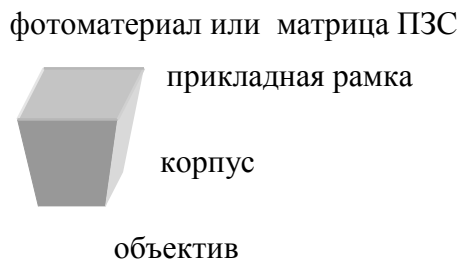


Рисунок 16 – Принципиальная схема АФА

Т.о. в обоих случаях изображение строится оптическим путем.

Очевидно, качество изображения определяется объективом.

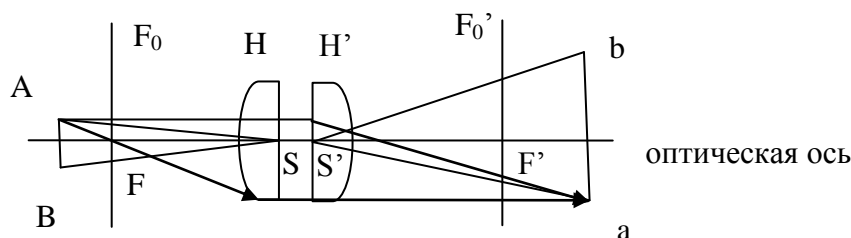
Идеальный объектив соответствует следующим условиям:

гомоцентрический пучок лучей останется гомоцентрическим после прохождения объектива, то есть точка изобразится точкой;

плоскость перпендикулярная оси объектива изобразится плоскостью перпендикулярной этой оси.

плоский предмет перпендикулярный оптической оси изображается подобно самому объекту.

Для изучения свойств снимка необходимо знать сущность построения изображения объективом.



$H$  и  $H'$  – главные передняя и задняя плоскости объектива

$S$  и  $S'$  – передняя и дальняя узловые точки объектива

$F$  и  $F'$  – передний и задний фокусы объектива

$F_0$  и  $F_0'$  – передняя и задняя фокальные плоскости объектива

$$SF=f_{\text{объектива}}=S'F'$$

Рисунок 17 – Построение изображения объективом

От любой точки объекта идет пучок лучей. Изображение строят лучи идущие параллельно оптической оси, проходящие через передний фокус и переднюю узловую точку объектива.

Оптическая камера предназначенная для фотографической или цифровой съемки всегда отфокусирована на бесконечность следовательно в этих камерах изображение будет строиться в фокальной плоскости.

Тогда рис. будет выглядеть другим образом

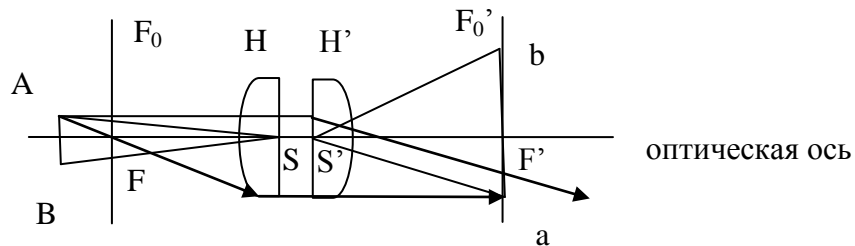


Рисунок 18 - Построение изображения объективом в аэрокамере

Из рисунка 18 видно, что для построения изображения в фокальной плоскости достаточно знать ход лучей через переднюю и заднюю узловые точки объектива. Так как эти лучи входят и выходят под одним и тем же углом, то можно переднюю и заднюю главные плоскости объектива совместить. Суть построения от этого не изменится.

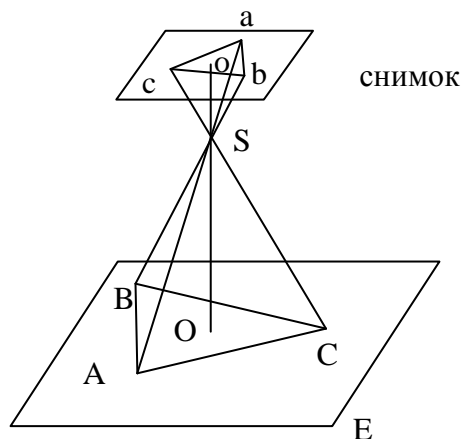


Рисунок 19 – Схема построения изображения в АФА

SO – фокусное расстояние объектива

В идеале фокусное расстояние объектива совпадает с фокусным расстоянием фотокамеры – расстояние от задней узловой точки объектива до прикладной рамки.

OSo – оптическая ось

о – главная точка снимка

OSo перпендикулярно P

E – горизонтальная плоскость

abc – изображение ABC на снимке

Согласно теории идеального снимка изображение abc будет подобно объекту ABC.

Очевидно, что при аэро съемке  $SO=H$  – высота фотографирования.

Отношение размера изображения на снимке к размерам самого объекта называется масштабом снимка.

Из  $\Delta Sca$  и  $\Delta SCA$

$\Delta Sba$  и  $\Delta SBA$  и т.д.

Можно записать, что  $\frac{1}{m} = \frac{f}{H}$

Выводы:

Фотографическое изображение строится в центральной проекции.

*Центральная проекция* – это способ построения изображения прямолинейными лучами, проходящими через 1 точку.

*Центр проекции* – узловая точка объектива.

*Предметная плоскость* – плоскость, в которой находится объект.

*Плоскость картины* – плоскость, в которой стоят изображение.

*Элементы центральной проекции и их свойства.*

Чтобы вести обработку снимков надо знать законы построения изображений. Если снимок и предметная плоскость параллельны, а объект плоский, то изображение подобно объекту и никаких углов учитывать не надо. В реальности предметная плоскость никогда не бывает горизонтальной, а снимки во время полета получают углы наклона. Очевидно, что изображение на таком снимке не будет подобно объекту. Так как



изображение строится по закону центральной проекции, то и преобразовываться оно будет по этому же закону.

Рассмотрим основные элементы центральной проекции и её свойства.

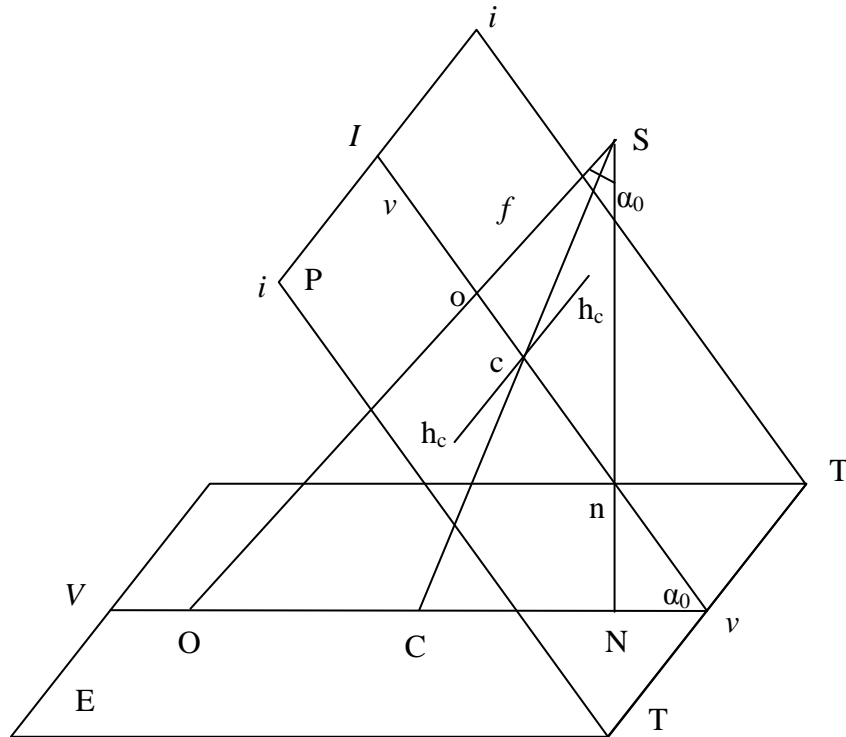


Рисунок 20 – Элементы центральной проекции

$\alpha_0$  – угол наклона снимка

E – предметная плоскость

P – плоскость картины (снимок)

S – центр проекции

$So=f$  – фокусное расстояние

o – главная точка снимка

n – точка надира

c – точка нулевых искажений

O, C, N – тоже в предметной плоскости

ТТ – основание картины

Q – плоскость главного вертикала (через S перпендикулярно ТТ и E)

$vosnv$  – главный вертикаль (след сечения P плоскостью Q)

$iIi$  – линия истинного горизонта (след сечения  $P$  горизонтальной плоскостью проходящей через  $S$ )

$\nu V$  – линия направления съемки

### Свойства точек центральной проекции

$o$  – её положение всегда известно на снимке, от неё производятся все построения.

$c$  – углы на снимке с вершиной в этой точке и в предметной плоскости с вершиной в точке  $C$  всегда равны, направления проведенные через точку  $c$  не искажаются.

$n$  – линии перпендикулярные предметной плоскости изображаются сходящимися в этой точке, точки лежащие выше или ниже предметной плоскости на снимке смещаются по направлениям к  $n$  или от неё.

$I$  – линии параллельные  $\nu V$  изображаются сходящимися в точке  $I$ , линии параллельные между собой произвольно расположенные в предметной плоскости изображаются сходящимися в боковых точках схода на линии истинного горизонта.

$\nu\nu$  – на ней происходят мах смещение точек за влияние угла наклона. При этом масштаб меняется от 1 до бесконечности.

$h_c h_c$  – линия проходящая через  $c$  перпендикулярно  $\nu\nu$  – линия неискаженных масштабов.

## 2.2 Системы координат применяемые в фотограмметрии.

*Плоская система координат снимка. Пространственная система координат точек снимка. Геодезическая система координат. Фотограмметрическая система координат.*

Известно, что фотограмметрия изучает количественные и качественные характеристики объектов по их изображениям. Очевидно, что для этого нужно найти зависимость между точками объекта и снимка. Для этого нужно иметь координаты точек на снимке и местности. Практически могут использоваться любые системы координат, однако, предпочитают для объекта использовать те системы координат, которые используются при

натурном изучении, а для снимка использую систему, связанную со снимком и АФА.

*Для снимков используют:*

1. Плоская система координат точек снимка.

В этой системе за начало принимают главную точку снимка  $o$ , а направление осей задают координатные метки, которые выгравированы на прикладной рамке АФА.

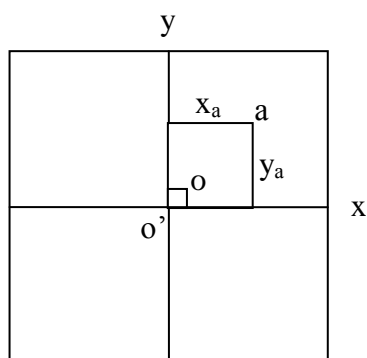


Рисунок 21 – Плоская система координат снимка

Так сделать координатные метки так, чтобы оси проходили через  $o$  невозможно, то действительная т.  $o$  будет лежать в стороне от точки пересечения осей координат.

Положение т.  $o$  в плоской системе координат будет задаваться координатами  $x_0y_0$ . Таким образом, измеренные на снимке координаты  $x_a y_a$ , равны  $x = x_a - x_0; y = y_a - y_0$ .

2. Пространственная система координат точек снимка.

Это пространственная прямоугольная правая система координат. Она может быть задана как угодно в зависимости от решаемой задачи, но наиболее распространена система, в которой начало берут в т.  $S$ , а направления осей близкое к направлению осей снимка, а ось  $Z$  близка к отвесу.

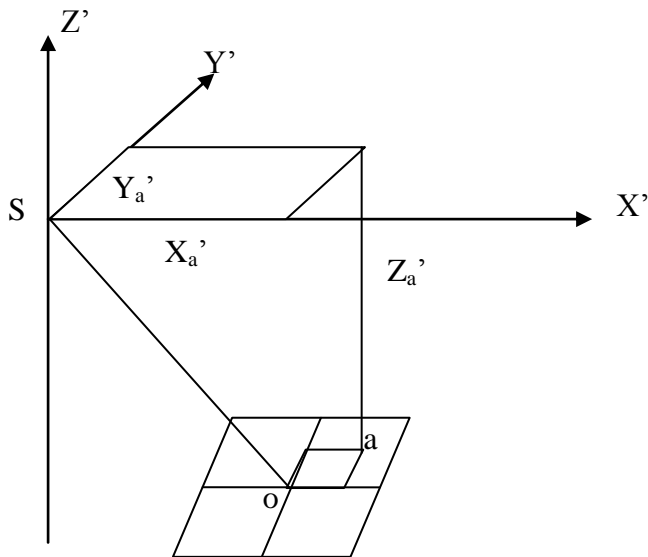


Рисунок 22 – Пространственная система координат снимка

$X'_a, Y'_a, Z'_a$  – пространственные координаты точек снимка.

*Системы координат объекта:*

1. Система координат Гаусса.

Это поперечно-цилиндрическая проекция с 6 и 3 градусными зонами.

Для небольших участков плоские координаты Гаусса  $XU$  могут рассматриваться как прямоугольные ортогональные, тогда отличие от фотограмметрической системы будет заключаться в том, что фотограмметрическая система правая, а геодезическая левая.

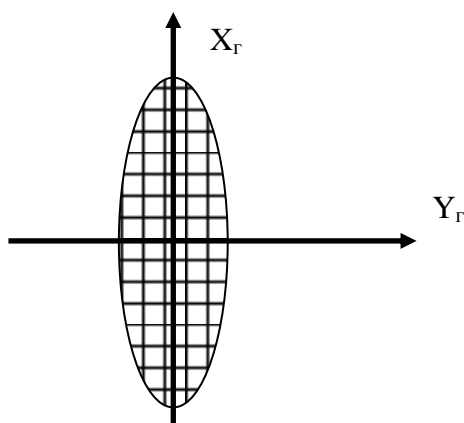


Рисунок 23 – Геодезическая система координат

Высоты геодезической системы отсчитываются от уровня поверхности, а в фотограмметрической от плоскости  $XU$ . Для перехода от

фотограмметрической высоты к геодезической необходимо ввести поправку за кривизну Земли.

## 2. Фотограмметрическая система координат.

Аналогична рассмотренной ранее, может применяться как для снимка так и для объекта местности.

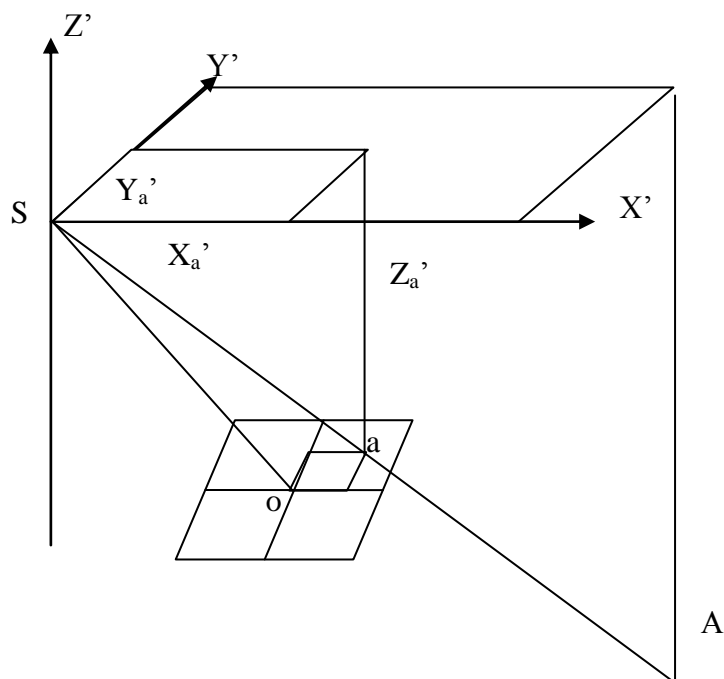


Рисунок 24 – Фотограмметрическая система координат

### 2.3 Элементы ориентирования одиночного аэрофотоснимка.

*Элементы внутреннего ориентирования снимка. Элементы внешнего ориентирования снимка.*

Чтобы установить связь между координатами точек снимка и местности необходимо знать положение точки фотографирования ( $X_S Y_S Z_S$ ), положение снимка относительно т.  $S - x_0 y_0 f$ , и угловое ориентирование снимка относительно заданной системы координат – фотограмметрической или геодезической. Для этого введены понятия элементы внутреннего и внешнего ориентирования снимков. *Элементами внутреннего ориентирования снимка* называются координаты главной точки  $x_0 y_0 f$  и фокусное расстояние, которые определяют положение центра проекции (т.

фотографирования) относительно системы координат снимка  $oxy$ . Угловыми элементами внешнего ориентирования называются углы Эйлера, которые определяют положение системы координат снимка относительно внешней системы координат (геодезической, фотограмметрической, геоцентрической).

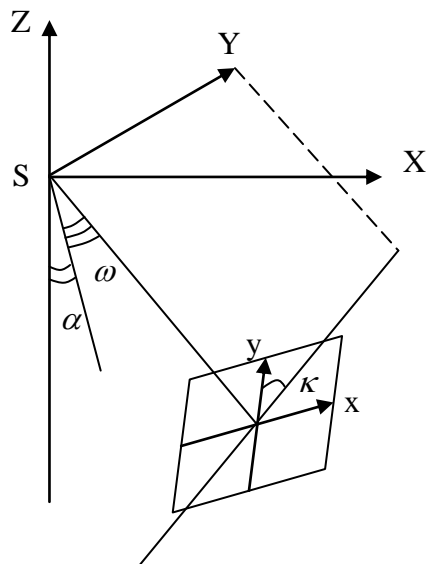


Рисунок 25 – Угловые элементы внешнего ориентирования снимка

Если повернуть координаты снимка на эти углы, то она совпадет с системой координат  $SXYZ$ .

$\alpha$  – угол между осью  $Z$  и проекцией главного луча  $So$  на плоскость  $SXZ$ .

$\omega$  – угол между главным лучом  $So$  и его проекцией на плоскость  $SXZ$ .

$\kappa$  – угол между осью  $y$  и следом сечения снимка плоскостью проходящей через ось  $SY$  и главный луч.

К элементам внешнего ориентирования помимо угловых относятся и линейные  $X_S Y_S Z_S$ .

## 2.4 Связь плоских и пространственных координат точек снимка

*Вывод формул связи плоских и пространственных координат точек снимка*

$x, y$  – плоские координаты, измеренные в плоской системе координат снимка. Координаты точек объекта определяются в какой-то внешней

системе координат. Очевидно, чтобы найти зависимость между координатами точек снимка и местности их нужно преобразовать в одну систему координат.

Наиболее распространенная формула связи координат двух систем

$$\begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{pmatrix}$$

$a, b, c$  – косинусы углов между осями двух систем.

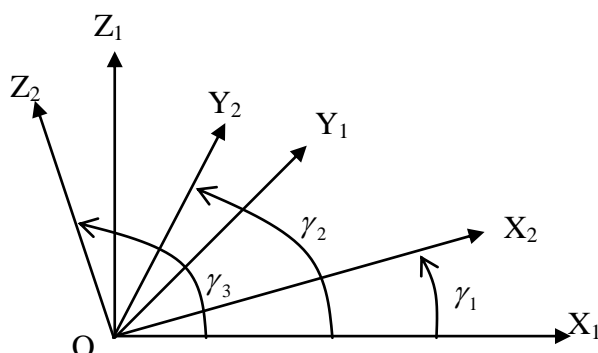


Рисунок 26 – Углы определяющие положение одной системы координат относительно другой

Чтобы определить между какими осями берут углы, составим таблицу.

	$X_2$	$Y_2$	$Z_2$
$X_1$	$a_1 = \cos \gamma_1$	$a_2 = \cos \gamma_2$	$a_3 = \cos \gamma_3$
$Y_1$	$b_1 = \cos \gamma_4$	$b_2 = \cos \gamma_5$	$b_3 = \cos \gamma_6$
$Z_1$	$c_1 = \cos \gamma_7$	$c_2 = \cos \gamma_8$	$c_3 = \cos \gamma_9$

$a, b, c$  – определяют положение одной системы координат относительно другой.

$$\left. \begin{aligned} a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 &= 1 \\ b_1^2 + b_2^2 + b_3^2 &= 1 \\ c_1^2 + c_2^2 + c_3^2 &= 1 \\ a_1 b_1 + a_2 b_2 + a_3 b_3 &= 0 \\ c_1 b_1 + c_2 b_2 + c_3 b_3 &= 0 \\ a_1 c_1 + a_2 c_2 + a_3 c_3 &= 0 \end{aligned} \right\}$$

Из формул следует, что  $a, b, c$  – зависимые величины и могут быть выражены через три угла которые однозначно определяют положение одной системы координат относительно другой их называют углами Эйлера.

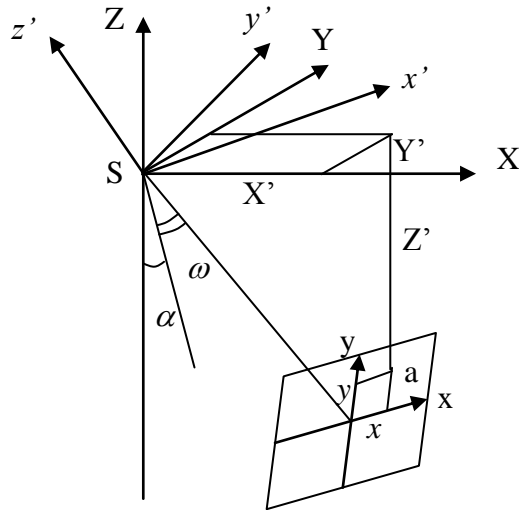


Рисунок 27 – Связь двух систем координат

SXYZ – внешняя система координат

oxy – система координат снимка

Sx'y' – система координат снимка с началом в т. S

x,y – плоские координаты точки a

x',y',z'=f – координаты т. a в системе Sx'y'

X',Y',Z' – пространственные координаты т. a в системе координат SXYZ

Чтобы координаты точки объекта XYZ и точки снимка были в одной системе надо от координат x',y',z' перейти к X',Y',Z'.

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

Так как x'=x,y'=y,z'=-f, то опустим индексы, а также что главная точка на снимке может не совпадать с истинной и координаты её x<sub>0</sub>,y<sub>0</sub>

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ -f \end{pmatrix}$$

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



## 2.5 Зависимость между координатами точек местности и снимка.

Вывод формул прямой и обратной связи между координатами точек местности и снимка.

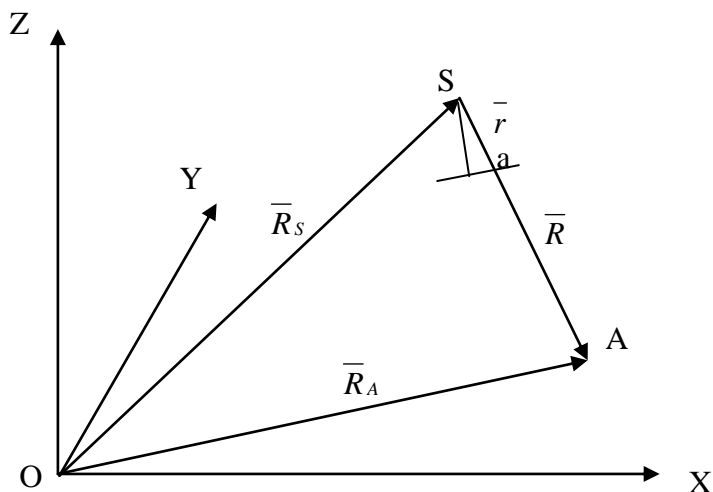


Рисунок 28 - Зависимость между координатами точек местности и снимка  
(прямая)

Введем обозначения

$\overline{OS} = \overline{R}_s$  – вектор определяющий положение  $S$  относительно  $O$

$\overline{Sa} = \overline{r}$  – вектор определяющий положение  $a$  относительно  $S$

$\overline{OA} = \overline{R}_A$  – вектор определяющий положение  $A$  относительно  $O$

$\overline{SA} = \overline{R}$  – вектор определяющий положение  $A$  относительно  $S$

$\overline{R}$  и  $\overline{r}$  коллинеарные

$$\overline{R} = N\overline{r}$$

$N$  – скаляр

$$\overline{R} = \overline{R}_A - \overline{R}_s$$

$N = \frac{\overline{R}}{\overline{r}} = \frac{\overline{R}_A - \overline{R}_s}{\overline{r}}$  – выражает связь точек снимка и точек местности в

векторной форме.

Для практического применения от векторной формы переходим к координатной. Для этого все векторы проектируются на оси системы  $OXYZ$ .

$$N = \frac{X - X_s}{X'} = \frac{Y - Y_s}{Y'} = \frac{Z - Z_s}{Z'}$$

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

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

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

Из анализа формул видно, что при вычислении нужно знать  $Z$  точки местности. Она может быть снята с карты. Т.о. точность  $X'Y'$  будет зависеть от точности измерения  $xu$  и от ошибки определения  $Z$ .

Для вычисления координат точек местности эти формулы используются редко. В основном для определения элементов внешнего ориентирования снимка.

### Обратная связь

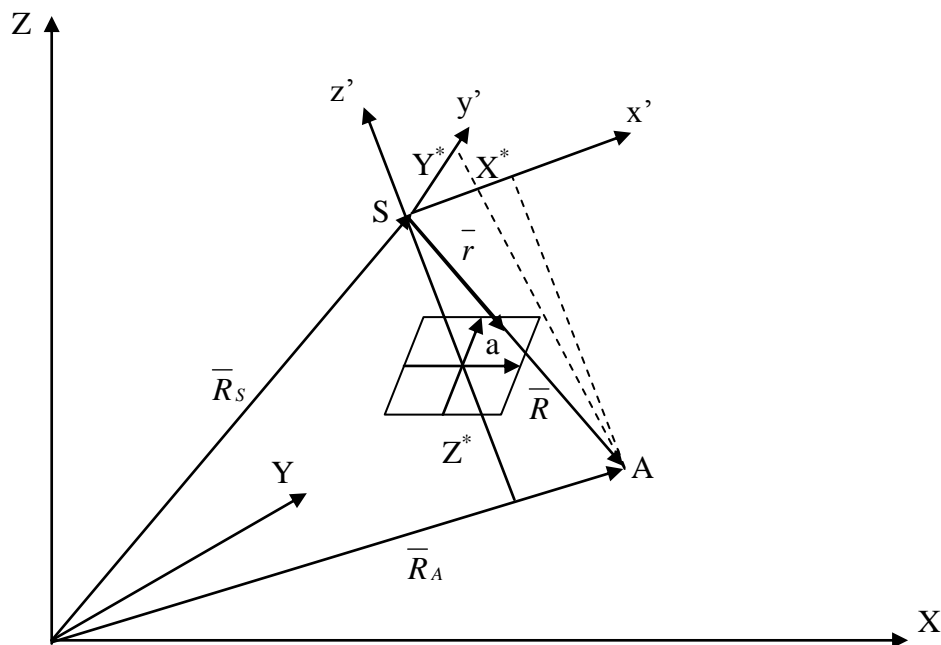


Рисунок 29 - Зависимость между координатами точек местности и снимка (обратная)

$$N = \frac{\bar{R}}{r} = \frac{\bar{R}_A - \bar{R}_s}{r}$$

Отличие от предыдущего вывода в том, что при переходе к координатной форме векторы проектируются не на внешнюю систему координат, а на систему координат снимка.

$$\frac{X^*}{x - x_0} = \frac{Y^*}{y - y_0} = \frac{Z^*}{-f}$$

$$x - x_0 = -f \frac{X^*}{Z^*}$$

$$y - y_0 = -f \frac{Y^*}{Z^*}$$

Обычно для точки фотографирования и точки местности известны координаты во внешней системе  $X_S Y_S Z_S XYZ$ .

Запишем зависимость между координатами в системе координат снимка и во внешней системе.

$$\begin{pmatrix} X^* \\ Y^* \\ Z^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X - X_S \\ Y - Y_S \\ Z - Z_S \end{pmatrix}$$

$$\left. \begin{aligned} X^* &= a_1(X - X_S) + b_1(Y - Y_S) + c_1(Z - Z_S) \\ Y^* &= a_2(X - X_S) + b_2(Y - Y_S) + c_2(Z - Z_S) \\ Z^* &= a_3(X - X_S) + b_3(Y - Y_S) + c_3(Z - Z_S) \end{aligned} \right\}$$

## 2.6 Определение элементов внешнего ориентирования снимка по координатам опорных точек.

*Решение уравнений для определения элементов внешнего ориентирования снимка по координатам опорных точек.*

Из изложенного ранее следует, что для определения координат точек местности нужно знать элементы внешнего ориентирования снимка. В настоящее время координаты  $X_S Y_S Z_S$  можно определить с помощью GPS, а угловые элементы можно определить инерциальными системами. Но так как эти системы дорогостоящие и могут иметь сбои в работе, то применяются не всегда. Поэтому используют фотограмметрический метод определения элементов внешнего ориентирования – по опорным точкам.

Опорными точками называют точки, координаты которых определены на местности, как правило, в геодезической системе координат Гаусса и они опознаны на снимке. Если измерить координаты опорных точек на снимке, то можно записать прямую или обратную связь координат точек снимка и местности. Рассмотрим вариант для обратной связи.

$$x - x_0 = -f \frac{X^*}{Z^*}$$

$$y - y_0 = -f \frac{Y^*}{Z^*}$$

$$\left. \begin{aligned} X^* &= a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s) \\ Y^* &= a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s) \\ Z^* &= a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s) \end{aligned} \right\}$$

Здесь неизвестные  $X_s Y_s Z_s \alpha \omega \kappa$ .

Одна опорная точка дает 2 уравнения с 6 неизвестными.

Если взять три опорные точки, то получим 6 уравнений с 6 неизвестными – то есть их можно решить.

Для того, чтобы решить с контролем берут 4 опорные точки.

В данных уравнениях неизвестные входят в направляющие косинусы, которые являются тригонометрическими функциями и кроме того они перемножаются друг на друга, такие уравнения называются нелинейными.

Непосредственно такие уравнения решить нельзя. Для этого используют различные приемы. Наиболее распространенный способ – приведение нелинейных уравнений к линейному виду путем разложения в ряд Тейлора.

Для этого задают приближенные значения функции и дополняют её частными производными.

$$\varphi = \varphi^0 + \frac{\partial \varphi}{\partial x} \delta x + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \delta y + \frac{\partial \varphi}{\partial z} \delta z + \dots$$

Если приближенная функция задана грубо, то добавляют вторую, третью, четвертую и т.д. производные.

В фотограмметрии, как правило, аргументы задают грубо и при разложении в ряд следовало бы расписывать до  $n$  производной, но тогда уравнения получаются громоздкими и чтобы этого избежать ограничиваются первой производной. А чтобы достичь соответственной точности используют итерационный метод Ньютона.

Основываясь на сказанном, распишем

$$x_{изм} = \varphi_x(X_s Y_s Z_s \alpha \omega \kappa) + \frac{\partial \varphi_x}{\partial X_s} \delta X_s + \frac{\partial \varphi_x}{\partial Y_s} \delta Y_s + \frac{\partial \varphi_x}{\partial Z_s} \delta Z_s + \frac{\partial \varphi_x}{\partial \alpha} \delta \alpha + \frac{\partial \varphi_x}{\partial \omega} \delta \omega + \frac{\partial \varphi_x}{\partial \kappa} \delta \kappa$$

$$y_{изм} = \varphi_y(X_S Y_S Z_S \alpha \omega \kappa) + \frac{\partial \varphi_y}{\partial X_S} \delta X_S + \frac{\partial \varphi_y}{\partial Y_S} \delta Y_S + \frac{\partial \varphi_y}{\partial Z_S} \delta Z_S + \frac{\partial \varphi_y}{\partial \alpha} \delta \alpha + \frac{\partial \varphi_y}{\partial \omega} \delta \omega + \frac{\partial \varphi_y}{\partial \kappa} \delta \kappa$$

$$x_{изм} = x - x_0$$

$$y_{изм} = y - y_0$$

Введем обозначения

$$x_{выч} = \varphi(X^0_S Y^0_S Z^0_S \alpha^0 \omega^0 \kappa^0) = -f \frac{X^*}{Z^*} \quad (2)$$

$$y_{выч} = \varphi(X^0_S Y^0_S Z^0_S \alpha^0 \omega^0 \kappa^0) = -f \frac{Y^*}{Z^*} \text{-функции, вычисленные по приближенным}$$

значениям аргументов

$$a_x = \frac{\partial \varphi_x}{\partial X_S}; b_x = \frac{\partial \varphi_x}{\partial Y_S}; c_x = \frac{\partial \varphi_x}{\partial Z_S}; d_x = \frac{\partial \varphi_x}{\partial \alpha}; e_x = \frac{\partial \varphi_x}{\partial \omega}; g_x = \frac{\partial \varphi_x}{\partial \kappa}$$

$$a_y = \frac{\partial \varphi_y}{\partial X_S}; b_y = \frac{\partial \varphi_y}{\partial Y_S}; c_y = \frac{\partial \varphi_y}{\partial Z_S}; d_y = \frac{\partial \varphi_y}{\partial \alpha}; e_y = \frac{\partial \varphi_y}{\partial \omega}; g_y = \frac{\partial \varphi_y}{\partial \kappa}$$

$$x_{изм} = x_{выч} + a_x \delta X_S + b_x \delta Y_S + c_x \delta Z_S + d_x \delta \alpha + e_x \delta \omega + g_x \delta \kappa$$

$$y_{изм} = y_{выч} + a_y \delta X_S + b_y \delta Y_S + c_y \delta Z_S + d_y \delta \alpha + e_y \delta \omega + g_y \delta \kappa$$

Это уравнения в каноническом виде.

Запишем в виде уравнений.

$$a_x \delta X_S + b_x \delta Y_S + c_x \delta Z_S + d_x \delta \alpha + e_x \delta \omega + g_x \delta \kappa + (x_{выч} - x_{изм}) = 0 \quad (1)$$

$$a_y \delta X_S + b_y \delta Y_S + c_y \delta Z_S + d_y \delta \alpha + e_y \delta \omega + g_y \delta \kappa + \underbrace{(y_{выч} - y_{изм})}_{l_y} = 0$$

Здесь неизвестные –  $\delta X_S \delta Y_S \delta Z_S \delta \alpha \delta \omega \delta \kappa$  – поправки к приближенным значениям аргументов  $X^0_S Y^0_S Z^0_S \alpha^0 \omega^0 \kappa^0$ .

$abc \text{ deg}$  – коэффициенты при неизвестных.

$l_x l_y$  – свободные члены.

Уравнение вида (1) составляют для каждой опорной точки, если число опорных точек будет не 3 а больше, то в правой части будет не 0, а  $v_x v_y$ .

Если число уравнений больше числа неизвестных, то уравнения решаются по методу наименьших квадратов.

$$[vv] = \min$$

$$[pvv] = \min$$

Чтобы выполнить численное решение уравнений нужно вычислить численные значения коэффициентов  $abcdeg$  и  $l_x l_y$ .

$x_{изм}$ ,  $y_{изм}$  – измеренные на снимке координаты опорных точек.

Чтобы найти  $x_{выч}$ ,  $y_{выч}$  по формуле (2) нужно задать приближенные значения  $X^0_s Y^0_s Z^0_s \alpha^0 \omega^0 \kappa^0$ , элементы внутреннего ориентирования, геодезические координаты опорных точек.

Если аэросъемка плановая, то  $\alpha \omega \kappa \ll 3^0$ , то приближенные значения задаются равными 0. Чтобы задать  $X^0_s Y^0_s Z^0_s$  используют опорные точки.

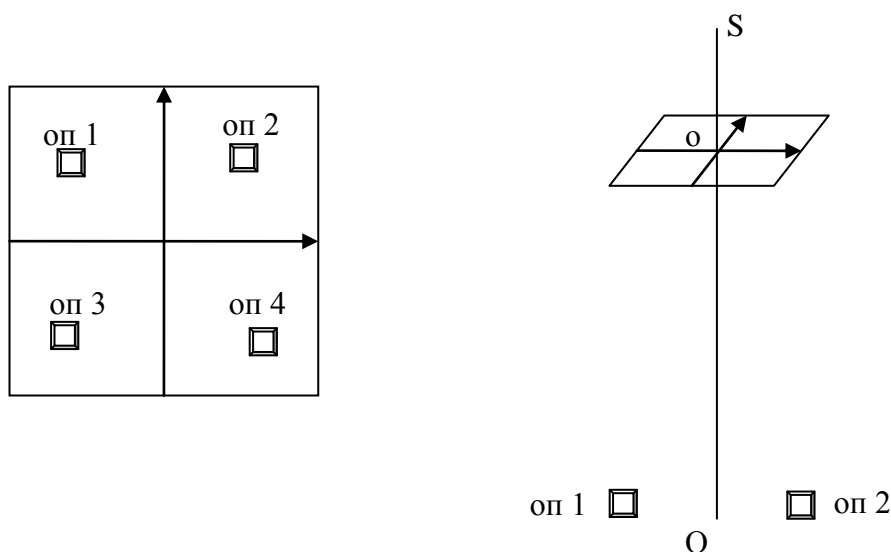


Рисунок 30 – Стандартное расположение опорных точек

Из рисунка 30 видно, что приближенное значение  $X^0_s Y^0_s$  можно получить как среднее из координат опорных точек.

$$X^0_s = \frac{X_{on1} + X_{on2} + X_{on3} + X_{on4}}{4}$$

$$Y^0_s = \frac{Y_{on1} + Y_{on2} + Y_{on3} + Y_{on4}}{4}$$

$$Z^0_s = \frac{Z_{on1} + Z_{on2} + Z_{on3} + Z_{on4}}{4} + H$$

Для вычисления коэффициентов необходимо взять производные от функций

$$a_x = \frac{\partial \varphi_x}{\partial X_s}; b_x = \frac{\partial \varphi_x}{\partial Y_s}; c_x = \frac{\partial \varphi_x}{\partial Z_s}; d_x = \frac{\partial \varphi_x}{\partial \alpha}; e_x = \frac{\partial \varphi_x}{\partial \omega}; g_x = \frac{\partial \varphi_x}{\partial \kappa}$$

$$x = -f \frac{X^*}{Z^*} \quad \left. \begin{array}{l} X^* = a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s) \\ Y^* = a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s) \\ Z^* = a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s) \end{array} \right\} \quad \left( \frac{U}{V} \right)' = \frac{UV' - UV'}{V^2}$$

$$a_x = \frac{\partial \varphi_x}{\partial X_s} = \frac{-\left(f \frac{X^*}{Z^*}\right)'}{\partial X_s} = -f \left[ \frac{-a_1 Z^* + a_3 X^*}{(Z^*)^2} \right] = \frac{fa_1}{Z^*} - f \frac{X^*}{(Z^*)^2} a_3 = \frac{fa_1}{Z^*} + \frac{a_3 x}{Z^*} = \frac{fa_1 + a_3 x}{Z^*}$$

$$b_x = \frac{\partial \varphi_x}{\partial Y_s} = \frac{-\left(f \frac{X^*}{Z^*}\right)'}{\partial Y_s} = -f \left[ \frac{-b_1 Z^* + b_3 X^*}{(Z^*)^2} \right] = \frac{fb_1}{Z^*} - f \frac{X^*}{(Z^*)^2} b_3 = \frac{fb_1}{Z^*} + \frac{b_3 x}{Z^*} = \frac{fb_1 + b_3 x}{Z^*}$$

$$c_x = \frac{\partial \varphi_x}{\partial Z_s} = \frac{-\left(f \frac{X^*}{Z^*}\right)'}{\partial Z_s} = -f \left[ \frac{-c_1 Z^* + c_3 X^*}{(Z^*)^2} \right] = \frac{fc_1}{Z^*} - f \frac{X^*}{(Z^*)^2} c_3 = \frac{fc_1}{Z^*} + \frac{c_3 x}{Z^*} = \frac{fc_1 + c_3 x}{Z^*}$$

Рассмотрим пример дифференцирования по  $\alpha$

$$d_x = \frac{\partial \varphi_x}{\partial \alpha} = \frac{-\left(f \frac{X^*}{Z^*}\right)'}{\partial \alpha} = -f \left[ \frac{\frac{\partial X^*}{\partial \alpha} Z^* - \frac{\partial Z^*}{\partial \alpha} X^*}{(Z^*)^2} \right]$$

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

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

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

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

$$b_2 = \cos \omega \cos \kappa$$

$$b_3 = -\sin \omega$$

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

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

$$c_3 = \cos \alpha \cos \omega$$

$$\sin' \beta = \cos \beta$$

$$\cos' \beta = -\sin \beta$$

Продифференцируем  $\frac{\partial X^*}{\partial \alpha}$  и  $\frac{\partial Z^*}{\partial \alpha}$  ОТДЕЛЬНО

$$\frac{\partial X^*}{\partial \alpha} = \frac{\partial a_1}{\partial \alpha} (X - X_s) + \frac{\partial c_1}{\partial \alpha} (Z - Z_s)$$

$$\frac{\partial a_1}{\partial \alpha} = \cos \kappa (-\sin \alpha) - \cos \alpha \sin \omega \sin \kappa = -c_1$$

$$\frac{\partial c_1}{\partial \alpha} = \cos \kappa \cos \alpha - \sin \alpha \sin \omega \sin \kappa = a_1$$

$$\frac{\partial X^*}{\partial \alpha} = -c_1 (X - X_s) + a_1 (Z - Z_s)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Z^*}{\partial \alpha} &= \frac{\partial a_3}{\partial \alpha} (X - X_s) + \frac{\partial c_3}{\partial \alpha} (Z - Z_s) \\ \frac{\partial a_3}{\partial \alpha} &= -\cos \omega \cos \alpha = -c_3 \\ \frac{\partial c_1}{\partial \alpha} &= -\sin \alpha \cos \omega = a_3 \\ \frac{\partial Z^*}{\partial \alpha} &= -c_3 (X - X_s) + a_3 (Z - Z_s) \\ d_x = \frac{\partial \varphi_x}{\partial \alpha} &= -f \left[ \frac{\frac{\partial X^*}{\partial \alpha} Z^* - \frac{\partial Z^*}{\partial \alpha} X^*}{(Z^*)^2} \right] = \\ &= -f \left[ \frac{Z^* (-c_1 (X - X_s) + a_1 (Z - Z_s)) - X^* (-c_3 (X - X_s) + a_3 (Z - Z_s))}{(Z^*)^2} \right] = \\ &= \frac{-f (-c_1 (X - X_s) + a_1 (Z - Z_s)) - x (-c_3 (X - X_s) + a_3 (Z - Z_s))}{Z^*} \end{aligned}$$

Рассмотренные ранее теоретические операции были выполнены с целью преобразования строгого уравнения для определения элементов внешнего ориентирования и приведения уравнений к линейному виду путем разложения в ряд Тейлора.

Решение же этих уравнений не рассматривалось.

Выше были получены формулы для вычисления коэффициентов  $abc \text{ deg}$  и  $l_x l_y$ .

После этого формируют матрицу коэффициентов

$$A_{n6} = \begin{vmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & d_1 & e_1 & g_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 & d_2 & e_2 & g_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_n & b_n & c_n & d_n & e_n & g_n \end{vmatrix}$$

$$X_{61} = \begin{vmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \\ \alpha \\ \omega \\ \kappa \end{vmatrix} \text{ матрица неизвестных}$$

$$L_n = \begin{vmatrix} l_1 \\ l_2 \\ \vdots \\ l_n \end{vmatrix} \text{ матрица свободных членов уравнений}$$



$$V_{n1} = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{pmatrix} \text{ матрица поправок}$$

$n$  – число уравнений

$AX + L = V$  уравнение поправок

$$a_x \delta X_S + b_x \delta Y_S + c_x \delta Z_S + d_x \delta \alpha + e_x \delta \omega + g_x \delta \kappa + (x_{\text{быч}} - x_{\text{изм}}) = v_x$$

$$a_y \delta X_S + b_y \delta Y_S + c_y \delta Z_S + d_y \delta \alpha + e_y \delta \omega + g_y \delta \kappa + (y_{\text{быч}} - y_{\text{изм}}) = v_y$$

Чтобы решить эти уравнения нужно перейти к нормальным уравнениям. Для этого формируют транспонированную матрицу  $A^T$  (столбцы меняем на строки).

$$A^T AX + A^T L = 0$$

$B_{66}X + C_{61} = 0$  нормальное уравнение

$$B_{66} = \begin{pmatrix} aa & ab & ac & ad & ae & ag \\ ba & bb & bc & cd & ce & cg \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ ga & gb & gc & gd & ge & gg \end{pmatrix}$$

$$L = \begin{pmatrix} al \\ bl \\ \vdots \\ gl \end{pmatrix}$$

Решать нормальные уравнения можно любым предложенным в математике способом, но в фотограмметрии предпочитают решать по методу Гаусса.

$$X = -Q^{-1}L$$

$Q^{-1}$  – обратная матрица диагональных коэффициентов нормальных уравнений.

В МНК предусмотрена оценка точности решенных уравнений и определенных уравнений.

Сначала вычисляют СКО единицы веса

$$\mu = \sqrt{\frac{[v_x v_x] + [v_y v_y]}{n - k}}$$

$n$  – число уравнений (число опорных точек умноженное на 2)

$k$  – число неизвестных

Далее вычисляют СКО неизвестных

$$\left. \begin{aligned} m_{X_s} &= \mu \sqrt{Q_{X_s X_s}} \\ m_{Y_s} &= \mu \sqrt{Q_{Y_s Y_s}} \\ m_{Z_s} &= \mu \sqrt{Q_{Z_s Z_s}} \\ m_{\alpha} &= \mu \sqrt{Q_{\alpha \alpha}} \\ m_{\omega} &= \mu \sqrt{Q_{\omega \omega}} \\ m_{\kappa} &= \mu \sqrt{Q_{\kappa \kappa}} \end{aligned} \right\}$$

Так как приближенные значения были заданы грубо, то из первого решения уравнений неизвестные будут получены с большими ошибками, чтобы добиться точности используют итерационный метод Ньютона.

Суть которого в том, что при втором решении уравнений используют уточненные значения неизвестных.

$$\begin{aligned} X_s &= X_s^0 + \delta X_s & \alpha &= \alpha^0 + \delta \alpha \\ Y_s &= Y_s^0 + \delta Y_s & \omega &= \omega^0 + \delta \omega \\ Z_s &= Z_s^0 + \delta Z_s & \kappa &= \kappa^0 + \delta \kappa \end{aligned}$$

При втором решении заново вычисляют коэффициенты и свободные члены и опять формируют матрицу. И так до тех пор, пока поправки станут меньше ошибки измерения. Или можно просто задать число итераций. А также используют критерий разности значений неизвестных из смежных итераций.

## 2.7 Влияния рельефа, угла наклона снимка и кривизны Земли на положение точек на снимке

Вывод формул смещения точек из-за влияния рельефа и угла наклона снимка.

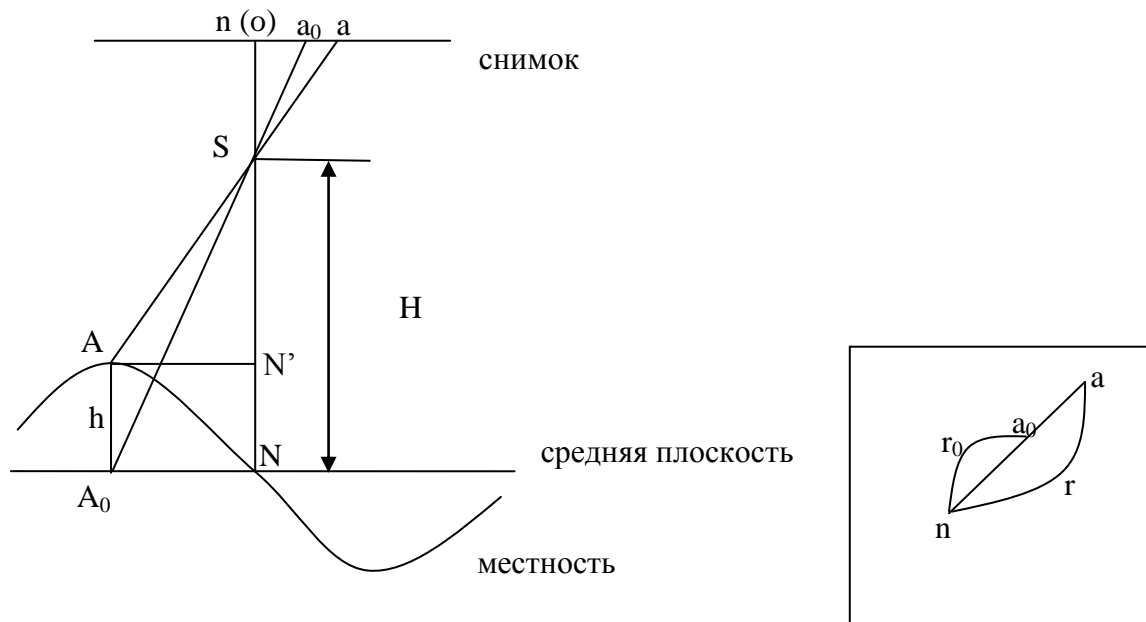


Рисунок 31 - Смещения точек из-за влияния рельефа

$$So=f$$

$$SN=H$$

$$N'N=h=AA_0$$

Введем обозначения  $AN'=A_0N=R$

$$na=r, \quad na_0=r_0$$

$aa_0=\delta r_h$  – смещение точки за влияние рельефа.

$r$  и  $r_0$  – радиусы векторы.

Из подобия треугольников

$$\Delta na_0S \text{ и } \Delta NA_0S$$

$$\Delta naS \text{ и } \Delta N'AS$$

$$\frac{na_0}{NA_0} = \frac{So}{SN} \quad \frac{r_0}{R} = \frac{f}{H} \quad R = \frac{r_0 H}{f}$$

$$\frac{na}{N'A} = \frac{So}{SN'} \quad \frac{r}{R} = \frac{f}{H-h} \quad R = \frac{r(H-h)}{f}$$

$$\frac{r_0 H}{f} = \frac{r(H-h)}{f}$$

$$r_0 H = rH - rh$$

$$r_0 = r - \delta r_h$$

$$rH - \delta r_h H = rH - rh$$

$$\delta r_h = \frac{rh}{H}$$

Эта формула позволяет вычислить смещение точки за рельеф, если на снимке известно её положение,  $p$ ,  $H$  и  $h$ .

Пример

$$r=100\text{мм}$$

$$H=1000\text{м}$$

$$h=20\text{м (столб)}$$

$$\delta r_h = \frac{rh}{H} = \frac{100\text{мм} * 20\text{м}}{1000\text{м}} = 2\text{мм}$$

Известно, что если местность рельефная, то точки за влияние рельефа будут смещаться, и изображение не будет подобно местности. Следовательно, чтобы получить на снимке подобное изображение надо в точки ввести поправки за рельеф.

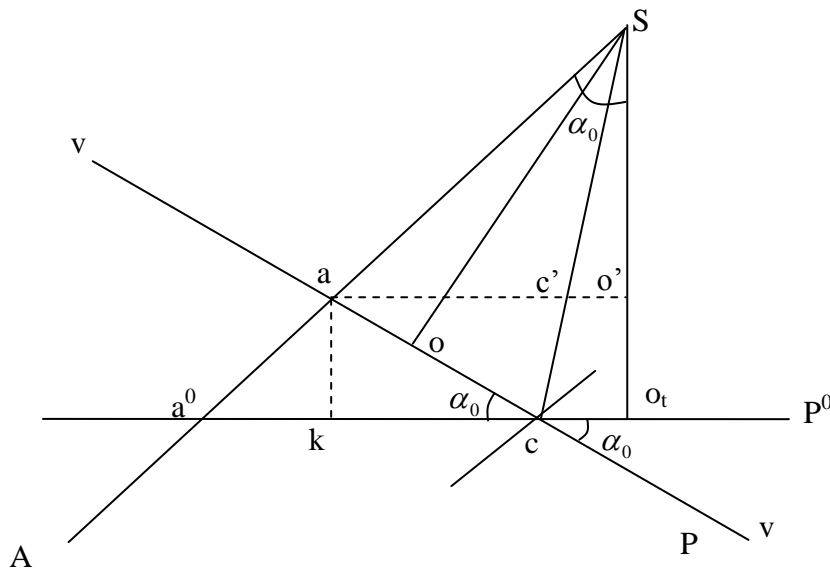


Рисунок 32 – Смещение точек из-за влияния угла наклона снимка

Пусть из одной точки фотографирования получены наклонный и горизонтальный снимки.

$P$  и  $P^0$  – наклонный и горизонтальный снимки соответственно

$$S_o = S_{o_t} = f$$

$o$  и  $o_t$  – главные точки наклонного и горизонтального снимков

$h_c, h_c$  – линия пересечения  $P$  и  $P^0$

$a$  и  $a^0$  – изображение точки  $A$  на  $P$  и  $P^0$

Введем обозначения

$ca=r$ ,  $ca^0=r^0$  – радиусы векторы определения положения точки на снимках относительно т. с.

Известно, что точки на наклонном снимке смещены за влияние угла наклона снимка либо к т. с, либо от неё.

Из  $\Delta Sa^0 o_t$  и  $\Delta Sao'$

$$\frac{ac'}{a^0 c} = \frac{So'}{So_t}$$

Обозначим  $o'o_t = \Delta f = ak$

Тогда с учетом обозначений

$$\frac{r}{r^0} = \frac{f - \Delta f}{f} \quad ac = ac' = r, \text{ так как } \Delta sac' \text{ равнобедренный}$$

Из  $\Delta акс$

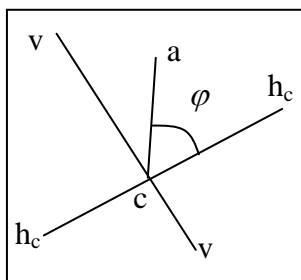
$$\frac{\Delta f}{r} = \sin \alpha_0 \quad \Delta f = r \sin \alpha_0$$

$$\frac{r}{r^0} = \frac{f - r \sin \alpha_0}{f}$$

$$r^0 = \frac{fr}{f - r \sin \alpha_0}$$

Из формулы видно, что если  $\alpha_0 = 0$ , то  $r=r^0$ . Следовательно,  $r - r^0 = \delta r_{\alpha}$ , будет зависеть от величины угла наклона и радиуса вектора.

Здесь рассмотрен случай когда радиусы векторы лежат на линии главного вертикала, но это не всегда так, поэтому учитывается угол  $\varphi$  – угол отсчитываемый от линии нулевых искажений против часовой стрелки до  $r$  или  $r^0$ .



Тогда формула примет следующий вид:

$$r^0 = \frac{fr}{f - r \sin \alpha_0 \sin \varphi} \text{ – строгая формула}$$

Для практических расчетов строгую формулу приводят к приближенному виду, используя разложение в ряд.

Разделим на  $f$

$$r^0 = \frac{r}{1 - \frac{r \sin \alpha_0 \sin \varphi}{f}}$$

если принять  $\frac{r \sin \alpha_0 \sin \varphi}{f}$  за  $a$ , то зная, что при разложении

в ряд  $\frac{1}{1-a} = 1 + a$ , т.о. можем записать следующее

$$r^0 = r \left( 1 + \frac{r \sin \alpha_0 \sin \varphi}{f} \right) = r + \frac{r^2 \sin \alpha_0 \sin \varphi}{f}$$

$$r - r^0 = \delta r_\alpha$$

$$\delta r_\alpha = - \frac{r^2 \sin \alpha_0 \sin \varphi}{f}$$

Из анализа формулы следует, что наибольшие смещения будут на главной вертикали и на краях снимка, а нулевые смещения на линии нулевых искажений.

### *Влияния кривизны Земли на положение точек на снимке*

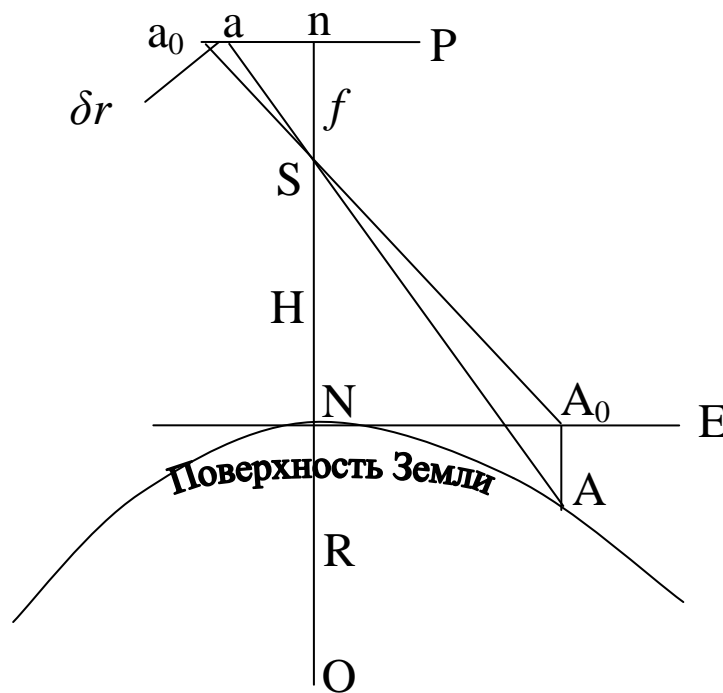


Рисунок 33 - Влияния кривизны Земли на положение точек на снимке

R – радиус Земли;

n – точка надира;

N – точка на местности, соответствующая точке надира;

$A_0$  – ортогональная проекция точки  $A$  на горизонтальную плоскость  $E$  на;

$a_0$  – изображение точки  $A_0$  на горизонтальном снимке;

$r$  – радиус-вектор от точки надира до точки  $a$ ;

$r_0$  – радиус-вектор от точки надира до точки  $a_0$ ;

$\delta r$  – смещение точки вызванное влиянием кривизны Земли.

$$\delta r = r - r_0;$$

$$\delta r_h = \frac{r^3 \cdot H_\phi}{2R \cdot f^2}$$

Таким образом, чем больше высота фотографирования и расстояние точки от точки надира и меньше радиус небесного тела, тем ошибка, вызванная его кривизной больше.

### **3. Трансформирование аэроснимков. Фотосхемы. Фотопланы.**

3.1 Назначение и методы трансформирования снимков. Цифровое трансформирование снимков.

*Назначение и методы трансформирования снимков. Оптико-механическое трансформирование снимков. Цифровое трансформирование снимков. Вывод формул связи координат плоского и наклонного снимков.*

Как было рассмотрено в предыдущем разделе, снимки подвержены искажениям, вызванным рельефом местности и углами наклона снимка. Для исключения этих искажений выполняют трансформирование.

Существуют два основных способа трансформирования:

1. снимки исправляются только за угол наклона и приводятся к заданному масштабу
2. снимки исправляются за угол наклона, приводятся к заданному масштабу и исправляются за влияние рельефа

Теоретически первый способ применим, когда местность плоская и горизонтальная. В действительности такой местности не бывает и практически первый способ применим, когда смещение точек за рельеф не превышает заданного допуска. Например,  $\delta r_h < 0.3\text{мм}$  в масштабе карты. Так как масштаб аэроснимков как правило в 2-3 раза мельче масштаба карты, следовательно допуск на снимке должен быть меньше в  $k = \frac{m}{M}$  раз. Если смещение за рельеф превышает допуск, то выполняют ортотрансформирование.

Способы трансформирования:

- аналитическое;
- фотомеханическое;
- цифровое трансформирование;
- ортофототрансформирование.

*Аналитическое трансформирование.*

Как известно,

$$\left. \begin{aligned} (X - X_s) &= (Z - Z_s) \cdot \frac{a_1(x - x_0) + a_2(y - y_0) - a_3f}{c_1(x - x_0) + c_2(y - y_0) - c_3f} \\ (Y - Y_s) &= (Z - Z_s) \cdot \frac{b_1(x - x_0) + b_2(y - y_0) - b_3f}{c_1(x - x_0) + c_2(y - y_0) - c_3f} \end{aligned} \right\}$$

Выведем формулу вычисления координат точек местности для горизонтального снимка.

Если  $\alpha = \omega = \varepsilon = 0$ , то  $a_1 = b_2 = c_3 = 1$ ,  $a_2 = a_3 = b_1 = b_3 = c_1 = c_2 = 0$ .

Подставим данные значения в формулу и получим:

$$\left. \begin{aligned} (X - X_s) &= (Z - Z_s) \cdot \frac{x^0}{-f} \\ (Y - Y_s) &= (Z - Z_s) \cdot \frac{y^0}{-f} \end{aligned} \right\}$$

Так как левые части уравнений равны, приравняем их правые части и решим относительно  $x^0$  и  $y^0$ :



$$x_1^o = -f \frac{a_1(x_1 - x_o) + a_2(y_1 - y_o) - a_3f}{c_1(x_1 - x_o) + c_2(y_1 - y_o) - c_3f}$$

$$y_1^o = -f \frac{b_1(x_1 - x_o) + b_2(y_1 - y_o) - b_3f}{c_1(x_1 - x_o) + c_2(y_1 - y_o) - c_3f}$$

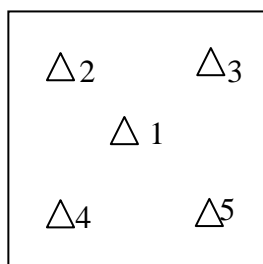
Эти формулы выражают зависимость между координатами соответственных точек на горизонтальном и наклонном снимках. Аналитический способ трансформирования снимков используется при построении фототриангуляционных сетей при помощи ЭВМ.

#### *Фотомеханическое трансформирование*

Чтобы реализовать оптический способ трансформирования, необходимо использовать проектирующую камеру, подобную той, которой выполнялась съемка. Если камере задать то положение, которое было в момент съемки, и восстановить связку лучей, то восстановится картина, существовавшая в момент съемки. Если поместить экран на расстояние высоты фотографирования ( $H$ ) от объектива, то полученное на экране изображение будет аналогично сфотографированному объекту. Если экран поместить на расстояние высоты проектирования ( $Z_{\text{п}}$ ) от объектива, то изображение будет подобно сфотографированному объекту, но меньше, равное отношению  $\frac{H}{t}$ .

Для правильного трансформирования необходимо наклонить экран фототрансформатора и установить расстояние между объективом и экраном на величины, зависящие от угла наклона снимка при съемке и высоты фотографирования. Для этого на экране фототрансформатора путем его наклона совмещали изображения не менее, чем четырех опорных точек — четких контурных точек (например, развилки дорог, слияния рек и т.д.), выбранных примерно по углам снимка, с соответствующими точками карты (основы), расположенной на экране. В результате получалось трансформированное изображение точно в масштабе карты, у которого были устранены перспективные искажения. Это изображение экспонировалось на фотобумагу, в результате чего получался трансформированный фотоотпечаток.

Однако в настоящее время оптико-механические трансформаторы не применяются, а используются только методы цифрового трансформирования снимков.



*Сущность цифрового трансформирования снимков.*

Цифровые снимки получают, либо цифровой камерой, либо сканируют снимки, полученные аналоговым способом.

Цифровая камера имеет конструкцию аналогичную фотокамере, только в плоскости прикладной рамки находится матрица ПЗС. Эта матрица состоит из микроэлементов принимающих световую энергию. Далее световая энергия преобразуется в цифровой код. *Цифровое изображение* – это матрица чисел, каждый элемент которой соответствует значению яркости объекта на местности.

Чтобы преобразовать аналоговое изображение в цифровое нужно выполнить его сканирование. Принципиальная схема планшетного сканера

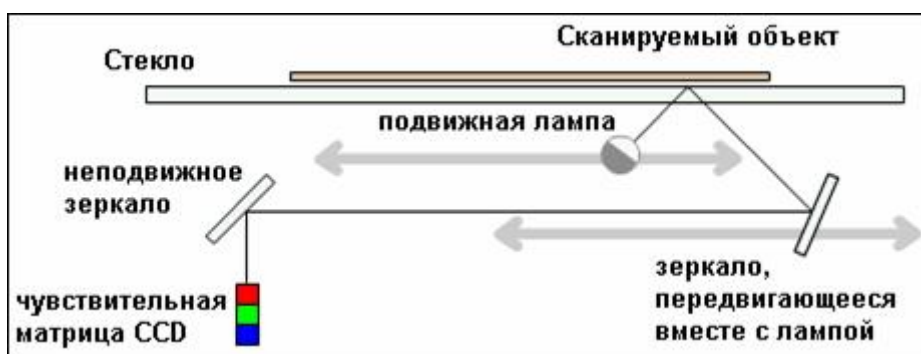


Рисунок 34 – Принципиальная схема планшетного сканера

Суть сканирования заключается в следующем: световой луч ограниченного размера, отражается от изображения и это отраженное излучение фиксируется как яркость изображения в цифровой форме. Движение лампы осуществляется по двум осям ху. Чем меньше размер

светового луча, тем меньше размер пиксела, а соответственно их больше, но и объем информации увеличится.

На цифровых изображениях координаты измеряются в пикселах, а значит точность измерений будет зависеть от размера пиксела. Размер пиксела – разрешающая способность цифрового изображения.

Существует два метода цифрового трансформирования: прямое и обратное.

#### *Прямое трансформирование.*

При прямом трансформировании для каждого пикселя исходного изображения вычисляются трансформированные координаты по формулам:

$$x^0 = -f \frac{a_1(x - x_0) + a_2(y - y_0) - a_3f}{c_1(x - x_0) + c_2(y - y_0) - c_3f}$$
$$y^0 = -f \frac{b_1(x - x_0) + b_2(y - y_0) - b_3f}{c_1(x - x_0) + c_2(y - y_0) - c_3f},$$

потом элементу трансформированного изображения присваивается соответствующее значение яркости элемента с исходного изображения.

Недостатками данного метода является то, что при вычислении трансформированных координат получают десятичные дроби, а на цифровом изображении координаты пикселей могут быть только целые числа, поэтому их нужно округлять. А из-за ошибок округления возникают пропуски и наложения пикселей. Эту проблему решают с помощью интерполяции яркости, например, как среднее арифметическое яркостей соседних пикселей.

#### *Обратное трансформирование.*

При обратном трансформировании переходят от трансформированного изображения к исходному. Для этого задается матрица трансформированного изображения с пустыми ячейками. Далее для каждого пикселя трансформированного изображения вычисляют координаты на исходном изображении по формулам:

$$\left. \begin{aligned} x &= x_0 - f \frac{a_1 x^0 + b_1 y^0 - c_1 f}{a_3 x^0 + b_3 y^0 - c_3 f} \\ y &= y_0 - f \frac{b_1 x^0 + b_2 y^0 - c_2 f}{a_3 x^0 + b_3 y^0 - c_3 f} \end{aligned} \right\}$$

и присваивают значение яркости полученного пикселя пикселю на трансформированном изображении. Таким образом, обрабатывается вся матрица трансформированного изображения и здесь уже не будет пропусков и наложений пикселей.

*Зависимость между координатами точек горизонтального и наклонного снимков и приближенные формулы.*

Если снимок горизонтальный, то плоские координаты точки снимка равны пространственным.

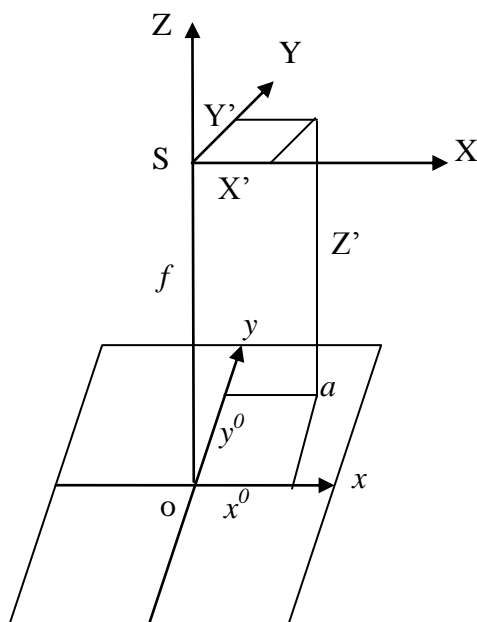


Рисунок 35 – Связь между координатами точек горизонтального и наклонного снимков

$x^0 y^0$  – координаты точки на горизонтальном снимке  $\alpha \omega \kappa = 0$

Из рисунка видно, что  $x^0 = X'$ ;  $y^0 = Y'$ ;  $Z' = -f$ . Тогда выразим

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

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

через трансформированные координаты

$$X = X_s + (Z - Z_s) \frac{x^0}{-f}$$

$$Y = Y_s + (Z - Z_s) \frac{y^0}{-f}$$

Эти формулы выражают одни и те же координаты  $XU$  следовательно их можно приравнять.

$$X_s + (Z - Z_s) \frac{X'}{Z'} = X_s + (Z - Z_s) \frac{x^0}{-f} \quad \frac{X'}{Z'} = \frac{x^0}{-f} \quad x^0 = -f \frac{X'}{Z'}$$

$$Y_s + (Z - Z_s) \frac{Y'}{Z'} = Y_s + (Z - Z_s) \frac{y^0}{-f} \quad \frac{Y'}{Z'} = \frac{y^0}{-f} \quad y^0 = -f \frac{Y'}{Z'}$$

Это формулы позволяющие преобразовать координаты точек измеренные на наклонном снимке в координаты горизонтального снимка.

В практике формулы трансформирования используют для анализа различных зависимостей. Например, изменение координат в зависимости от углов наклона снимка. Чтобы анализировать было проще, от строгих формул переходят к приближенным.

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

если  $x_0 = 0, y_0 = 0$

$$\left. \begin{aligned} x^0 &= -f \frac{a_1x + a_2y - a_3f}{c_1x + c_2y - c_3f} \\ y^0 &= -f \frac{b_1x + b_2y - b_3f}{c_1x + c_2y - c_3f} \end{aligned} \right\}$$

Эти формулы-это тригонометрические функции, раскладывающиеся в ряд до первого порядка малости

$$\begin{aligned} a_1 &= 1 & b_1 &= \kappa & c_1 &= \alpha \\ a_2 &= -\kappa & b_2 &= 1 & c_2 &= \omega \\ a_3 &= -\alpha & b_3 &= -\omega & c_3 &= 1 \end{aligned}$$

Таким образом

$$\left. \begin{aligned} x^0 &= -f \frac{x - y\kappa + f\alpha}{x\alpha + y\omega - f} \\ y^0 &= -f \frac{x\kappa + y + f\omega}{x\alpha + y\omega - f} \end{aligned} \right\}$$

Разделим на  $-f$

$$x^0 = \frac{x - y\kappa + f\alpha}{-\frac{x}{f}\alpha - \frac{y}{f}\omega + 1} = \frac{x - y\kappa + f\alpha}{1 - \left(\frac{x}{f}\alpha + \frac{y}{f}\omega\right)}$$

Известно, что  $\frac{1}{1-a} = 1 + a$  (до первого порядка малости)

$$x^0 = (x - y\kappa + f\alpha) \left(1 + \frac{x}{f}\alpha + \frac{y}{f}\omega\right) = x - y\kappa + f\alpha + \frac{x^2}{f}\alpha - \frac{y\kappa}{f}x\alpha + x\alpha^2 + \frac{xy}{f}\omega$$

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

$$y^0 = \frac{x\kappa + y + f\omega}{-\frac{x}{f}\alpha - \frac{y}{f}\omega + 1} = \frac{x\kappa + y + f\omega}{1 - \left(\frac{x}{f}\alpha + \frac{y}{f}\omega\right)}$$

$$\begin{aligned} y^0 &= (x\kappa + y + f\omega) \left(1 + \frac{x}{f}\alpha + \frac{y}{f}\omega\right) = \\ &= x\kappa + \frac{x^2}{f}\alpha\kappa + \frac{xy}{f}\omega\kappa + y + \frac{xy}{f}\alpha + \frac{y^2}{f}\omega + f\omega + x\alpha\omega + y\omega^2 = \\ &= y + \left(\frac{y^2}{f} + f\right)\omega + \frac{xy}{f}\alpha + x\kappa \end{aligned}$$

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

### 3.2 Создание фотопланов по фотографическим и цифровым снимкам.

*Создание фотопланов (ортофотопланов) по фотографическим и цифровым снимкам. Оценка точности фотоплана (ортофотоплана)*

Монтаж фотоплана выполняется следующим образом:

1. На снимках пуансоном пробивают отверстия диаметром 1 мм на всех опорных точках.

2. Снимки накладывают на планшет так, чтобы точки на планшете располагались в отверстиях ближе к центру. Таким образом ошибки совмещения не будут превышать 0,5 мм.
3. Таким же образом укладывают второй и последующие снимки. Прокалывая иглой, смежные снимки посередине перекрытия, определяют величину расхождения одноименных контуров, оно не должно превышать 1 мм.
4. Разрезают смонтированные снимки посередине продольного и поперечного перекрытия (при этом избегая разреза важных объектов).
5. Разрезанные снимки (полезная часть) смазывают клеем и выполняют монтаж фотоплана. При этом должно быть максимально точное совмещение отверстий с опорными точками.
6. В заключении делается оформление фотоплана (рамка координатной сетки) и оценка точности.

Цифровой фотоплан строится в процессе трансформирования исходных изображений. Область, на которую он будет построен, называется областью трансформирования, а линия, её ограничивающая – порезом. Для построения качественного фотоплана линии порезов необходимо проводить, соблюдая следующие правила.

1. Области трансформирования должны находиться как можно ближе к главной точке снимка (вблизи его геометрического центра). В этом случае повышается геометрическая точность совмещения.

2. Порезы не должны пересекать объекты, возвышающиеся над рельефом (мосты, здания, опоры ЛЭП и т.п.). В противном случае возможно «двоение» и «частичное исчезновение» объектов на ортофотоплане.

3. Порезы не должны проходить по границе протяжённых объектов, отличающихся по яркости от основного фона (кромка леса, дорога и т.п.). В противном случае при включённой опции Сглаживание линий совмещения появится эффект «смазывания» границы. Рекомендуется либо пересекать эти объекты под углом близким к прямому, либо вести порез на достаточном

отдалении (в пикселах, не менее полутора размеров интерполяционной ячейки) от границы.

Оценка точности производится по опорным точкам и контурам. Для этого измеряют величину расхождения  $\delta_T$  по точкам и подсчитывают СКО.

$$m_T = \sqrt{\frac{\sum \delta_T^2}{n}} \quad n - \text{число точек.}$$

Затем измеряют расхождения по порезам (контурам)  $\delta_K$  и подсчитывают СКО.

$$m_K = \sqrt{\frac{\sum \delta_K^2}{2k}} \quad k - \text{число измерений.}$$

Величины погрешностей в плановом положении опорных и контрольных точек не должны превышать в масштабе создаваемого фотоплана 0,5 мм в равнинных и всхолмленных районах и 0,7 мм - в горных.

Несовмещение контуров по линии соединения фрагментов не должно быть более 0,7 мм, а в горных районах - 1,0 мм.



Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Сибирская Государственная Геодезическая Академия»  
(ФГБОУ ВПО «СГГА»)

Кафедра фотограмметрии и дистанционного зондирования

## **КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ**

по дисциплине «Дистанционное зондирование и фотограмметрия»

для студентов 2 курса направление подготовки

120100 Геодезия и дистанционное зондирование

(весенний семестр)

Новосибирск  
СГГА  
2013

## Содержание

### 4. Теория стереопары снимков

#### 4.1 *Идея и сущность построения пространственной геометрической модели объекта.*

Основные элементы центральной проекции для пары снимков. Идея и сущность построения геометрической модели местности (ГММ) по стереопаре, методы фотограмметрической обработки стереопар снимков. Сущность поперечного параллакса.

#### 4.2 *Взаимное ориентирование пары снимков.*

Элементы ориентирования пары снимков. Системы взаимного ориентирования пары снимков. Основное условие взаимного ориентирования снимков. Уравнение взаимного ориентирования снимков в координатной форме в базисной системе.

#### 4.3 *Формулы связи координат точек местности и координат их изображений на паре снимков.*

Вывод формул прямой фотограмметрической засечки.

#### 4.4 *Внешнее ориентирование модели.*

Элементы внешнего ориентирования ГММ. Определение элементов внешнего ориентирования модели местности. Деформация модели местности. Оценка точности определения координат точек модели по стереопаре снимков.

### 5. Пространственная фототриангуляция

#### 5.1 *Назначение и классификация способов аналитической пространственной фототриангуляции. Маршрутная и блочная пространственная фототриангуляция.*

Сущность, назначение и классификация пространственной фототриангуляции (ПФТ).

#### 5.2 *Методы пространственной фототриангуляции.*

Маршрутная фототриангуляция методом независимых моделей. Блочная фототриангуляция методом связей, объединения маршрутных и одиночных моделей. Технология аналитической фототриангуляции.

### 6. Универсальные стереофотограмметрические системы

#### 6.1 *Назначение и классификация универсальных стереофотограмметрических приборов: аналоговые и аналитические универсальные приборы (УП) и цифровые станции.*

Идея и сущность универсального метода построения модели.

#### 6.2 *Цифровое изображение, основные понятия.*

Цифровое изображение. Способы получения цифрового изображения.

#### 6.3 *Цифровые стереофотограмметрические системы (стереоплоттеры)*

Понятие цифровых стереоплоттеров и их основные системы. Способы получения стереомодели на цифровом стереоплоттере. Управление цифровым стереоплоттером. Технология обработки снимков на цифровых стереофотограмметрических системах.

### 7. Цифровое ортотрансформирование

#### 7.1 *Цифровые модели рельефа*

Классификация цифровых моделей рельефа по: способу сбора информации о рельефе; структуре первичной информации о рельефе; методу описания рельефа; структуре информации о рельефе, хранящейся на компьютере; способу представления ЦМР.

#### 7.2 *Цифровое ортотрансформирование снимков*

Описание методики цифрового ортотрансформирования снимков.

### 8. Технологии создания карт

#### 8.1 *Комбинированный метод создания карт*

Технологические варианты комбинированного метода создания карт.

#### 8.2 *Стереотопографический метод создания карт*

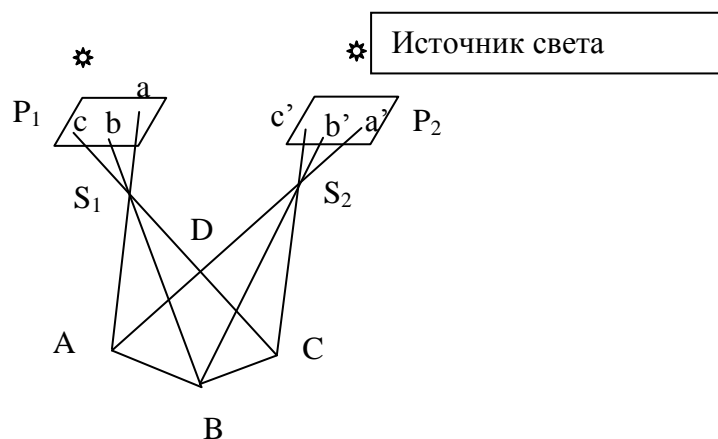
Технологические варианты стереотопографического метода создания карт.

## 4. Теория стереопары снимков

### 4.1 Идея и сущность построения пространственной геометрической модели объекта.

Основные элементы центральной проекции для пары снимков. Идея и сущность построения геометрической модели местности (ГММ) по стереопаре, методы фотограмметрической обработки стереопар снимков. Сущность поперечного параллакса.

В основе фотограмметрических методов лежит построение геометрической модели фотографических объектов. Идея основана на обратимости фотографического процесса.



Сущность фотограмметрического метода заключается в следующем: лучи идут от объекта, поступают в объектив, который строит на фотоматериале в плоскости прикладной рамки изображение. Из рис. видно, что для построения модели объект должен быть сфотографирован с двух точек пространства. Если теперь взять 2 камеры, подобные той, которая выполняла фотографирование, заложить пару снимков и осветить, задать положение камерам которое было во время съемки, то лучи пойдут в обратном направлении и пересекутся. Множество точек пересечения образуют поверхность подобную сфотографированному объекту. Что является главной задачей.

В связи с тем, что трехмерная модель строится всегда по паре снимков, введем понятия, относящиеся к паре снимков.

$S_1S_2 = B$  – базис фотографирования

$a$  и  $a'$ ,  $b$  и  $b'$ ,  $c$  и  $c'$  ... – одноименные или соответственные точки

$aS_1A$  и  $a'S_2A$ ,  $bS_1B$  и  $b'S_2B$ ,  $cS_1C$  и  $c'S_2C$  ... – одноименные или соответственные лучи.

Соответственные лучи – лучи идущие от одной и той же точки в левый и правый объективы.

Соответственные точки – это точки на левом и правом снимке одной и той же точки местности.

Множество точек пересечения проектирующих лучей образуют поверхность подобную сфотографированному объекту. Геометрическая модель невидна. Для визуализации модели используют стереомодель. Стереомодель получают путем раздельного рассматривания левого и правого снимков, т.е. обеспечивается условие, при котором левым глазом видно только левое изображение, а правым – правое. Это условие обеспечивается с помощью различных способов: анаглифов, поляроидов, миганий.

*Способ стереоскопа*

На экран дисплея выводятся левое и правое изображение, перед экраном устанавливается зеркально-линзовая насадка (стереоскоп). Стереоскоп позволяет обеспечивать условие для стереонаблюдения. Достоинством данного способа является

хорошее качество стереоэффекта. Недостатком – неудобство наблюдения, ограниченное поле зрения.

#### *Анаглифический способ*

В данном способе на экран выводятся изображения левого и правого снимков, раскрашенные в разные цвета, например, левое раскрашено в синий цвет, а правое – в красный. Оператор рассматривает их через анаглифические очки, у которых левая часть синего цвета, а правая красного. Таким образом, каждый глаз будет видеть одно изображение. Недостатком данного способа является то, что качество изображения будет плохим.

#### *Способ миганий*

На экран поочередно выводятся левое и правое изображения с частотой 120 Гц. Оператор рассматривает экран через специальные жидкокристаллические очки с фильтрами. Компьютер синхронизирует очки с экраном таким образом, чтобы наблюдатель видел левым глазом левый снимок, а правым – правый. Недостатком данного способа является то, что постоянное мигание вызывает утомляемость глаз.

#### *Способ поляроидов*

Здесь используются специальные пассивные поляризационные очки: левая часть поляризована в одном направлении, а правая – в другом. Перед экраном устанавливается поляризационная пластина, которая поочередно меняет поляризацию изображения на экране, на экран с определенной частотой выводят левое и правое изображения, с такой же частотой изменяется поляризация пластины, таким образом, будет обеспечиваться стереоэффект. При данном способе получения стереоэффекта, качество стереомодели будет высоким, кроме того утомляемость глаз оператора будет минимальной.

В камеральных условиях построить модель в натуральную величину невозможно. Если изменить расстояние  $S_1S_2$ , при восстановлении связей, оставив неизменным внешнее ориентирование камер, то одноименные лучи пересекутся, но модель будет меньше во столько раз во сколько изменится расстояние  $S_1S_2$ . Т.о. масштаб модели будет равен  $\frac{b_n}{B} = \frac{1}{M_{\text{модели}}}$ , где  $b_n$  – базис проектирования.

Таким образом, чтобы построить модель необходимо восстановить связку проектирующих лучей и задать камерам положение, которое они имели во время съемки, т.е. выполнить внешнее ориентирование снимков. Для того, чтобы выполнить внешнее ориентирование снимков необходимо знать элементы внешнего ориентирования снимков –  $X_S Y_S Z_S \alpha \omega \kappa$ . Такой способ построения модели называется – построение модели по установочным элементам.

На практике часто элементы внешнего ориентирования снимков неизвестны, поэтому существует другой способ построения модели – по условию компланарности.

Для того, чтобы построить модель достаточно задать камерам взаимное положение, которое было в момент съемки, однако, в данном случае модель будет расположена произвольно в пространстве, т.е. измерения, выполненные по данной модели, будут в произвольной системе координат. Как правило, картографическая продукция должна быть в геодезической системе координат. Поэтому модель в свободной системе координат необходимо ориентировать в геодезической системе координат. Этот процесс называется внешним ориентированием модели.

Для построения модели по условию компланарности необходимо выполнить следующие процессы:

1. внутреннее ориентирование снимков – восстановление связей проектирующих лучей;
2. взаимное ориентирование снимков – проектирующим камерам задается положение, которое было в момент съемки.
3. внешнее ориентирование модели – пересчет модели в произвольной системе координат в геодезическую систему координат.

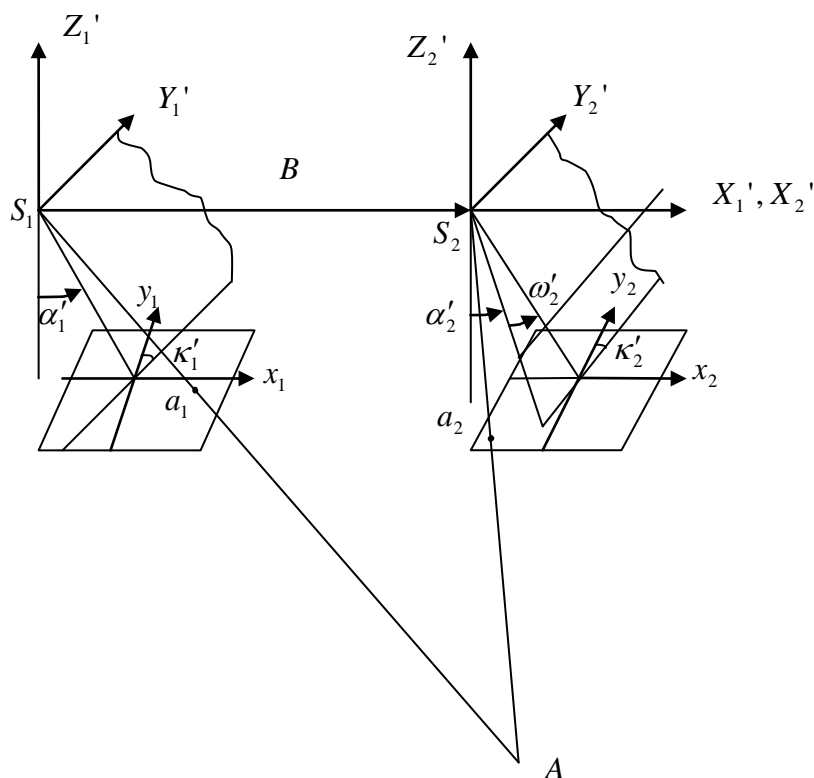
## 4.2 Взаимное ориентирование пары снимков.

Элементы ориентирования пары снимков. Системы взаимного ориентирования пары снимков. Основное условие взаимного ориентирования снимков. Уравнение взаимного ориентирования снимков в координатной форме в базисной системе.

Как отмечалось ранее, модель можно создать в произвольной системе координат, но, как правило, предпочитают использовать базисную систему координат.

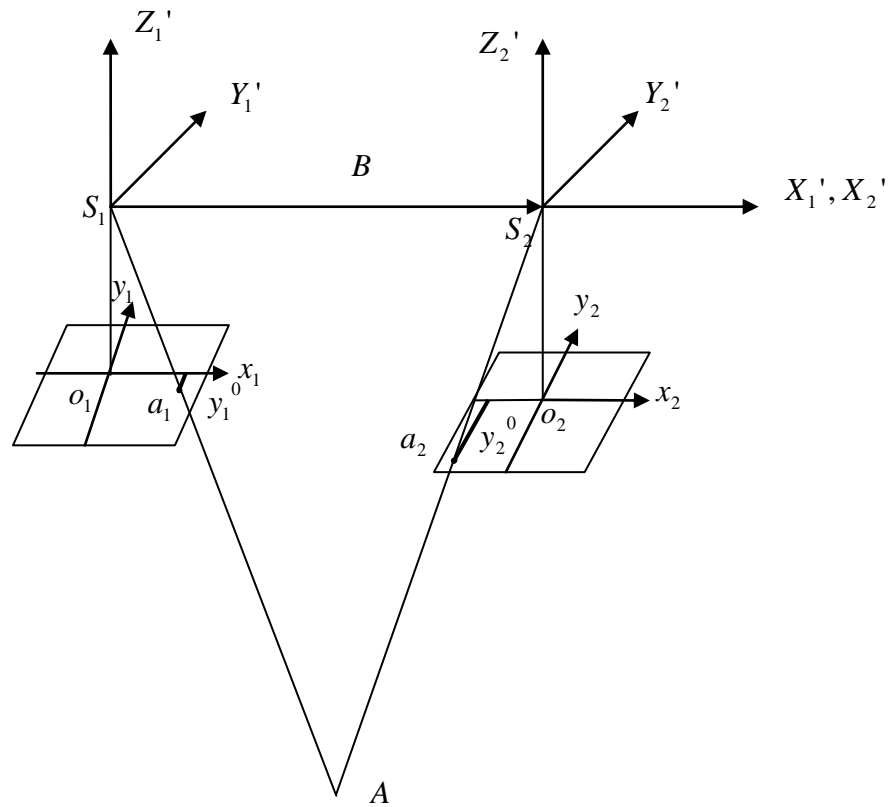
В этой системе координат за начало принята левая точка фотографирования, ось  $X$  совмещена с базисом, а ось  $Z$  лежит в левой главной базисной плоскости (проходит через базис и главный луч левого снимка),  $X_{S_1} = Y_{S_1} = Z_{S_1} = 0$ ,  $Y_{S_2} = Z_{S_2} = 0$ ,  $X_{S_1} = B$ .

Так как для построения модели величина базиса не имеет значения, то для того, чтобы построить модель необходимо определить пять элементов взаимного ориентирования снимков:  $\alpha'_1, \kappa'_1, \alpha'_2, \omega'_2, \kappa'_2$ .



### *Сущность поперечного параллакса*

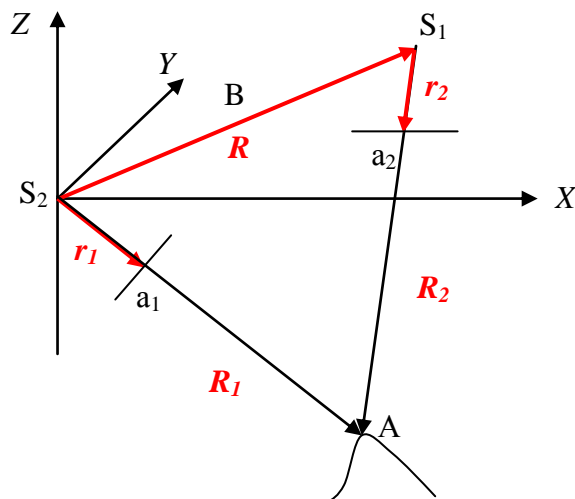
Пусть для пары снимков все элементы взаимного ориентирования равны 0, т.е. базис и снимки горизонтальны (идеальный случай).

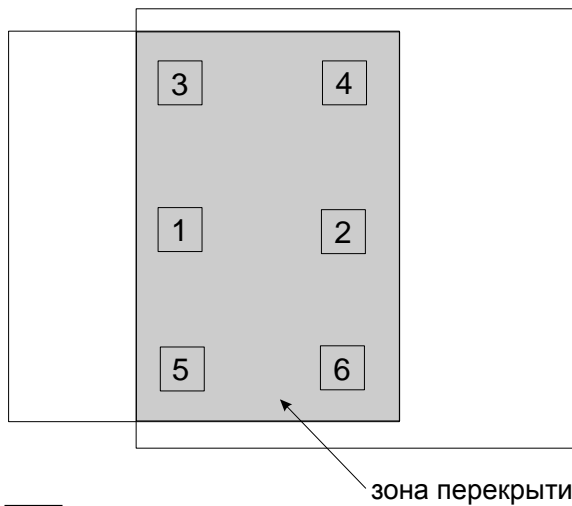


Тогда базисная плоскость  $S_1S_2o_1o_2$  отвесна и проходит через оси  $x_1$  и  $x_2$ . Базисная плоскость, проходящая через одноименные лучи, пересечет снимки по линии  $a_1a_2$ , а  $y_1^0 - y_2^0 = 0$ . Таким образом, если появится хотя бы один из углов  $\alpha'_1, \kappa'_1, \alpha'_2, \omega'_2, \kappa'_2$ , точка на снимке сместится и равенство нарушится  $y_1^0 - y_2^0 = q$  – поперечный параллакс.

### 4.3 Формулы связи координат точек местности и координат их изображений на паре снимков.

Вывод формул прямой фотограмметрической засечки.





– стандартные зоны, в которых необходимо выбирать точки, используемые для взаимного ориентирования.

Выполнив взаимное ориентирование снимков, то есть определив  $\alpha_l, K_l, \alpha_n, \omega_n, K_n$ , можно вычислить координаты любой точки модели, если измерять координаты этой точки на левом и правом снимках:

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

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

$$Z = -\frac{B}{p^o} f,$$

где  $p^o = x_1^o - x_2^o$

$$x_1^o = -f \frac{a_1(x_1 - x_o) + a_2(y_1 - y_o) - a_3f}{c_1(x_1 - x_o) + c_2(y_1 - y_o) - c_3f}$$

$$y_1^o = -f \frac{b_1(x_1 - x_o) + b_2(y_1 - y_o) - b_3f}{c_1(x_1 - x_o) + c_2(y_1 - y_o) - c_3f}$$

Координаты  $X, Y, Z$  точек модели определены в фотограмметрической системе координат, которая имеет произвольно заданный масштаб и произвольно ориентирована относительно внешней системы координат.

#### 4.4 Внешнее ориентирование модели.

Элементы внешнего ориентирования ГММ. Определение элементов внешнего ориентирования модели местности. Деформация модели местности. Оценка точности определения координат точек модели по стереопаре снимков.

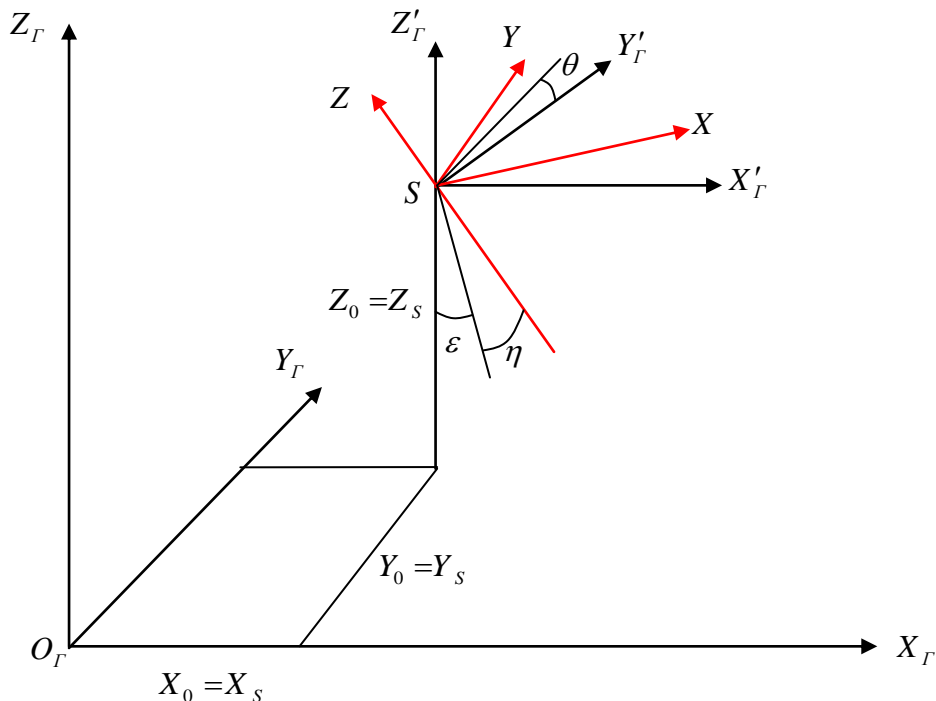
Переход от фотограмметрической системы координат к геодезической называется внешним или геодезическим ориентированием модели.

Для перехода использую формулы связи координат двух систем.

$$\begin{pmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} + A_{\varepsilon\eta\theta} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

$X_G, Y_G, Z_G$  – координаты точки местности в геодезической системе координат,

$X_0Y_0Z_0$  – смещение начала фотограмметрической системы координат относительно геодезической,  
 $XYZ$  – координаты точки в фотограмметрической системе координат,  
 $\varepsilon\eta\theta$  – углы поворота фотограмметрической системы координат относительно геодезической,  
 $A_{\varepsilon\eta\theta}$  – матрица направляющих косинусов, вычисленная по углам  $\varepsilon\eta\theta$  ,  
 $t$  – масштабный коэффициент.



$X_0, Y_0, Z_0, \varepsilon, \eta, \theta, t$  – элементы внешнего ориентирования модели.

Таким образом, для перехода от фотограмметрической системы координат к геодезической необходимо знать элементы внешнего ориентирования модели, которые, как правило, неизвестны. Для их определения используют опорные точки, которые обязательно включают в обработку и после взаимного ориентирования у них будут известны и фотограмметрические и геодезические координаты. Одна опорная точка дает три уравнения с семью неизвестными. Для решения уравнений необходимо минимум три точки, тогда будут составлены девять уравнений с семью неизвестными. То есть их можно решить, а значит, будут найдены семь элементов внешнего ориентирования. Далее в уравнение связи двух систем координат подставляют элементы внешнего ориентирования модели и координаты точек в фотограмметрической системе координат и вычисляют геодезические координаты всех запроектированных точек. То есть перевычисляют модель из фотограмметрической системы координат в геодезическую.

## 5. Пространственная фототриангуляция

### 5.1 Назначение и классификация способов аналитической пространственной фототриангуляции. Маршрутная и блочная пространственная фототриангуляция.

Сущность, назначение и классификация пространственной фототриангуляции (ПФТ).

В основе пространственной фототриангуляции (ПФТ) – идея построения модели по группе снимков, принадлежащих одному или нескольким маршрутам. Это позволит использовать минимальное число опорных точек, что приведет к снижению затрат на полевые работы.

ПФТ можно классифицировать[6]:

- 1) по количеству маршрутов:



- одномаршрутная, которая строится по снимкам, принадлежащим одному маршруту;
- многомаршрутная, или блочная, которая строится по снимкам, принадлежащим двум и более маршрутам;
- 2) по технологии построения сети фототриангуляции:
  - аналоговая, основанная на использовании универсальных приборов;
  - аналитическая, основанная на применении высокоточных автоматизированных стереокомпараторов и ЭВМ;
  - цифровая, при которой используются цифровые изображения.

Различают 3 способа построения ПФТ:

- 1) метод независимых моделей;
- 2) метод частично зависимых моделей;
- 3) метод связей.

Достоинства цифровой фототриангуляции

Цифровая фототриангуляция имеет следующие достоинства:

- 1) высокая степень автоматизации;
- 2) высокая точность благодаря:
  - возможности учёта геометрических искажений в координатах точек снимков;
  - возможности обработки избыточных измерений;
  - использованию мощных компьютеров;
  - использованию строгих алгоритмов обработки снимков;
- 3) возможность обработки снимков различного формата с различными элементами внутреннего и внешнего ориентирования снимков, снимков, полученных различными съёмочными системами;
- 4) широкие функциональные возможности;
- 5) решена проблема старения материала;
- 6) возможность улучшения изобразительного качества снимков;
- 7) высокая производительность труда и культура производства;
- 8) нет необходимости в сложном обслуживании.

## 5.2 Методы пространственной фототриангуляции.

Маршрутная фототриангуляция методом независимых моделей. Блочная фототриангуляция методом связей, объединения маршрутных и одиночных моделей. Технология аналитической фототриангуляции.

*Построение блочных сетей фототриангуляции методом связей*

Наиболее строгим методом построения блочных сетей пространственной фототриангуляции аналитическим и цифровым способами по сравнению с методом независимых моделей является метод связей. В основе метода связей лежат уравнения коллинеарности проектирующих лучей:

$$x - x_0 = -f \frac{X^*}{Z^*}$$

$$y - y_0 = -f \frac{Y^*}{Z^*}$$

$$\left. \begin{aligned} X^* &= a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s) \\ Y^* &= a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s) \\ Z^* &= a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s) \end{aligned} \right\}$$

В уравнении будут известны  $f$ ,  $x_0$ ,  $y_0$ ,  $x$ ,  $y$ . Неизвестны элементы внешнего ориентирования снимков  $X_s, Y_s, Z_s, \alpha, \omega, \kappa$ , а также  $X, Y, Z$  – координаты точек сети ПФТ.

Достоинством метода связей является то, что сеть строится и уравнивается одновременно для всех точек, входящих в блок, а также поправки находятся

непосредственно к измеренным величинам, что обеспечивает более высокую точность построения сети. Недостатками этого метода являются: сложность задания приближённых значений неизвестных (для решения этой проблемы можно предварительно уровнять сеть менее строгим методом, а её результаты использовать в качестве приближённых значений), должны отсутствовать грубые ошибки, должны быть исключены систематические ошибки (или сведены к минимуму).

## **6. Универсальные стереофотограмметрические системы**

### **6.1 Назначение и классификация универсальных стереофотограмметрических приборов: аналоговые и аналитические универсальные приборы (УП) и цифровые станции.**

Идея и сущность универсального метода построения модели.

Фотограмметрия занимается изучением размеров, формы, пространственного положения объектов по их моделям, которые строят по изображениям объектов.

В основе построения ГММ по паре снимков лежит геометрический принцип обратимости фотографического процесса.

ГММ может быть построена разными способами.

При аналитическом способе построения ГММ определяются только координаты отдельных точек модели, с помощью которых решают поставленную задачу, но аналитический способ построения ГММ не позволяет работать непосредственно с моделью местности.

ГММ можно построить универсальным методом, который реализуется на универсальных стереофотограмметрических приборах (УП).

В основе построения ГММ на УП лежит тот же геометрический принцип обратимости съёмочного процесса.

Главным отличием УП от других приборов является возможность работы непосредственно с моделью, то есть на УП можно измерять координаты точек модели, определять по модели расстояния, уклоны, превышения, выполнять рисовку контуров и горизонталей, строить сети фототриангуляции.

Существует много типов УП. Главное их различие заключается в способе проектирования, то есть в способе восстановления связей проектирующих лучей. По этому принципу УП делятся на:

- УП оптического типа (проектирование выполняется с помощью оптических камер);
- УП механического типа (роль проектирующих лучей выполняют металлические стержни);
- аналитические УП (АУП). В них восстановление лучей осуществляется по формулам и уравнениям аналитической геометрии, то есть все операции выполняются аналитически;
- цифровые фотограмметрические станции (цифровые стереоплоттеры). Они аналогичны АУП, только на них ведется обработка цифровых изображений.

В настоящее время цифровые стереоплоттеры вытеснили все другие УП.

### **6.2 Цифровое изображение, основные понятия.**

Цифровое изображение. Способы получения цифрового изображения.

Цифровые снимки получают, либо цифровой камерой, либо сканируют снимки, полученные аналоговым способом.

Цифровая камера имеет конструкцию аналогичную фотокамере, только в плоскости прикладной рамки находится матрица ПЗС. Эта матрица состоит из микроэлементов принимающих световую энергию. Далее световая энергия преобразуется в цифровой код. *Цифровое изображение* – это матрица чисел, каждый элемент которой соответствует значению яркости объекта на местности.

Чтобы преобразовать аналоговое изображение в цифровое нужно выполнить его сканирование. Принципиальная схема планшетного сканера



Суть сканирования заключается в следующем: световой луч ограниченного размера, отражается от изображения и это отраженное излучение фиксируется как яркость изображения в цифровой форме. Движение лампы осуществляется по двум осям ху. Чем меньше размер светового луча, тем меньше размер пиксела, а соответственно их больше, но и объем информации увеличится.

На цифровых изображениях координаты измеряются в пикселах, а значит точность измерений будет зависеть от размера пиксела. Размер пиксела – разрешающая способность цифрового изображения.

### 6.3 Цифровые стереофотограмметрические системы (стереоплоттеры)

Понятие цифровых стереоплоттеров и их основные системы. Способы получения стереомодели на цифровом стереоплоттере. Управление цифровым стереоплоттером. Технология обработки снимков на цифровых стереофотограмметрических системах.

Цифровой стереоплоттер – это специализированное программное обеспечение, позволяющее выполнять все процессы по построению геометрической модели местности, измерению координат точек, сбору информации для построения ЦМР и ЦММ, трансформирование и ортотрансформирование снимков, фототриангуляцию, построение стереомодели.

Построение модели на цифровом стереоплоттере может выполняться двумя способами:

1. по установочным элементам;
2. по условию компланарности.

*Построение модели на стереоплоттере по условию компланарности*

1. Ввод исходных данных: цифровые изображения (отсканированные снимки или снимки полученные с цифровой камеры), элементы внутреннего ориентирования снимков, координаты координатных меток (из паспорта АФА), либо расстояния между координатными метками, данные о дисторсии (из паспорта АФА), геодезические координаты опорных точек.
2. Внутреннее ориентирование снимков. На данном этапе выполняется измерение координат координатных меток для каждого снимка. Затем для левого и правого изображения для каждой координатной метки составляются уравнения аффинного преобразования:

$$\left. \begin{aligned} x_i &= a_0 + a_1 x_{ci} + a_2 y_{ci} \\ y_i &= b_0 + b_1 x_{ci} + b_2 y_{ci} \end{aligned} \right\},$$

где  $a_0, \dots, b_2$  – коэффициенты аффинного преобразования,

$x_i, y_i$  – плоские координаты координатных меток (из паспорта АФА),

$x_{ci}, y_{ci}$  – измеренные координаты координатных меток на цифровом изображении.

Таким образом, зная координаты координатных меток, взятые из паспорта АФА и измеренные по цифровым изображениям, можно вычислить коэффициенты аффинного преобразования. После этого вычисляются плоские координаты координатных меток.

3. Взаимное ориентирование снимков. Целью данного этапа является определение элементов взаимного ориентирования снимков. Для этого измеряются координаты соответственных точек в стандартных зонах стереопары в области продольных перекрытий снимков. Исходным уравнением является условие компланарности соответствующих лучей:

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

Если элементы взаимного ориентирования определяются в базисной системе координат, то условие компланарности имеет вид:

$$Y'_1 Z'_2 - Z'_1 Y'_2 = 0.$$

В результате решения данного уравнения будут найдены элементы взаимного ориентирования снимков  $\alpha'_1, \kappa'_1, \alpha'_2, \omega'_2, \kappa'_2$ . Результат будет считаться удовлетворительным если величина остаточного поперечного параллакса  $y_1^0 - y_2^0 = \delta q$  и средняя

квадратическая ошибка остаточного поперечного параллакса  $m_{\delta q} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta q_i^2}{n}}$  будут в допуске.

4. Определение фотограмметрических координат опорных точек. На данном этапе оператор наводится с помощью клавиатуры или «мыши» на изображения опорных точек на снимках и таким образом измеряет фотограмметрические координаты опорных точек.
5. Определение элементов внешнего ориентирования модели. Для определения элементов внешнего ориентирования модели используются фотограмметрические координаты опорных точек, найденные на предыдущем этапе, и геодезические координаты этих же точек. Элементы внешнего ориентирования модели вычисляются по формуле:

$$\begin{vmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{vmatrix} + A_{\varepsilon\eta\theta} \begin{vmatrix} X \\ Y \\ Z \end{vmatrix} t.$$

В данной формуле будут неизвестны семь элементов внешнего ориентирования модели ( $X_0, Y_0, Z_0, \varepsilon, \eta, \theta, t$ ). Для решения данных уравнений необходимо иметь минимум три опорные точки. После нахождения элементов внешнего ориентирования модели выполняется оценка точности, при которой вычисляются расхождения геодезических координат опорных и контрольных точек по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \Delta X_G &= X_G' - X_G \\ \Delta Y_G &= Y_G' - Y_G \\ \Delta Z_G &= Z_G' - Z_G \end{aligned} \right\},$$

где  $X_G', Y_G', Z_G'$  – геодезические координаты опорных точек, вычисленные по формулам, через элементы внешнего ориентирования модели, полученные в последней итерации,

$X_G, Y_G, Z_G$  – геодезические координаты опорных точек, полученные из фототриангуляции.

А также вычисляются средние квадратические ошибки расхождения геодезических координат опорных точек:

$$\left. \begin{aligned}
 m_{\Delta X} &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k \Delta X_{\Gamma_i}^2}{k}} \\
 m_{\Delta Y} &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k \Delta Y_{\Gamma_i}^2}{k}} \\
 m_{\Delta Z} &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k \Delta Z_{\Gamma_i}^2}{k}}
 \end{aligned} \right\} .$$

6. Сбор цифровой информации в стереорежиме. На данном этапе выполняется рисовка горизонталей и контуров. Оператор с помощью клавиатуры или «мыши» наводит пространственную марку на точки модели, координаты этих точек записываются в виде векторного файла. Далее эту информацию можно использовать для создания ЦМР, карт и др.

## 7. Цифровое ортотрансформирование

### 7.1 Цифровые модели рельефа

Классификация цифровых моделей рельефа по: способу сбора информации о рельефе; структуре первичной информации о рельефе; методу описания рельефа; структуре информации о рельефе, хранящейся на компьютере; способу представления ЦМР.

Цифровая модель рельефа (ЦМР) – это метрическая информация о поверхности земли и правила обращения с этой информацией.

Построение ЦМР выполняется в два этапа:

1. сбор исходных данных, в качестве которых выступают координаты XYZ определенного количества исходных точек.
2. выбор математического аппарата, который позволит вычислить координату Z любых точек поверхности земли.

Необходимое количество исходных данных (точек с координатами XYZ) для построения ЦМР определяется точностью моделирования рельефа и характером рельефа.

ЦМР можно классифицировать:

1. по способу сбора информации о рельефе;
2. по структуре первичной информации о рельефе;
3. по методу описания рельефа;
4. по структуре информации о рельефе, хранящейся на компьютере;
5. по способу представления ЦМР.

*Классификация ЦМР по способу сбора информации о рельефе*

1. Картографический способ
2. Геодезический способ
3. Стереофотограмметрический способ
4. Воздушное лазерное сканирование

*Классификация ЦМР по структуре первичной информации о рельефе*

По структуре первичной информации о рельефе, то есть по расположению исходных точек различают:

1. Регулярная сеточная модель. Исходные точки для построения ЦМР располагаются в узлах сетки и для каждой измеряются координаты XYZ. Достоинства метода: организация сбора информации проста и не требует высокой квалификации оператора, процесс измерения координат XYZ можно автоматизировать, уменьшение объема информации, так как в компьютере хранятся координаты XY начальной точки, шаг

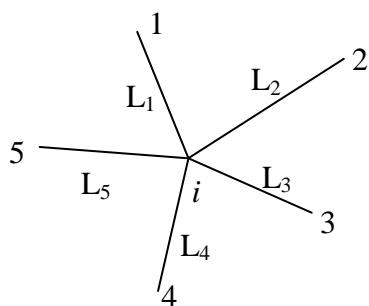
сетки и высоты узлов. Недостаток метода: отсутствует возможность учитывать структуру рельефа.

2. Расположение исходных данных в характерных местах рельефа. В этом случае исходные данные для построения ЦМР задаются координатами XYZ множества точек расположенных в характерных местах рельефа. Достоинства способа: учет структуры рельефа. Недостатки способа: требуется практический навык оператора в правильной оценки структуры рельефа.
3. Комбинированный способ. В данном случае измеряются координаты XYZ точек равномерной сетки, а также структурных линий, то есть характерных точек рельефа. Достоинства метода: позволяет передавать структуру рельефа и дает возможность частично автоматизировать процесс. Недостаток: необходим опытный исполнитель.
4. Хаотическое расположение исходных точек. Здесь координаты XYZ точек измеряются в тех местах, где это возможно.

#### *Классификация ЦМР по методу описания рельефа*

*Интерполяционный метод.* В данном случае задается метод интерполяции высот исходных точек. По координатам XYZ исходных точек строится функция описывающая поверхность, затем отметки любых произвольных точек вычисляются на основе этой функции.

К интерполяционным методам построения ЦМР относятся: средний весовой метод и триангуляция Делоне.



Здесь точки 1-5 – исходные точки с координатами XYZ, тогда координата  $Z_i$  искомой точки  $i$  с координатами  $X_i Y_i$ , будет вычисляться по формуле:

$$Z_i = \frac{P_1 Z_1 + P_2 Z_2 + P_3 Z_3 + P_4 Z_4 + P_5 Z_5}{P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5} = \frac{\sum_{i=1}^k P_i Z_i}{\sum_{i=1}^k P_i},$$

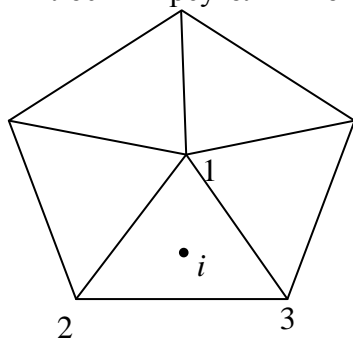
где  $k$  – число исходных точек с координатами XYZ,

$P_i$  – вес соответствующей точки равный

$$P_i = \frac{1}{L_i},$$

где  $L_i$  – расстояние от исходной точки до точки  $i$ .

Если используется триангуляция Делоне, то поверхность земли представляется системой плоскостей каждая из которых проходит через три точки местности расположенные в характерных местах рельефа. Поверхность представляется в виде системы плоских треугольников.



Высота  $Z_i$  вычисляется интерполированием высот вершин треугольников из решения уравнения плоскости проходящей через три точки.

$$\begin{vmatrix} X_i - X_1 & Y_i - Y_1 & Z_i - Z_1 \\ X_2 - X_1 & Y_2 - Y_1 & Z_2 - Z_1 \\ X_3 - X_1 & Y_3 - Y_1 & Z_3 - Z_1 \end{vmatrix} = 0$$

Из данного уравнения определяется координата  $Z_i$ .

Достоинством данных методов является жесткая связь с характерными точками рельефа.

*Функциональный метод.* В данном случае ЦМР представляется в виде функции  $Z = F(XY)$ . Примеры функциональных способов построения ЦМР являются полиномиальная и сплайн функции.

При использовании полиномиальных функций для всех исходных точек составляются уравнения вида:

$$Z = C_0 + C_1X + C_2Y + C_3XY + \dots,$$

в которых будут известны координаты XYZ исходных точек, а неизвестны коэффициенты. Когда коэффициенты будут найдены, можно вычислять координаты Z любой точки поверхности.

При использовании сплайн функций для всех исходных точек составляются уравнения вида:

$$Z = C_0 + C_1X + C_2Y + C_3XY + \dots + C_k X^3 Y^3.$$

Точность построения ЦМР будет зависеть от характера рельефа.

*Классификация ЦМР по структуре информации о рельефе, хранящейся на компьютере:*

1. в виде координат точек модели;
2. в виде коэффициентов полиномов.

*Классификация ЦМР по способу представления ЦМР*

ЦМР можно представить в виде:

1. текстурированной трехмерной модели;
2. координат точек модели;
3. горизонталей;
4. градуированной отмывки, когда определенной высоте присваивается соответствующее значение тона;
5. геометрических фигур (например, треугольников);
6. объемной поверхности.

При построении ЦМР должна быть обеспечена заданная точность моделирования рельефа в зависимости от назначения ЦМР. Точность построения зависит от плотности и расположения исходных точек, размера элементарного участка моделирования, используемых алгоритмов для построения ЦМР, а также от точности определения высот исходных точек.

## 7.2 Цифровое ортотрансформирование снимков

Описание методики цифрового ортотрансформирования снимков.

*Ортотрансформирование снимков*

При ортотрансформировании снимков происходит исправления снимков за угол наклона, за рельеф и приведение к заданному масштабу.

Ортотрансформирование выполняется если смещение точек за рельеф на трансформированном снимке масштаба  $1/t$  будет превышать допустимое значение

$$\delta r_h = \frac{rhm}{Ht} > \delta r_{доп}.$$

После выполнения внутреннего ориентирования снимков, выполняется ортотрансформирование. Здесь также как и при обратном трансформировании задается пустая матрица, представляющая собой ортотрансформированное изображение. Далее для элементов данной матрицы с координатами  $x^0 y^0$  вычисляются координаты  $X Y$  точки местности по формулам:

$$\left. \begin{aligned} X &= X_s + (Z - Z_s) \frac{x^0}{(-f)} \\ Y &= Y_s + (Z - Z_s) \frac{y^0}{(-f)} \end{aligned} \right\}$$

Первоначально в данных формулах будет использоваться  $Z$  среднее. По полученным координатам  $X Y$  определяется координата  $Z$  элементарного участка местности соответствующая пикселю цифрового снимка с координатами  $x^0 y^0$ .  $Z$  определяется на основе цифровой модели рельефа. Затем получив  $Z$  заново вычисляют координаты  $X Y$  точки местности и снова уточняется  $Z$ , таким образом выполняется несколько итераций, до тех пор пока разница между двумя последними итерациями не будет в допуске. После определения координат  $X Y Z$  точки местности, соответствующей элементу ортотрансформированного снимка с координатами  $x^0 y^0$ , вычисляют плоские координаты  $x y$  точки на исходном изображении по формулам:

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

Затем элементу цифрового ортотрансформированного снимка с координатами  $x^0 y^0$  присваивается значение яркости с координатами  $x y$  исходного изображения.

Аналогичным образом, выполняются вычисления для каждого пикселя.

## 8. Технологии создания карт

### 8.1. Комбинированный метод создания карт

Технологические варианты комбинированного метода создания карт.

Главное отличие комбинированного метода от стереотопографического заключается в том, что при комбинированном методе аэрофотосъемка используется только для составления контурной части планов. Это вызвано тем, что требования к аэрофотосъемке, используемой для рисовки рельефа и составления контуров различны. При комбинированном методе важно уменьшить смещение точек на фотоплане, вызванное рельефом местности которое, как известно, определяется по формулам:

$$\delta r_h = \frac{r \cdot h}{H} \quad \text{или} \quad \delta r_h = \frac{r \cdot h}{m \cdot f},$$



где  $h$  - превышение точки местности над начальной горизонтальной плоскостью;  
 $m$  - знаменатель масштаба аэрофотосъемки;  
 $r$  - радиус-вектор, соединяющий точку снимка с точкой надира;  
 $f$  - фокусное расстояние фотокамеры;  
 $H$  - высота фотографирования;

Из формулы следует, что смещение точки на снимке (фотоплане) тем меньше, чем больше фокусное расстояние АФА и высота фотографирования, а превышения точек незначительны. При стереотопографическом методе материалы аэрофотосъемки должны обеспечивать заданную точность определения высот точек, которая может быть определена по формулам:

$$\delta h = \frac{H}{b} \cdot \delta \Delta p \quad \text{или} \quad \delta h = \frac{m \cdot f \cdot \delta \Delta p}{P},$$

где  $b$  - базис фотографирования;  
 $\delta \Delta p$  - средняя погрешность определения разности продольных параллаксов;  
 $\delta \Delta h$  - средняя погрешность, допустимая при определении высот.

Анализируя эти формулы и сопоставляя их с формулами видим, что точность определения высот тем выше, чем меньше высота фотографирования и чем меньше фокусное расстояние АФА, т.е. требования к выбору масштаба аэрофотосъемки и фокусному расстоянию АФА для стереотопографического и комбинированного методов находятся в противоречии.

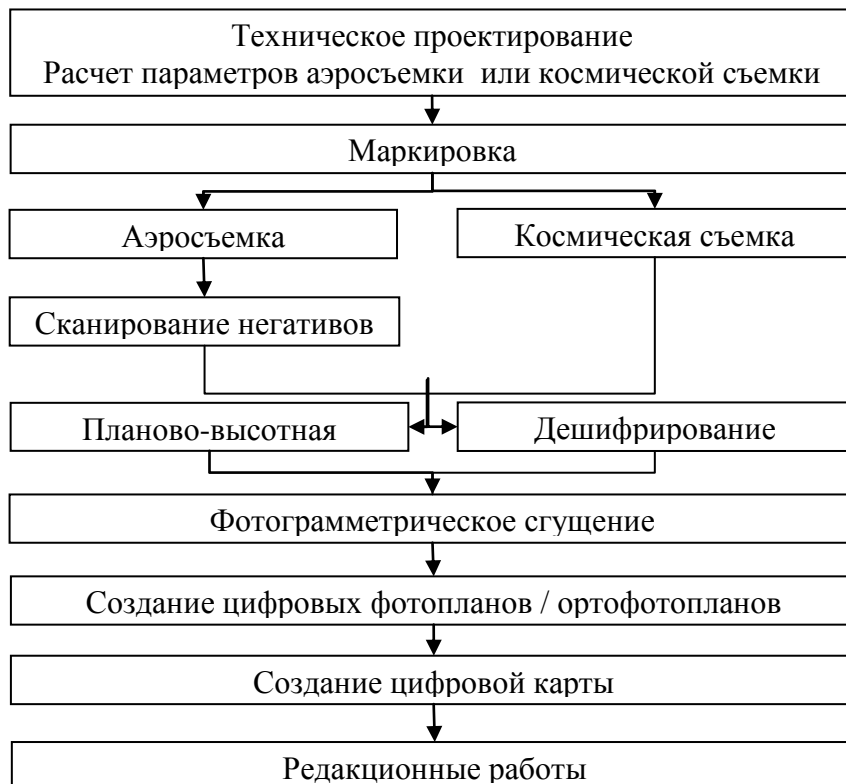
На практике выполнить аэрофотосъемку, удовлетворяющую точность определения точек, как в плане, так и по высоте, особенно в крупных масштабах, не всегда представляется возможным. Поэтому в этих случаях приходится выполнять две аэрофотосъемки с различными параметрами. Одна из них используется для изготовления фотоплана, другая для рисовки рельефа.

При проектировании технологий создания карт и планов основными критериями являются экономичность и точность. В свою очередь экономичность зависит от параметров аэрофотосъемки, чем мельче масштаб залета по отношению к масштабу создаваемой карты, тем меньше будут затраты средств и труда на ее создание.



## 8.2. Стереотопографический метод создания карт

Технологические варианты стереотопографического метода создания карт.



При использовании стереотопографического метода создания карт все процессы по обработке снимков выполняются на универсальных фотограмметрических приборах (УП, АУП, стереоплоттеры).

Сначала необходимо построить геометрическую модель местности. Исходные данные для этого:

1. аналоговые или цифровые снимки.
2. паспортные данные АФА (,,,,,) )
3. каталог координат опорных точек или элементы внешнего ориентирования снимков
4. результаты дешифрирования

*Техническое проектирование. Расчет параметров а/с.*

На этом этапе дается характеристика участка работ.

В зависимости от масштаба создаваемой карты и сечения рельефа на карте, задается точность планового положения контуров на местности.

Определяется объектный состав, который нужно отобразить на карте и изучаются дополнительные условия определяемые заказчиком.

Дается физико-географическое описание района работ (климат, топографическая изученность, дорожная сеть, гидрография и т.п.)

Планирование летносъёмочных работ.

Планирование полевых работ (геодезические, полевое дешифрирование: сплошное или частичное).

Планирование камеральных работ: выбор метода создания карт, программного обеспечения и др.

*Аэрофотосъёмка*

Основным документом для выполнения аэрофотосъёмки является технический проект, которым определяются основные параметры аэрофотосъёмки (высота фотографирования, продольное и поперечное перекрытия, базис фотографирования, расстояние между маршрутами, количество требуемых фотоматериалов).

На первом этапе определяются границы съёмочных участков. Для этого по заданным значениям масштаба аэрофотосъёмки и фокусного расстояния вычисляется высота фотографирования и по формуле (1) проверяют, удовлетворяют ли характеристики рельефа местности требованиям аэрофотосъёмки.

$$(h_{\max} - h_{\min})/H < 0.2, \quad (1)$$

Если условие не выполняется, то объект разбивается на отдельные съёмочные участки, для каждого из которых вычисляются свои параметры, кроме того размер съёмочного участка не должен быть слишком большим, чтобы аэрофотосъёмка была выполнена в один полет.

Границами съёмочных участков служат, как правило, рамки топографических трапеций, но можно использовать и другой подход. Для каждого съёмочного участка вычисляются величины, приведенные в таблице.

Основными параметрами аэрофотосъёмки являются: масштаб фотографирования ( $m$ ), высота фотографирования ( $H_{\phi}$ ), фокусное расстояние АФА ( $f$ ), а также продольное и поперечное перекрытия аэрофотоснимков ( $P_x$  и  $P_y$ ). Первые три параметра связаны соотношением:

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{H_{\phi}}$$

Высоту фотографирования относительно средней плоскости участка аэрофотосъёмки  $H_{\phi}$  найдем по формуле:

$$H = m \cdot f.$$

Продольные и поперечные перекрытия снимков, определяются в соответствии с “Основными положениями по аэрофотосъёмке”, выполняемой для создания и обновления карт.

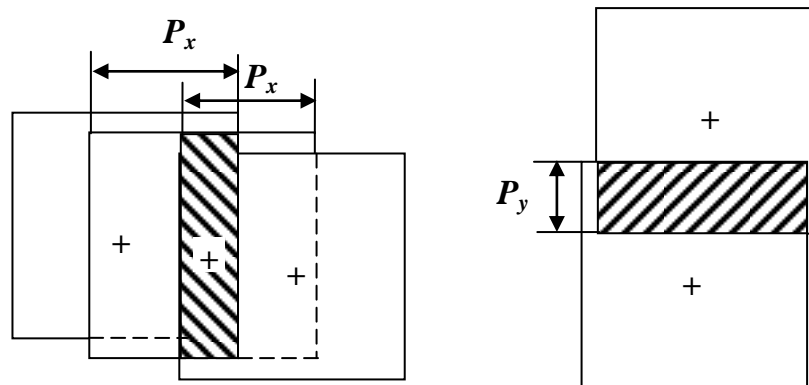


Рисунок 9 – Продольное и поперечное перекрытие снимков  
Продольное перекрытие определяется в соответствии с таблицей 5.

Таблица 5 – Таблица расчета продольного перекрытия снимков

Заданное $P_x\%$	Минимальное $P_0\%$	Максимальное $P_x\%$	
		$h:H < 0,2$	$h:H > 0,2$
60	56	66	70
80	78	83	85
90	89	92	93

Продольное перекрытие снимков рассчитывается по формуле:

$$P_X = P_0 + \Delta P_h + \Delta P_H \quad (16)$$

где  $P_0$  – минимальное заданное продольное перекрытие снимков,

$\Delta P_h$  – поправка за рельеф местности вычисляется по формуле:

$$\Delta P_h = \frac{h}{H_\phi} (100 - P_0) \quad (17)$$

$h$  – наибольшее превышение точек местности над средней плоскостью съемочного участка,

$\Delta P_H$  – навигационная поправка, которая согласно основных положений по аэрофотосъемке составляет 4-6% и зависит от масштаба аэрофотосъемки.

Поперечное перекрытие снимков определяется по таблице 6.

Таблица 6 – Таблица расчета поперечного перекрытия снимков

Масштаб аэрофотосъемки	Поперечное перекрытие %		
	Расчетное	Минимальное	Максимальное
Мельче 1:25000	$\frac{h}{30+70 H_\phi}$	20	+10
1:25000-1:10000	$\frac{h}{35+65 H_\phi}$	20	+15
Крупнее 1:10000	$\frac{h}{40+60 H_\phi}$	20	+20

Расчет базиса фотографирования на местности производится по формуле:

$$B_X = l_x \left(1 - \frac{P_x}{100}\right) \frac{H_\phi}{f}, \quad (18)$$

Расчет расстояния между осями маршрутов рассчитывается по формуле:

$$B_Y = l_y \left(1 - \frac{P_y}{100}\right) \frac{H_\Phi}{f}, \quad (19)$$

где  $l_x, l_y$  – формат кадра в миллиметрах.

*Оценка фотографического и фотограмметрического качества*

Оценка фотографического и фотограмметрического качества фотоматериалов выполняется в соответствии с нормами, приведенными в «Основном положении по аэрофотосъемке, выполненной для создания и обновления топографических карт и планов».

Фотографическое качество, влияющее на точность распознавания объектов местности, на точность визирования на точку изображения, на качество алгоритмов автоматической идентификации соответственных точек, а также на качество карт и планов, определяется следующими параметрами:

- наличие облачности;
- присутствие на изображении дымов и теней от них, бликов, ореолов;
- резкость изображения;
- наличие механических повреждений.

Фотограмметрическое качество, влияющее на точность определения геометрических характеристик объектов по изображениям (на точность построения сети ПФТ, в дальнейшем на точность создания карты или плана) определяется следующими параметрами:

- масштаб снимков;
- разномасштабность снимков;
- оценка продольного и поперечного перекрытий снимков;
- непараллельность базиса фотографирования стороне аэрофотоснимка;
- максимальный угол наклона снимков.

Накидной монтаж необходим для оценивания качества лётно-съёмочного процесса: точность покрытия аэрофотосъёмкой заданной площади, соблюдения перекрытия и масштаба фотографирования, прямолинейности маршрутов, выравнивание плёнки, резкости изображения, работы АФА. Изготовление накидного монтажа производится на планшетах, соответствующих размеру снимаемого участка.

При продольном перекрытии до 60% монтируются все снимки, при перекрытии 80% - монтаж производится через один снимок, а при перекрытии 90% - через три аэроснимка. Крайние снимки маршрутов монтируются обязательно, независимо от величины перекрытия. Аэроснимки монтируются так, чтобы были видны их номера.

Накидной монтаж начинают выполнять с первого (северного) маршрута участка, причём снимки раскладываются по маршрутам с севера на юг. Монтаж начинают с крайнего первого снимка маршрута, к нему подсоединяют соседний левый снимок путём тщательного совмещения идентичных контуров. Подобным образом присоединяются все снимки маршрута до крайнего левого. К первому маршруту подсоединяется следующий маршрут. При этом должны быть совмещены идентичные контура, как в продольном перекрытии, так и в поперечном.

При монтаже обращается внимание на следующее:

- изображение контуров, расположенных около начальных направлений, должны строго совмещаться;
- монтаж аэрофотоснимков горных районов должен тщательно выполняться по границам участка и рамкам сдаточных трапеций, что достигается распределением смещения за счёт рельефа в центральной части участка;
- рамки трапеций должны быть прямолинейными;
- линейные контуры при монтаже горных районов (реки, дороги, долины, складки рельефа) должны изображаться без нарушения основной конфигурации.

Схема накидного монтажа представлена на рисунке 1.

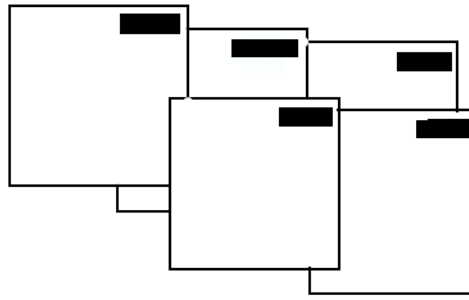


Рисунок 1

1. Изменение высоты фотографирования приводит к разномасштабности снимков, которая может быть определена формулой:

$$\Delta m\% = \frac{l_1 - l_2}{l_{cp}} * 100\%$$

где  $l_1, l_2$  - длины одноименных отрезков в области перекрытия снимков;  
 $l_{cp}$  - средняя длина отрезков.

В соответствии с положением по аэрофотосъемке  $\Delta m\%$  не должна превышать 3% если местность равнинная и 5% если горная.

2. Определение величины продольного перекрытия снимков производится по формуле:

$$P_x = \frac{l_{общ}}{l_{сн}} * 100\%$$

где  $l_{общ}$  - размер перекрытия снимков в мм вдоль оси x;  
 $l_{сн}$  - размер кадра по оси x.

В соответствии с положением по аэрофотосъемке минимальное продольное перекрытие снимков должно составлять 56%, максимальное продольное перекрытие снимков выбирается в соответствии с коэффициентом:

$$k = \frac{h}{H}$$

где  $h$  - наибольшее превышение точки местности над средней плоскостью съемочного участка;

$H$  - высота полета над средней плоскостью участка.

$$h = \frac{h_{max}}{2}$$

где  $h_{max}$  - перепад высот.

$$H = m * f$$

Определение величины поперечного перекрытия снимков выполняется аналогично продольному перекрытию.

В соответствии с положением по аэрофотосъемке минимальное продольное перекрытие снимков должно составлять 20% (max=35%).

3. Определение непараллельности базиса фотографирования

Контроль поворота АФА на угол сноса, выражающийся в непараллельности базиса фотографирования стороне снимка и называемый в практике «ёлочка», ведётся по смонтированным по начальному направлению снимка. Угол, образованный базисом фотографирования и осью  $x$  аэрофотоснимка называется «ёлочкой».

Измерение «ёлочки» производится в следующем порядке: на каждом аэроснимке накладывается центр, затем центр правого снимка переносится на левый. Центр левого снимка совмещается с правой координатной меткой и центром правого снимка. Полученный угол – «ёлочка» измеряется фотограмметрической линейкой. Грубо «ёлочку» можно определить путём измерения угла между стороной одного снимка и линией, соединяющей одноимённые углы соседних аэроснимков. Допустимое значение «ёлочки» -  $5^0$ .

#### 4. Прямолинейность маршрута

Контроль прямолинейности маршрутов при аэрофотосъёмке равнинных районов производится по накидному монтажу всего района, а при аэрофотосъёмке горных районов по каждому маршруту.

На крайних снимках маршрута находятся главные точки А и Б, их соединяют линией (обычно ниткой), находят максимальное отклонение снимка в месте прогиба  $\Delta h$  мм. Замеряют длину маршрута  $L$  мм. Прогиб вычисляется по формуле:

$$\frac{\Delta h}{L} 100\% = H\%$$

Если на маршруте имеется несколько искривлений, то уклонения определяются для каждого отрезка. Величина прогиба не должна быть более 2% при высоте фотографирования свыше 750 м и 3% при меньших высотах.

#### 5. Определение углов наклона снимков

Определение углов наклона снимков, полученных нестабилизированным АФА производится по показаниям круглого уровня. Смещение пузырька уровня не даёт возможности определить истинные углы наклона снимков, но позволяет судить о режиме полёта и о средних углах наклона снимков в маршруте. При этом предполагается, что уровень отрегулирован, то есть при горизонтальном положении прикладной рамки отсчёт по уровню равен  $0^0$ . Цена деления уровня АФА составляет  $1^0$ . Систематические отклонения пузырька уровня в одном направлении свидетельствует о систематическом наклоне.

При съёмке без стабилизации углы наклонов не должны быть более  $3^0$ , причём количество снимков с такими углами не должно быть более 10% от общего числа снимков. Максимальные углы наклона аэрофотоснимков, полученных стабилизированным АФА не должны превышать  $1,5^0$ , без стабилизации АФА  $< 3^0$ .

#### Создание планово-высотного обоснования

Этот процесс выполняется с целью обеспечения снимков необходимым количеством опознаков. Количество и расположение опознаков выбирается так, чтобы обеспечить заданную точность фототриангуляции. Для расчета расстояний между опознаками используют формулы СКО определения планового положения  $m_L$  и  $m_h$  из фототриангуляции. Например,  $m_L = \frac{H}{8f} \sqrt{n^3 + 2n} \cdot m_{pq}$  в зависимости от точности создания карты

$m_h = \frac{H}{8b} \sqrt{n^3 + 2n} \cdot m_{pq}$  в зависимости от точности создания карты

вычисляем  $n_L$  – расстояние между плановыми опознаками

$n_h$  – расстояние между высотными опознаками

$m_{pq}$  – зависит от прибора (0,01-0,02 мм)

Но как правило высотные и плановые опознаки совмещают, после разметки их по всему блоку определяют их геодезические координаты в поле.

Точность определения координат опознаков должна быть в два 2,5 раза выше точности определения координат точек из ПФТ.

В результате планово-высотного обоснования получим:

- схема расположения опознаков на репродукции накидного монтажа
- снимки с наколами опознаков и абрисами расположения опознаков
- каталог геодезических координат опознаков

В районах, где невозможно обеспечить опознавание характерных точек местности, планируют маркировку опознаков. При выборе способа маркировки стремятся, чтобы затраты на сооружение маркировочного знака были мин. Но размер, форма и цвет должны обеспечивать их надежное опознавание.

В настоящее время практически всегда в качестве опознаков выбирают контура на местности.

#### *Полевое и камеральное дешифрирование*

Дешифрирование снимков заключается в распознавании объектов местности на снимках, установлении их численных и качественных характеристик и в вычерчивании их на снимках в условных знаках.

Как правило, стараются сочетать камеральное дешифрирование с полевым. При камеральном дешифрировании отображаются все уверенно распознаваемые объекты и отмечаются места, где необходимо полевое дешифрирование. Сплошное полевое дешифрирование применяется в крупномасштабном картографировании (много объектов таких как ЛЭП, столбы, колодцы и др.), а также может быть эталоном: на снимках выбираются характерные участки и выполняется их сплошное полевое дешифрирование, потом они используются при автоматизированном дешифрировании.

#### *Сканирование аэроснимков*

Чтобы преобразовать аналоговое изображение в цифровое нужно выполнить его сканирование. Суть сканирования заключается в следующем: световой луч ограниченного размера, отражается от изображения и это отраженное излучение фиксируется как яркость изображения в цифровой форме. Движение лампы осуществляется по двум осям ху. Чем меньше размер светового луча, тем меньше размер пиксела, а соответственно их больше, но и объем информации увеличится.

На цифровых изображениях координаты измеряются в пикселах, а значит точность измерений будет зависеть от размера пиксела. Размер пиксела – разрешающая способность цифрового изображения.

Кроме размера пиксела на точность влияют ошибки сканирования, которые зависят от прямолинейности и взаимной перпендикулярности, а также точности позиционирования (время фиксации между двумя соседними пикселями).

При высокоточных работах эти ошибки могут быть учтены путем эталонирования сканера. Суть которого в следующем: сканируют высокоточную контрольную сетку, координаты крестов этой сетки известны, изображение сетки выводят на экран монитора и выполняют измерения координат узлов. Разница координат цифрового и аналогового изображения дает величину ошибки вносимой сканером.

#### *Фотограмметрическое сгущение на ЦФС*

В основе пространственной фототриангуляции (ПФТ) – идея построения модели по группе снимков, принадлежащих одному или нескольким маршрутам. Это позволит использовать минимальное число опорных точек, что приведет к снижению затрат на полевые работы.

#### *Построение блочных сетей фототриангуляции методом связок*

Наиболее строгим методом построения блочных сетей пространственной фототриангуляции аналитическим и цифровым способами по сравнению с методом независимых моделей является метод связок. В основе метода связок лежат уравнения коллинеарности проектирующих лучей:

$$x - x_0 = -f \frac{X^*}{Z^*}$$



$$y - y_0 = -f \frac{Y^*}{Z^*}$$

$$\left. \begin{aligned} X^* &= a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s) \\ Y^* &= a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s) \\ Z^* &= a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s) \end{aligned} \right\}$$

В уравнении будут известны  $f, x_0, y_0, x, y$ . Неизвестны элементы внешнего ориентирования снимков  $X_s, Y_s, Z_s, \alpha, \omega, \kappa$ , а также  $X, Y, Z$  – координаты точек сети ПФТ.

Достоинством метода связок является то, что сеть строится и уравнивается одновременно для всех точек, входящих в блок, а также поправки находятся непосредственно к измеренным величинам, что обеспечивает более высокую точность построения сети. Недостатками этого метода являются: сложность задания приближённых значений неизвестных (для решения этой проблемы можно предварительно уравнивать сеть менее строгим методом, а её результаты использовать в качестве приближённых значений), должны отсутствовать грубые ошибки, должны быть исключены систематические ошибки (или сведены к минимуму).

#### *Создание цифровых фотопланов на ЦФС*

Существуют два основных способа трансформирования:

- снимки исправляются только за угол наклона и приводятся к заданному масштабу;
- снимки исправляются за угол наклона, приводятся к заданному масштабу и исправляются за влияние рельефа.

Теоретически первый способ применим, когда местность плоская и горизонтальная. В действительности такой местности не бывает и практически первый способ применим, когда смещение точек за рельеф не превышает заданного допуска.

Например,  $\delta r_h < 0.3 \text{ мм}$  в масштабе карты. Так как масштаб аэроснимков как правило в 2-3 раза мельче масштаба карты, следовательно допуск на снимке должен быть меньше в

$$k = \frac{m}{M}$$

раз. Если смещение за рельеф превышает допуск, то выполняют ортотрансформирование.

Способы трансформирования:

- по установочным элементам
- по опорным точкам
- цифровой

Способы ортотрансформирования:

- по зонам
- цифровой

Цифровые снимки получают, либо цифровой камерой, либо сканируют снимки, полученные аналоговым способом.

Цифровая камера имеет конструкцию аналогичную фотокамере, только в плоскости прикладной рамки находится матрица ПЗС. Эта матрица состоит из микроэлементов принимающих световую энергию. Далее световая энергия преобразуется в цифровой код. *Цифровое изображение* – это матрица чисел, каждый элемент которой соответствует значению яркости объекта на местности.

Чтобы преобразовать аналоговое изображение в цифровое нужно выполнить его сканирование. Суть сканирования заключается в следующем: световой луч ограниченного размера, отражается от изображения и это отраженное излучение фиксируется как яркость изображения в цифровой форме. Движение лампы осуществляется по двум осям  $x, y$ . Чем меньше размер светового луча, тем меньше размер пиксела, а соответственно их больше, но и объем информации увеличится.

На цифровых изображениях координаты измеряются в пикселах, а значит точность измерений будет зависеть от размера пиксела. Размер пиксела – разрешающая способность цифрового изображения.

#### *Цифровые модели рельефа*

Цифровая модель рельефа (ЦМР) – это метрическая информация о поверхности земли и правила обращения с этой информацией.

При построении ЦМР должна быть обеспечена заданная точность моделирования рельефа в зависимости от назначения ЦМР. Точность построения зависит от плотности и расположения исходных точек, размера элементарного участка моделирования, используемых алгоритмов для построения ЦМР, а также от точности определения высот исходных точек.

#### *Ортотрансформирование снимков*

При ортотрансформировании снимков происходит исправления снимков за угол наклона, за рельеф и приведение к заданному масштабу.

Ортотрансформирование выполняется если смещение точек за рельеф на трансформированном снимке масштаба  $\frac{1}{t}$  будет превышать допустимое значение

$$\delta r_h = \frac{rhm}{Ht} > \delta r_{h_{доп}}.$$

Правила проведения порезов:

- Области трансформирования должны находиться как можно ближе к главной точке снимка (вблизи его геометрического центра).
- Порезы не должны пересекать объекты, возвышающиеся над рельефом (мосты, здания, опоры ЛЭП и т.п.).
- Порезы не должны проходить по границе протяжённых объектов, отличающихся по яркости от основного фона (кромка леса, дорога и т.п.).

Сбор информации о рельефе

- Определяются отметки характерных точек, которые должны быть подписаны на плане (карте);
- Выполняется рисовка горизонталей;
- Определяются численные характеристики элементов рельефа;

Сбор информации о контурах

- В соответствии с требованиями к масштабу;
- В стереорежиме или по ортофотоплану;
- Цифровая информация собирается по слоям;
- Одновременно с метрической информацией выполняется сбор семантической информации;
- Обязательно используется классификатор;

Содержание и качество цифровых топографических карт определяется показателями:

- Полнота информации;
- Точность;
- Правильность идентификации объектов;
- Логическая согласованность структуры и представления объектов;
- Согласование информации.

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Сибирская Государственная Геодезическая Академия»  
(ФГБОУ ВПО «СГГА»)

Кафедра фотограмметрии и дистанционного зондирования

## **КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ**

по дисциплине «Дистанционное зондирование и фотограмметрия»

для студентов 3 курса направление подготовки

120100 Геодезия и дистанционное зондирование

(осенний семестр)

Новосибирск  
СГГА  
2013

## Содержание

### **9. Наземная фотограмметрия**

#### *9.1 Понятие и особенности наземной фотограмметрии*

Фотографические и цифровые съёмочные камеры. Особенности обработки наземных снимков и стереопар. Точность наземной стереофотограмметрической съёмки. Методы полевых работ.

#### *9.2. Фотограмметрическая калибровка съёмочных камер*

Калибровка неметрических цифровых съёмочных камер.

### **10. Цифровая обработка и дешифрирование аэрокосмических снимков**

#### *10.1 Цифровая обработка изображений.*

Фильтрация, изменение контраста изображений и другие алгоритмы улучшения качества изображения.

#### *10.2 Топографическое дешифрирование. Дешифровочные признаки.*

Понятие о дешифрировании снимков. Классификация видов дешифрирования снимков. Дешифровочные признаки.

#### *10.3 Полнота, достоверность, точность дешифрирования.*

Параметры оценки качества дешифрирования аэрокосмических снимков.

#### *10.4 Автоматизированные методы дешифрирования снимков.*

Кластерный анализ. Классификация с обучением. Обзор методов тематической обработки космических снимков.

## 9. Наземная фотограмметрия

### 9.1 Понятие и особенности наземной фотограмметрии

*Фотографические и цифровые съёмочные камеры. Особенности обработки наземных снимков и стереопар. Точность наземной стереофотограмметрической съёмки. Методы полевых работ.*

#### *Области применения наземной фотограмметрии*

Наземная фотограмметрия — это один из разделов фотограмметрии, в котором изучаются методы получения и фотограмметрической обработки изображений объектов, получаемых съёмочными системами с точек земной поверхности.

Методами наземной фотограмметрии решаются различные задачи в архитектуре, строительстве, горном деле, машиностроении, судостроении, криминалистике, медицине и других областях науки и производства.

Примеры некоторых областей применения наземной фотограмметрии:

- Применение для создания обмерных чертежей архитектурных сооружений и документации дорожных происшествий
- Применение для автомобилестроения
- Применение в судостроении
- Применение в археологии
- Применение в медицине. Стереопара рентгеновских снимков легкого

#### *Фотографические и цифровые съёмочные камеры.*

В настоящее время в наземной фотограмметрии в основном используют только цифровые фотокамеры.

Для выполнения наземных фотограмметрических съёмок созданы метрические цифровые камеры. В этих камерах, как правило, объектив и светоприёмная матрица жестко укреплены на корпусе камеры, обеспечивая, таким образом, постоянство элементов внутреннего ориентирования камеры. Элементы внутреннего ориентирования этих камер, включая параметры фотограмметрической дисторсии определяют на заводе-изготовителе. Примером такой камеры является Trimble Aerial Camera фирмы Trimble. Эта камера выпускается со светоприёмной матрицей 60 или 80 мегапикселей и объективами с фокусными расстояниями 35 мм, 50 мм, 80мм и 100 мм.

Помимо метрических камер для фотограмметрических работ можно использовать любительские и профессиональные цифровые съёмочные камеры. Эти камеры должны быть предварительно подвергнуты процедуре фотограмметрической калибровки, в результате которой определяются элементы внутреннего ориентирования камеры, включая параметры фотограмметрической дисторсии объектива съёмочной камеры.

В настоящее время для наземной фотограмметрической съёмки в зависимости от требуемой точности фотограмметрических определений, размера снимаемого объекта и расстояния до него используются различные типы профессиональных и любительских цифровых фотокамер. В качестве примера можно привести достаточно дорогостоящие цифровые фотокамеры Hasselblad H4D с фотоприёмной матрицей от 16 до 60 мегапикселей и Canon EOS 5D с матрицей 21,1 мегапикселя и относительно дешёвую цифровую видеокамеру с матрицей 640 пикс. x 480 пикс.

В наземной фотограмметрии используют также стереофотограмметрические камеры. Эти камеры представляют собой две идентичные съёмочные камеры, жестко установленные параллельно друг другу на некотором базисе, таким образом, чтобы оптические оси этих камер были перпендикулярны к базису. В результате фотограмметрической калибровки стереофотограмметрических камер определяют не только элементы внутреннего ориентирования съёмочных камер, но и элементы их внешнего ориентирования в предварительно заданной системе координат стереофотограмметрической камеры, например, в системе координат левой камеры.

В этом случае при фотограмметрической обработке снимков, полученных стереофотограмметрической камерой, координаты точек сфотографированного объекта можно получить в системе координат стереофотограмметрической камеры по формулам прямой фотограмметрической засечки.

*Особенности обработки наземных снимков и стереопар*

Теоретические положения, рассмотренные для пары аэрофотоснимков, будут справедливы для любых снимков в том числе для снимков НСС.

Особенности НСС и отличия ее от аэрофотосъемки заключается в следующем:

1. Главный луч как правило горизонтален или расположен близко к горизонтальному
2. Съемка выполняется с неподвижной точки, поэтому элементы внешнего ориентирования можно определить с любой заданной точностью
3. Съемка выполняется с неподвижной точки, поэтому выдержка при фотографировании может быть любой, что позволит получить изображения высокого качества. Кроме того нет влияния вибрации и смаза изображения.

В формулах, полученных для пары аэрофотоснимков при обработке снимков НСС надо заменить  $Y$  на  $Z$ , а  $Z$  на  $Y$ . Тогда основные формулы, используемые для пары аэрофотоснимков и снимков НСС, будут следующие.

Как видно из приведенных формул, при вычислении  $Y$  по снимкам НСС « - » меняется на « + », т.к. при обработке снимка НСС направление главного луча и оси  $Y$  совпадают, а при обработке аэрофотосъемков направление оси  $Z$  и главного луча  $S_0$  противоположны.

*Достоинством НСС* является то, что при обработке снимков можно определить координаты точек модели с высокой точностью, даже точнее, чем при построении модели по аэрофотоснимкам. Это достигается за счет следующего:

-при выполнении НСС с неподвижного базиса ЭВО снимков  $X_s, Y_s, Z_s, \alpha, \omega, \kappa$  можно задать или определить при самой съемке с заданной точностью. При обработке аэрофотоснимков их ЭВО, как правило, определяют в камеральных условиях фотограмметрическим методом, т.е. в процессе обработке снимков с ограниченной точностью;

-разрешающая способность снимков НСС выше, чем аэрофотоснимков. Разрешающая способность любых снимков обеспечивается разрешающей способностью объектива и фотоматериала. Аэрофотосъемка выполняется с подвижного базиса с очень короткой выдержкой, следовательно, объектив должен иметь при аэрофотосъемке большую светосилу, а, значит, ниже разрешающую способность. НСС можно выполнять с любой выдержкой и объектив может использоваться с большой разрешающей способностью.

Для аэрофотоснимков	Для снимков НСС
Формулы прямой фотограмметрической засечки	
$X = NX'_1$ $Y = NY'_1$ $Z = NZ'_1$ $N = \frac{B_x Z'_2 - B_z X'_2}{X'_1 Z'_2 - Z'_1 X'_2}$	$X = NX'_1$ $Y = NY'_1$ $Z = NZ'_1$ $N = \frac{B_x Y'_2 - B_y X'_2}{X'_1 Y'_2 - Y'_1 X'_2}$

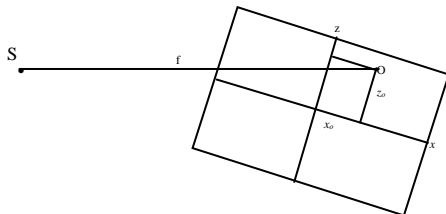
$X = Nx_1^0$ $Y = Ny_1^0$ $Z = -Nf$ $N = \frac{B_x + B_z \frac{x_2^0}{f}}{p^0}$	$X = Nx_1^0$ $Y = Nf$ $Z = Nz_1^0$ $N = \frac{B_x - B_y \frac{x_2^0}{f}}{p^0}$
Формулы трансформированных координат точек снимков	
$x^0 = -f \frac{X'}{Z'}$ $y^0 = -f \frac{Y'}{Z'}$	$x^0 = f \frac{X'}{Y'}$ $z^0 = f \frac{Z'}{Y'}$

*Недостатком НСС* является малая производительность труда, т.к. каждый снимок НСС охватывает малую площадь снимаемых объектов (масштаб снимков НСС крупнее, чем аэрофотоснимков). Кроме того, перемещение от одной станции к другой при съемке требует много времени. Из-за этого недостатка создание карт по снимкам НСС производилось как исключение и обычно в горной местности, где большой перепад высот точек местности, в результате чего возникают «мертвые зоны» при аэрофотосъемке. На эти участки местности карты создавались по снимкам НСС. Основное применение снимков НСС – это решение различных инженерных задач (определение объема выработок горных пород, изучение движения оползней и ледников, реконструкция памятников архитектуры и т.д.).

#### *Элементы ориентирования снимков НСС*

Сущность элементов ориентирования снимка НСС такая же, как аэрофотоснимка. Они делятся на ЭВО и ЭВО.

К ЭВО снимка НСС относятся:  $f, x_o, z_o$ .



#### *Элементы внутреннего ориентирования снимка НСС*

ЭВО позволяют восстановить связь проектирующих лучей.

ЭВО снимка НСС, как и аэрофотоснимка – шесть. Линейными ЭВО снимка являются  $X_s, Y_s, Z_s$  – координаты точки фотографирования, угловыми ЭВО снимка являются  $\alpha, \omega, \kappa$ , характеризующие поворот осей плоской системы координат точек снимка относительно осей внешней системы координат.

6 ЭВО снимка:

$X_{\Gamma_s}, Y_{\Gamma_s}, Z_{\Gamma_s}$  – геодезические координаты точки S;

$\alpha$  – дирекционный угол оптической оси камеры – угол между осью  $X_{\Gamma}$  и горизонтальным проложением главного луча  $So$  (проекцией главного луча  $So$  на плоскость  $X_{\Gamma}, Y_{\Gamma}$ );

$\omega$  – угол наклона снимка НСС – угол между главным лучом  $So$  и его горизонтальным проложением;

$\kappa$  – угол разворота снимка НСС – угол между осью  $x$  и следом плоскости  $So Y'_r$  на снимке.

При обработке снимков НСС фотограмметрическая СК выбирается следующим образом: если снимки общего случая съёмки (произвольные элементы ВО снимков), то начало фотограмметрической системы выбирают в точке  $S_l$ , а ось  $Y$  совмещают с проекцией главного луча  $S_1O_1$  на плоскость  $X'_r Y'_r$ . Ось  $Z$  выбирается отвесно.

В отличие от аэрофотосъёмки ЭВО снимков НСС, как правило, задаются или определяются непосредственно в процессе самой съёмки и известны на момент камеральной обработки снимков.

### *Виды (случаи) съёмки при НСС*

При НСС с использованием фототеодолитов на практике реализуются следующие основные виды (случаи) съёмки:

- нормальный;
- параллельный;
- конвергентный.

Во всех этих видах съёмки камера устанавливается по уровням, а направления главных лучей задаются с помощью ориентирного устройства, тогда  $\omega_1 = \kappa_1 = 0, \omega_2 = \kappa_2 = 0$  и  $\alpha_1 = 0$  (в фотограмметрической системе координат). Эти виды съёмки отличаются только направлениями главных лучей.

*Нормальный случай съёмки* При нормальном случае съёмки:

$$\alpha_1 = \alpha_2 = 0 \text{ (в фотограмметрической системе координат),}$$

$$\omega_1 = \kappa_1 = 0,$$

$$\omega_2 = \kappa_2 = 0,$$

$$\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi = 90^\circ.$$

*Параллельный случай съёмки* Для большего захвата объектов съёмки на станции, кроме нормального случая, производят съёмку параллельного случая, когда направления оптической оси будут параллельны между собой в левой и правой точках фотографирования. При этом выполняется параллельный случай съёмки со скосом влево, когда главные лучи отклонены влево от перпендикуляра к базису фотографирования, или параллельный случай съёмки со скосом вправо (рис. 2.8), когда главные лучи отклоняются вправо от перпендикуляра к базису фотографирования.

При параллельном случае съёмки:

$$\alpha_1 = \alpha_2 = 0,$$

$$\omega_1 = \alpha_1 = 0,$$

$$\omega_2 = \kappa_2 = 0,$$

$$\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi.$$

*Конвергентный случай съёмки.* В том случае, когда объект съёмки находится вблизи точек фотографирования, выполняется конвергентный случай съёмки.

При конвергентном случае съёмки:

$$\alpha_1 = 0 \text{ (в фотограмметрической системе),}$$

$$\alpha_2 = -\gamma \text{ (угол конвергенции),}$$

$$\omega_1 = \kappa_1 = 0,$$

$$\omega_2 = \kappa_2 = 0,$$

$$\varphi_1 \neq \varphi_2.$$

В том случае, когда при НСС невозможно ориентировать съёмочную камеру, используется общий случай съёмки, при котором ЭВО снимков  $\alpha, \omega, \kappa$  левого и правого снимков не равны нулю. Для обработки снимков общего случая съёмки выполняются те же основные процессы, как при обработке аэрофотоснимков с целью построения модели местности:



- определяются ЭВЗО снимков;
- вычисляются фотограмметрические координаты точек модели;
- выполняется ее внешнее ориентирование.

В результате будут получены координаты точек модели во внешней системе координат. Отличие обработки снимков НСС общего случая съемки от обработки аэрофотоснимков состоит в том, что координаты  $X_S, Y_S, Z_S$  определяются в процессе полевых работ, также измеряется и базис фотографирования, т.е.  $X_S, Y_S, Z_S$  будут известны из самой съемки в отличие от аэрофотосъемки.

*Методы полевых работ. Точность наземной стереофотограмметрической съёмки.*

При НСС основными технологическими процессами являются:

1. Изучение объекта и рекогносцировка.
2. Расчет базиса фотографирования.
3. Геодезические работы на станции:
  - определение координат точки  $S$ ;
  - измерение базиса фотографирования;
  - определение дирекционного угла базиса;
  - определение координат контрольных точек.
4. Съёмка.

Рекогносцировка местности заключается в уточнении рабочего проекта НСС, а именно в окончательном выборе точек фотографирования (станций) и контрольных точек, геодезические координаты которых необходимы для учета ошибок угловых элементов внешнего ориентирования снимков.

Геодезические работы при НСС.

При НСС элементы внешнего ориентирования снимков либо задаются, либо определяются с заданной точностью. Угловые элементы внешнего ориентирования снимков  $\omega, \kappa$  задаются с помощью уровней равными нулю (для нормального и параллельного случаев съемки), а  $\alpha$  устанавливается ориентирным устройством в зависимости от случая съемки. Линейные элементы внешнего ориентирования снимков при НСС определяют с помощью традиционных геодезических методов или с использованием GPS- приемников, позволяющих получать координаты точек земной поверхности с высокой точностью. Таким образом, на момент обработки снимков НСС будут известны: координаты  $X_{S_1}, Y_{S_1}, Z_{S_1}$  левой точки фотографирования в геодезической системе координат; величина базиса фотографирования; дирекционный угол базиса фотографирования  $A$ , превышение точки  $S_2$  над точкой  $S_1$ . При выполнении геодезических работ при НСС также определяют геодезические координаты контрольных точек Фотографирование местности при НСС.

## **9.2. Фотограмметрическая калибровка съёмочных камер**

*Калибровка неметрических цифровых съёмочных камер.*

Для того, чтобы использовать неметрический цифровой фотоаппарат для решения измерительных задач, необходимо определить его элементы внутреннего ориентирования и коэффициенты дисторсии. Эта задача решается в процессе калибровки фотоаппаратов.

Основное назначение неметрических цифровых камер в фотограмметрии – построение трёхмерных моделей объектов посредством наземной фотосъёмки. Этот метод фотосъемки по сравнению с другими методами, такими, как, наземное лазерное сканирование, фасадная съемка с помощью электронных тахеометров, является наиболее доступным, поскольку не требует применения дорогостоящего оборудования, и при этом позволяет построить модель объекта с заданной точностью.

Для проведения наземной фотосъемки достаточно иметь откалиброванный цифровой фотоаппарат, компьютер и специальное программное обеспечение. Перед съемкой необходимо определить количество станций и их расположение, чтобы снять

объект при минимальном количестве точек фотографирования и обеспечить заданную точность. Фотосъемка высоких объектов выполняется:

- а) с вертикальных базисов фотографирования;
- б) с наклоном оптических осей

В настоящее время проводится множество работ по реставрации, реконструкции и охране исторических памятников с использованием снимков, полученных неметрическими цифровыми камерами.

Фотограмметрическая калибровка цифровых съемочных камер выполняется с целью определения значений элементов внутреннего ориентирования съемочных камер, включая параметры фотограмметрической дисторсии объектива съемочной камеры.

Поправки  $dx$  и  $dy$  в координаты измеренных на снимке точек, компенсирующие влияние фотограмметрической дисторсии объектива съемочной камеры, в общем случае описываются различными уравнениями. Наиболее широко используются формулы Брауна.

$$\left. \begin{aligned} d_x &= x(r^2 k_1 + r^4 k_2 + r^6 k_3) + (r^2 + 2x^2)p_1 + 2xyp_2 \\ d_y &= y(r^2 k_1 + r^4 k_2 + r^6 k_3) + (r^2 + 2y^2)p_2 + 2xyp_1 \end{aligned} \right\}$$

где

$x, y$  – координаты точек снимка

$k_1, k_2, k_3$  – коэффициенты радиальной дисторсии

$p_1, p_2$  – коэффициенты тангенциальной дисторсии

$$r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$$

Для калибровки используются тест-объекты: пространственные и плоские.

Тест-объект представляет собой пространственное поле маркированных точек. Точки (марки) тест-объекта должны быть выполнены в виде четких геометрических фигур, обеспечивающих максимальную точность наведения измерительной марки цифровой фотограмметрической системы при измерении координат их изображений на снимках в интерактивном и автоматическом режимах.

## **10. Цифровая обработка и дешифрирование аэрокосмических снимков**

### **10.1 Цифровая обработка изображений.**

*Фильтрация, изменение контраста изображений и другие алгоритмы улучшения качества изображения.*

Яркостные преобразования изображений выполняются с целью улучшения его визуального восприятия, выделения дешифровочных признаков и др. Наиболее часто используемые преобразования: изменение контраста, псевдораскрашивание, формирование ложных цветов, устранение шумов и подчеркивание границ.

Псевдоцветное раскрашивание выполняется для улучшения визуального восприятия черно-белого изображения. Для выполнения такой операции весь диапазон яркостей изображения разбивают на несколько диапазонов и каждому присваивают соответственный цвет.

Главная цель улучшения заключается в такой обработке изображений, чтобы результат оказался более подходящим с точки зрения конкретного применения. Так, например, метод, являющийся весьма полезным для улучшения рентгеновских снимков, не обязательно окажется наилучшим для обработки спутниковых снимков земной поверхности.

Методы обработки изображений подразделяются на 2 большие категории:

1) методы обработки в пространственной области (пространственные методы). Термин «пространственная область» относится к плоскости изображения как таковой, и данная категория объединяет подходы, основанные на прямом манипулировании пикселями изображения;

2) методы обработки в частотной области (частотные методы), которые основываются на модификации сигнала, формируемого путём применения к изображению преобразования Фурье.

Существуют также технологии, базирующиеся на различных комбинациях методов из этих двух категорий.

Пространственные методы

1) Функции градиционного преобразования — простейшая форма оператора  $T$ , когда окрестность имеет размер  $1 \times 1$  (т.е. 1 пиксель). Поскольку результат улучшения каждого элемента изображения зависит только от яркости этого же элемента, методы данной категории относятся к процедурам поэлементной обработки.

2) Фильтрация по маске. Увеличение размеров окрестности точки приводит к большей гибкости преобразования. Принцип действия заключается в том, что для нахождения значения функции  $g$  внутри некоторой окрестности  $(x, y)$  используются значения функции  $f$  внутри некоторой окрестности заданной формы, окружающей точку  $(x, y)$ . Как правило, маска представляет собой небольшой ( $3 \times 3$ ,  $5 \times 5$  элементов) двумерный массив (матрицу), значения элементов которого определяют сущность процесса (подавление шумов, повышение контрастности, подчёркивание границ и т.п.). Значения элементов этой матрицы называются коэффициентами.

Процесс пространственной фильтрации основан на простом перемещении маски фильтра от точки к точке; в каждой точке отклик фильтра вычисляется с использованием предварительно заданных связей.

Процедура линейной фильтрации аналогична операции свёртки.

Фильтрация изображения  $f$  размером  $M \times N$  с помощью фильтра размером  $m \times n$  задаётся выражением общего вида:

$$g(x, y) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w(i, j) f(x+i, y+j).$$

При фильтрации всего изображения данная формула должна быть вычислена для всех сочетаний  $x = 0, 1, 2, \dots, M-1$  и  $y = 0, 1, 2, \dots, N-1$ .

В общем виде значение отклика фильтра вычисляется по формуле:

$$R = w_1 z_1 + w_2 z_2 + \dots + w_{mn} z_{mn} = \sum_{i=1}^{mn} w_i z_i,$$

где  $w_i$  — коэффициенты маски,

$z_i$  — значения пикселей, соответствующих данным коэффициентам;

$mn$  — общее число коэффициентов в маске.

Фильтрация по маске:

1) сглаживающие пространственные фильтры:

а) низкочастотная фильтрация.

Отклик простейшего линейного сглаживающего пространственного фильтра есть среднее значение элементов по окрестности, покрытой маской фильтра. Такие фильтры называют усредняющими, сглаживающими или низкочастотными. Идея применения низкочастотных фильтров заключается в том, что с помощью замены исходных значений элементов изображения на средние значения по маске фильтра достигается уменьшение резких переходов уровней яркости. Такие фильтры используют для подавления случайных шумов. Отрицательной стороной использования таких фильтров является расфокусировка контуров (что, однако, может быть использовано как специальный приём в художественной обработке изображений). Главное использование сглаживающих фильтров состоит в подавлении несущественных деталей на изображении, под к-рыми понимаются совокупности пикселей, к-рые малы по сравнению с размерами маски фильтра. Отклик в общем виде вычисляется как:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w(i, j) f(x+i, y+j)}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w(i, j)}.$$

Примеры масок:

$$\frac{1}{9} \times \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}$$

— обычное среднее значение по маске. Это однородный усредняющий фильтр.

$$\frac{1}{16} \times \begin{vmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{vmatrix}$$

— средневзвешенное значение. Используется для уменьшения расфокусировки при сглаживании.

б) медианная фильтрация. Этот фильтр заменяет значение пикселя на значение медианы распределения яркостей всех пикселей в окрестности, включая исходный. Медианные фильтры весьма популярны потому, что для определённых типов случайных шумов они могут подавлять шумы при значительно меньшей расфокусировке, чем у линейных сглаживающих фильтров с аналогичными размерами. Эффективны при фильтрации импульсных шумов, к-рые выглядят как наложение на снимок случайных чёрных и белых точек.

Медиана набора чисел есть такое число  $\xi$ , что половина из набора чисел меньше или равны  $\xi$ , а другая половина — больше или равны  $\xi$ . Чтобы выполнить медианную фильтрацию для элемента изображения, надо сначала упорядочить по возрастанию значения пикселей внутри окрестности, затем найти значение медианы, и, наконец, присвоить полученное значение обрабатываемому элементу.

2) фильтры повышения резкости. Такие фильтры используются для того, чтобы подчеркнуть мелкие детали изображения или улучшить те детали, которые оказались расфокусированы вследствие ошибок или несовершенства метода съёмки. Очевидно, что, поскольку усреднение, которое приводит к сглаживанию и расфокусировке изображения, аналогично интегрированию, то обратное действие — повышение резкости — будет аналогично дифференцированию.

а) нерезкое маскирование и высокочастотная фильтрация. Эта фильтрация заключается в вычитании из изображения его расфокусированной копии:

$$f_s(x, y) = f(x, y) - \bar{f}(x, y),$$

где  $f(x, y)$  — исходное изображение;

$\bar{f}(x, y)$  — его расфокусированная копия;

$f_s(x, y)$  — изображение с повышенной резкостью.

Высокочастотная фильтрация является обобщением нерезкого маскирования.

Процедура задаётся формулой:

$$f_{hb}(x, y) = Af(x, y) - \bar{f}(x, y),$$

где  $A \geq 1$ .

Это уравнение можно записать в виде:

$$f_{hb}(x, y) = (A-1)f(x, y) + f(x, y) - \bar{f}(x, y).$$

Тогда:

$$f_{hb}(x, y) = (A-1)f(x, y) + f_s(x, y).$$

б) лапласиан. Это простейший изотропный фильтр (фильтр, отклик к-рого не зависит от направления неоднородностей на обрабатываемом изображении). В случае функции 2х переменных оператор Лапласа определяется как:

$$\text{grad}^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}.$$

В дискретном виде:

1я производная:

$$\frac{\partial f}{\partial x} = f(x+1) - f(x),$$

2я производная:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = f(x+1) + f(x-1) - 2f(x).$$

Поскольку изображение есть функция 2х переменных, то вторые частные производные будут иметь вид:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = f(x+1, y) + f(x-1, y) - 2f(x, y),$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial y^2} = f(x, y+1) + f(x, y-1) - 2f(x, y).$$

Тогда полная вторая производная:

$$\text{grad}^2 f = [f(x+1, y) + f(x-1, y) + f(x, y+1) + f(x, y-1)] - 4f(x, y).$$

Примеры:

$$1) \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}, \quad 2) \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -8 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}, \quad 3) \begin{vmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{vmatrix}, \quad 4) \begin{vmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{vmatrix}.$$

Различие в знаке должно учитываться при комбинации изображения, отфильтрованного лапласианом, с исходным изображением. Таким образом, обобщённый алгоритм использования лапласиана сводится к следующему:

$$g(x, y) = \begin{cases} f(x, y) - \text{grad}^2 f(x, y), & \text{если } w(0,0) < 0 \\ f(x, y) + \text{grad}^2 f(x, y), & \text{если } w(0,0) > 0 \end{cases}.$$

в) фильтр Робертса и фильтр Собела.

В основе следующих двух фильтров лежит использование первых производных. В обработке изображений первые производные находят через модуль градиента. Для функции  $f(x, y)$  градиент в точке  $(x, y)$  определяется как двумерный вектор-столбец:

$$\text{grad}f = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix}.$$

Модуль этого вектора определяется как:

$$\text{grad}f = |\text{grad}f| = \sqrt{[G_x]^2 + [G_y]^2} = \sqrt{\left[\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2\right]}.$$

На практике, как правило, используют приближённую формулу:

$$\text{grad}f \approx |G_x| + |G_y|.$$

Аналогично лапласиану, первоначально будут определены дискретные приближения приведённых выше уравнений, а затем по ним будут сформированы соответствующие маски фильтров.

Для маски размером 3×3 фильтр Робертса будет иметь вид:

$$gradf \approx |(z_7 + 2z_8 + z_9) - (z_1 + 2z_2 + z_3)| + |(z_3 + 2z_6 + z_9) - (z_1 + 2z_4 + z_7)|.$$

Очевидно, что по этой формуле вычисляется значение для точки  $z_5$ .

Фильтр Собела используется для того, чтобы достичь большей гладкости изображения за счёт того, что центральным точкам строк и столбцом присвоены большие весовые коэффициенты:

$$\begin{vmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{vmatrix}, \quad \begin{vmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

Эти маски используют для реализации вышеприведённого уравнения с использованием общего алгоритма фильтрации:

$$g(x, y) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w(i, j) f(x+i, y+j).$$

Индексные изображения

Для выделения объектов определённых классов (растительности, водных объектов, почвы и т.д.) по многозональным изображениям формируют индексные изображения.

Получение индексных изображений основано на выборе каналов, для которых изображения заданного объекта имеют максимальные различия яркостей. По такому принципу построены индексы NDVI, NDWI, SAVI и другие.

Приведем наиболее популярные индексные изображения.

В настоящее время существует множество способов вычисления различных индексных изображений. Например, в ENVI 18 вегетационных индексов.

Индекс растительности NDVI вычисляется следующим образом:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED},$$

где  $NIR$  – яркость элемента многоспектрального изображения в ближнем ИК канале;

$RED$  – яркость элемента в красном канале.

В результате получаются изображения  $P_{NDVI}(x, y)$ , элементы которого  $p(x, y)$  – значения коэффициентов NDVI, вычисляемые по значениям элементов  $p_{Red}(x, y)$  и  $p_{NIR}(x, y)$  – в красном и ИК каналах соответственно.

Так как значения NDVI для изображения растительности значительно больше, чем для других объектов, то растительность будет существенно отличаться на индексном изображении NDVI.

Значениям коэффициентов NDVI можно приписать различные цвета с изменяющейся интенсивностью. В результате индексное изображение будет отображаться в виде псевдоцветного изображения. Определённый цвет будет соответствовать определённому объекту, а интенсивность будет отражать свойства объектов.

Разностный вегетационный индекс (DVI) определяется по формуле:

$$DVI = NIR - RED.$$

Водный индекс NDWI, вычисляемый как:

$$NDWI = \frac{NIR - GREN}{NIR + GREN},$$

где  $GREN$  – яркость элемента в зеленом канале.

Почвенный вегетационный индекс ( $SAVI$ ) вычисляется по формуле:

$$SAVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED + L} (1 + L),$$

где  $L = [0;1]$  и зависит от степени «облиствения».

Кроме вышеописанных, существует много других индексов:

Pan-sharpening – это процедура объединения изображения в панхроматическом канале и многоспектральных таким образом, что в результате получается многоспектральное изображение с высоким разрешением панхроматического канала.

Существует много методов слияния изображений: IHS, на основе метода главных компонент (PCA), на основе вейвлет-анализа, Gram-Schmidt (GS) spectral sharpening, Brovey Transform и др.

IHS (Intensity-Hue-Saturation) – это методы, основанные на преобразовании цветного изображения RGB в IHS, где канал I заменяется на изображение в панхроматическом канале. Данное преобразование выполняется в соответствии со следующей формулой:

$$\begin{bmatrix} I \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ -\sqrt{2} & -\sqrt{2} & 2\sqrt{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{-1}{\sqrt{2}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}.$$

Однако этот метод приводит к некоторым искажениям цвета относительно исходного мультиспектрального изображения.

Основным недостатком методов слияния изображений являются искажения при передаче цвета в преобразованном изображении, что не позволяет использовать такие изображения, как полноценные многоспектральные.

Преобразование изображения по методу главных компонент

Преобразование изображения по методу главных компонент основано на формировании из исходного многоспектрального изображения новых преобразованных изображений, некоррелированных между собой.

Сущность метода главных компонент заключается в том, что исходные спектральные яркости элементов изображения  $\bar{P}^T = (p_{ij}^I, p_{ij}^II \dots p_{ij}^k)$  преобразуются в новый

вектор  $\bar{P}_{ij}'$ , элементы которого являются статистически независимыми. Для этого находится ортогональный базис, и яркости исходного изображения преобразуются в соответствии с выбранным базисом. Значения элементов нового изображения будут являться проекцией вектора измерений  $\bar{P}_{ij}$  на соответствующей оси нового базиса. На рис. показан базис для измерений, выполненных в двух спектральных каналах. Выбор новой системы координат позволяет уменьшить корреляцию между измерениями.

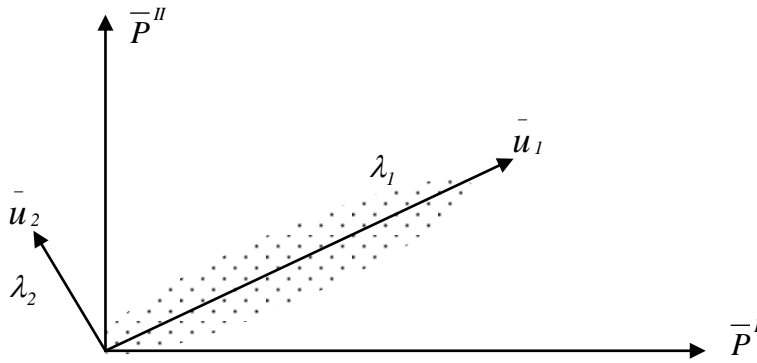


Рис. Выбор нового базиса для измерений в двух спектральных каналах

$\bar{U}_j$  - вектор нового базиса- собственный вектор ковариационной матрицы измерений  $R$ , а масштаб вдоль осей нового базиса определяется собственными значениями  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k$ .

Новый базис определяется путем нахождения собственных векторов и собственных значений ковариационной матрицы измерений:

$$R = \frac{1}{NN} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N P_{K_{ij}} P_{K_{ij}}^T,$$

где  $N \times N$  – размер изображения;

$K$  – количество каналов в многоспектральном изображении.

Выполняется преобразование Карунена-Лоэва ковариационной матрицы  $R$  и находятся собственные значения  $\lambda_1, \dots, \lambda_k$  и собственные векторы матрицы  $R$ .

Используя собственные векторы, соответствующие собственным значениям  $\lambda_1, \dots, \lambda_k$ , формируют матрицу  $U$ , где  $\bar{U}_1, \bar{U}_2 \dots \bar{U}_k$  – собственные векторы матрицы  $R$ . Затем вычисляют преобразованное многоспектральное изображение:

$$P' = UP U^T,$$

где

$$U = (\bar{U}_1, \bar{U}_2 \dots \bar{U}_k).$$

Векторы нового базиса определяются таким образом, что элементы каждого вектора  $P$  были не коррелированы и соответственно корреляционная матрица, полученная по преобразованным векторам измерений  $\bar{P}'$  будет диагональной:

$$C' = \bar{P}' \bar{P}'^T = \begin{pmatrix} \lambda_1 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \lambda_k \end{pmatrix}$$

Первые три компоненты изображения  $P'$  называются главными компонентами. Преобразованное изображение  $P'$  имеет некоррелированные изображения в каждом канале и яркости этих изображений можно связать с конкретными объектами или их свойствами. Первые три компоненты несут основную информацию многоспектрального изображения. Последние – незначительные изменения и шумы. Часто первым трём изображениям присваивают соответственно основные цвета: красный ( $R$ ), зелёный ( $G$ ), синий ( $B$ ). Полученное таким образом псевдоцветное изображение позволяет более



эффективно выявлять на снимках объекты определенного класса при визуальном дешифрировании. Собственные векторы и собственные значения различны для каждого изображения в зависимости от масштаба и условий съемки и от изображенной на снимке местности и т.д. Кроме того, базисные векторы можно связать с определенными свойствами объекта, то есть использовать значения элементов базисного (собственного) вектора как дополнительный дешифровочный признак. На этом предположении основан метод преобразования исходных изображений – Tasseled Cap.