

## **Лекция 9: ТЕОРИЯ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКОЙ ПАРЫ СНИМКОВ**

### **Вопросы:**

#### **9.1 Стереоскопическое наблюдение снимков.**

##### **9.1.1. Монокулярное, бинокулярное и стереоскопическое зрение**

##### **9.1.2. Условия возникновения стереоэффекта.**

##### **9.1.3. Способы стереоскопических наблюдений.**

##### **9.1.4. Стереоскопические наблюдения цифровых изображений.**

#### **Жидкокристаллические стереомониторы.**

##### **9.1.5. Способы измерения снимков и стереомодели.**

##### **9.1.6. Поперечный и продольный параллаксы точек. Принципиальная схема стереокомпаратора. Порядок работы.**

#### **9.2. Теория пары снимков.**

##### **9.2.1. Геометрическая модель местности (связка, базисная плоскость).**

##### **9.2.2. Элементы взаимного ориентирования снимков.**

##### **9.2.3. Внешнее ориентирование модели.**

#### **Литература**

1. Назаров, А.С. Фотограмметрия: учебное пособие для студентов вузов / А. С. Назаров. -Мн.: ТетраСистемс, 2006. –368 с.

2. Ильинский, М.Д., Фотограмметрия и дешифрирование снимков / М.Д. Ильинский, А.И. Обиралов, А.А. Фостиков. - М.: Недра, 1986.– 375с.

3. Обиралов, А.И. Фотограмметрия и дистанционное зондирование: учебное пособие для студентов высших учебных заведений / А.И. Обиралов, А.Н.Лимонов, Л.А.Гаврилова. – М.: КолосС, 2006. – 336 с.

### **Вопрос 9.1 Стереоскопическое наблюдение снимков**

#### **9.1.1. Монокулярное, бинокулярное и стереоскопическое зрение**

Монокулярным зрением называется наблюдение объектов одним глазом. Поле зрения глаза составляет примерно  $150^\circ$  в горизонтальной плоскости и  $120^\circ$  в вертикальной. Сетчатка глаза состоит из клеточек: колбочек (до 7 млн) и палочек (до 130 млн). Колбочки являются органом дневного зрения и позволяют воспринимать детали и цвет объектива.

В центральной части сетчатки расположено желтое пятно, имеющее овальную форму и вытянутое вдоль глазного базиса. Основная масса колбочек сосредоточена на желтом пятне, поэтому объекты, проектировавшиеся на желтое пятно, наблюдаются наиболее четко. В середине желтого пятна имеется центральная ямка – наиболее чувствительное место глаза, состоящая только из колбочек. При рассматривании интересующих точек объекта наблюдатель поворачивает глаз так, чтобы эти точки проектировались в центральную ямку.

Две соседние точки объекта наблюдатель видит отдельно, если они проектируются на отдельные клеточки сетчатки.

Минимальный угол, под которым наблюдатель видит две отдельные точки, называется остротой монокулярного зрения первого рода и составляет примерно 45". При наблюдении линейных объектов острота монокулярного зрения повышается. Объясняется это тем, что при рассматривании протяженных объектов возбуждается не одна, а группа колбочек. Угол, под которым глаз воспринимает две параллельные линии, называется остротой монокулярного зрения второго рода, её средняя величина составляет 20-25". В связи с этим, например, в геодезии визирные марки и сетки нитей измерительных приборов имеют линейчатую форму.

Наблюдение объектов двумя глазами - называется бинокулярным зрением. Оно позволяет повысить точность определения их пространственного положения. При рассматривании какой-либо точки объекта  $F$  (рис. 9.1) наблюдатель поворачивает глаза так, чтобы изображения этой точки в обоих глазах проектировались в центральные ямки  $f_1$  и  $f_2$ . Эта точка  $F$ , в которой пересекаются зрительные оси, называется точкой фиксации. Расстояние  $e_2$  между центрами  $O_1$  и  $O_2$  хрусталиков левого и правого глаз называется глазным базисом. Его величина у людей различна и колеблется от 58 до 72 мм при среднем значении 65 мм, что обязательно учитывается в конструкциях фотограмметрических приборов.

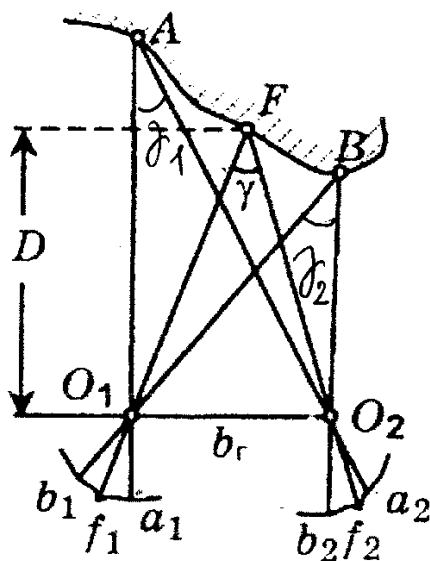


Рис. 9.1. Бинокулярное зрение

Линия  $Ff_1$  ( $Ff_2$ ), проходящая через заднюю узловую точку хрусталика и середину центральной ямки, называется зрительной осью глаза. Угол  $\gamma$ , под которым пересекаются зрительные оси, называется углом конвергенции. Углы между соответственными лучами  $Aa_1$  и  $Aa_2$ ,  $Bb_1$  и  $Bb_2$  называются параллактическими углами  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$ . Угол конвергенции, как и параллактический угол величина малая и для его вычисления можно использовать формулу

$$\gamma = \frac{b_r}{D} \rho \quad (9.1)$$

где  $b_r$  –глазной базис;

$D$  – удаление наблюдателя от рассматриваемой точки.

Для расстояния наилучшего зрения  $D = 250$  мм, угол конвергенции равен  $15^\circ$ .

*Остротой бинокулярного зрения первого рода* называется наименьшая разность параллактических углов, при которой наблюдатель видит две отдельные точки, её средняя величина составляет  $20-30''$ . У опытных специалистов, выполняющих фотограмметрические измерения, острота бинокулярного зрения первого рода достигает  $10''$ .

Минимальная разность параллактических углов, при которой наблюдатель видит две параллельные линии, называется остротой бинокулярного зрения второго рода, её величина –  $10''$ . У опытных наблюдателей она может достигать  $5-7''$ .

*Стереоскопическим зрением* называется бинокулярное зрение с постоянным и непосредственным ощущением глубины пространства. Основным фактором оценки глубины пространства является физиологический параллакс.

Рассматривая какую-то точку, например, точку  $A$  (рис. 9.2), глаза наблюдателя поворачиваются таким образом, что их оптические оси пересекаются в наблюдаемой точке. Размеры желтого пятна глаза позволяют увидеть при данном положении глаз и другие точки, например, точку  $D$ .

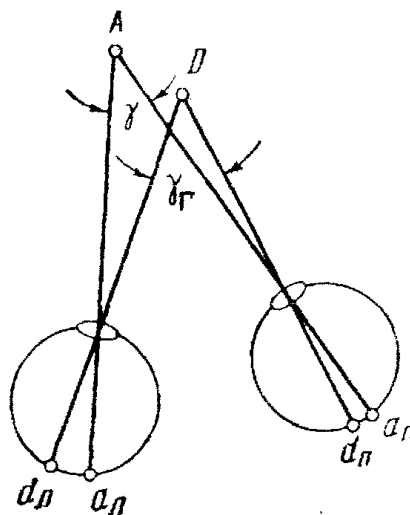


Рис. 9.2. Физиологический параллакс.

Так как расстояние точки  $D$  от глаз иное, чем до точки  $A$ , то в точке  $D$  возникает параллактический угол  $\gamma_r$ , не равный углу  $\gamma$ .

Неравенство этих углов вызывает неравенство дуг  $a_d d_n$  и  $a_n d_n$ , получаемых в пределах желтого пятна левого и правого глаза. Разность этих дуг называется *физиологическим параллаксом*

$$\sigma = a_d d_n - a_n d_n. \quad (9.2)$$

Наличие физиологического параллакса, т.е. разного изображения рассматриваемого предмета на сетчатке левого и правого глаз является причиной пространственного восприятия при стереоскопическом зрении. Физиологический параллакс точки фиксации всегда равен нулю, поскольку её изображение строится в центральной ямке. Геометрическая природа стереоскопического зрения заключается в том, что на сетчатках глаз строятся изображения различных размеров, и элементы изображения характеризуют различные по величине физиологические параллаксы. Эти различия и позволяют судить о различном пространственном положении отдельных частей наблюдаемого объекта. Оценка расстояний выполняется на основе ощущения смещения одной части изображения относительно другой. Способность ощущения разности физиологического параллакса у человека чрезвычайно развита и позволяет фиксировать ничтожные смещения одной части изображения относительно другой. Острота стереоскопического зрения равна  $\approx 30''$ .

### 9.1.2 Условия возникновения стереоэффекта

Восприятие глубины возможно при рассматривании не только объектов, но и их изображений, полученных по законам центрального проектирования при выполнении следующих условий, вытекающих из особенностей бинокулярного зрения.

*Условия возникновения стереоэффекта*

1. Снимки должны быть получены из двух точек пространства.
2. Разность масштабов снимков не должна превышать 16% от их величины.
3. Угол конвергенции, под которым пересекаются соответственные лучи не должен превышать  $15^\circ$  и соответствовать аккомодации (обеспечение получения резкого изображения объектов, удаленных на различные расстояния).
4. Снимки нужно развернуть в своих плоскостях так, чтобы линии, соединяющие одноименные точки, были параллельны главному базису.
5. Каждый глаз должен видеть только один (левый или правый) снимок.

Рассматривая два таких снимка с учетом перечисленных условий, наблюдатель может получить единое пространственное изображение – *стереоскопический эффект*.

*Стереоэффект* – это пространственное восприятие двух плоских изображений.

В зависимости от расположения аэроснимков можно получить прямой, обратный и нулевой стереоэффект.

*Прямой стереоэффект* (рис.9.3, а) возникает при рассматривании левым глазом левого снимка, а правым глазом - правого (их

перекрывающиеся части обращены друг к другу), причем начальные направления аэроснимков (прямые  $O_{\text{л}}' O_{\text{п}}$ ,  $O_{\text{п}}' O_{\text{л}}$ ) должны располагаться на прямой параллельной главному базису наблюдателя. Получающаяся стереоскопическая модель соответствует местности: вершины воспринимаются вершинами, низины – низинами.

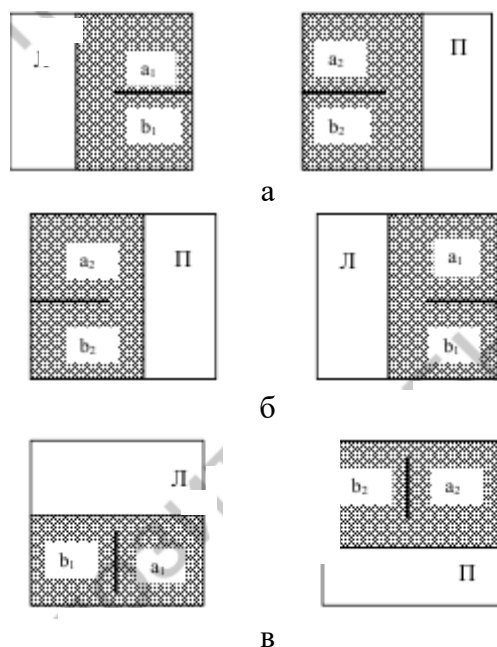


Рис. 9.3. Размещение снимков для наблюдения прямого (а), обратного (б) и нулевого (в) стереоскопического эффекта.

При *обратном стереоэффекте* (рис. 9.3, б) левый глаз наблюдателя должен рассматривать правый, а правый глаз - левый аэроснимок (их перекрывающиеся части обращены во внешние стороны), причем, начальные направления аэроснимков должны располагаться на прямой, параллельной главному базису наблюдателя. Так как разности продольных параллаксов при этом меняют свой знак, то получающаяся модель дает обратное изображение местности, вершины воспринимаются низинами, низины – вершинами.

Нулевой стереоэффект (рис. 9.3, в) возникает в случае, если снимки развернуты в своих плоскостях на  $90^\circ$ , и начальные направления перпендикулярны главному базису. При этом физиологический параллакс обращается в нуль, и наблюдатель видит плоскую картину.

При наблюдении действительных объектов невооруженными глазами стереоэффект всегда прямой. Для измерения снимков в фотограмметрии используют прямой и обратный стереоэффект.

### Вопрос 9.3. Способы стереоскопических наблюдений

Ранее были сформулированы пять условий, при выполнении которых наблюдатель может увидеть по снимкам стереоскопический эффект. Выполнение первых четырех условий не требует применения сложных технических приспособлений. Выполнение пятого условия, требующего, чтобы каждый глаз рассматривал соответствующий снимок, вызывает определенные затруднения, поскольку выполнить его без специальной подготовки нелегко. Это объясняется тем, что при рассматривании снимков зрительные оси должны быть почти параллельны, в то время как аккомодация соответствует их удалению на 25 см. В связи с этим для наблюдения каждым глазом только одного изображения применяют разные способы: *оптический, анаглифический, поляроидный и др.*

*Оптический способ* основан на применении для наблюдения стереоскопической модели оптических приборов. В них снимки рассматриваются через систему линз, призм и зеркал, благодаря которым левый глаз видит только левое изображение, а правый – правое. Простейшим прибором для наблюдения стереомодели является *зеркально-линзовый стереоскоп* – бинокулярный оптический прибор для рассмотрения стереопар.

*Стереопара* – два частично перекрывающихся снимка, полученных с разных точек фотографирования.

Стереоскоп ЛЗ (рис. 9.4), состоящий из двух пар зеркал 1,2 и двух линз 3 позволяет видеть изображение объемным.

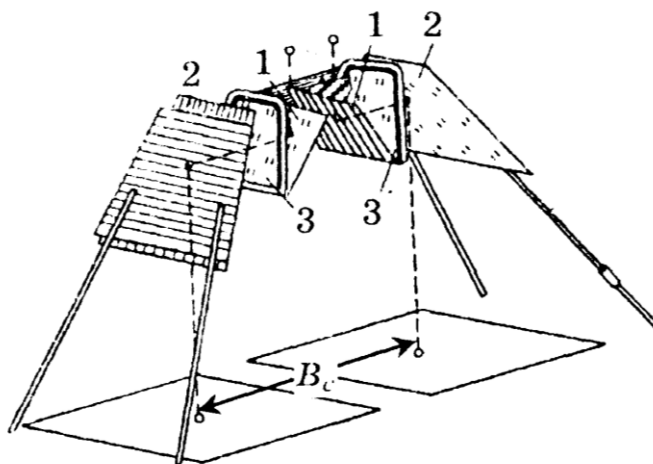


Рис. 9.4. Стереоскоп ЛЗ

Ход лучей в зеркально-линзовом стереоскопе показан на рис. 9.5.

Здесь  $B_c$  – расстояние между центрами больших зеркал, называемое базисом стереоскопа,  $b_c$  – расстояние между передними узловыми точками глаз, называемое глазным базисом.

Чтобы получить объемное изображение  $A'$  точки  $A$  (прямой стереоэффект) необходимо под левое зеркало положить левый снимок, а под правое – правый так чтобы они располагались вдоль оси прибора строго один

за другим. Потом необходимо установить их так, чтобы начальные направления были на одной прямой, параллельной базису стереоскопа, а расстояние между какой-либо парой соответственных точек приблизительно равнялось базису стереоскопа.

Передвижением этих снимков вдоль прибора, а также их поперечным перемещением и некоторым вращением в своих плоскостях добиваются совмещения изображений левого и правого снимков, чем достигают объемного изображения местности.

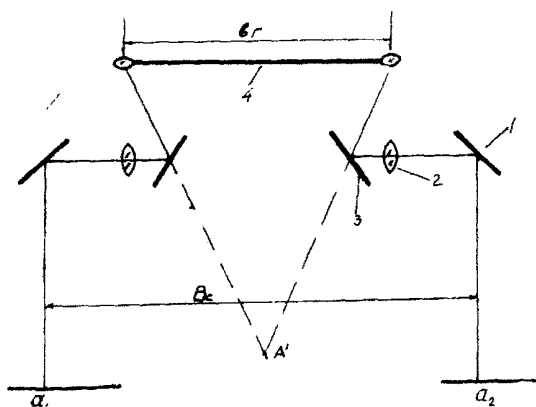


Рис. 9.5. Ход лучей в стереоскопе: 1,2 – внешнее и внутреннее зеркала, 3 – линза, 4 – бинокляр

Некоторые конструкции стереоскопов снабжены биноклярными насадками, измерительными и другими устройствами различного назначения.

*Способ поляроидов* (Р. Брукхарт, 1942 г.) основан на получении левого и правого изображений в поляризованном свете, образующемся при пропускании светового потока через два поляроида. Каждый, из которых представляет собой пару плоско-параллельных стеклянных пластинок с заключенной между ними пленкой-поляризатором. Поскольку интенсивность проходящего через систему светового потока изменяется пропорционально косинусу угла между плоскостями поляризации, то для получения стереоэффекта достаточно развернуть плоскости поляризации левого и правого изображений на  $90^\circ$ , наблюдая их через очки-анализаторы с аналогичными поляризаторами. При этом плоскости поляризации левого и правого изображений должны быть параллельны плоскостям поляризации соответствующих анализаторов очков. Наблюдаемая модель имеет нормальные тона, свойственные фотоизображению, потому способ позволяет получать модель по черно-белым и цветным снимкам.

*Анаглифический способ* наблюдения заключается в рассматривании двух совмещенных изображений, исполненных в дополнительных цветах (например, в красном и сине-зеленом). Наблюдение выполняется через анаглифические очки со стеклами таких же цветов. И каждый глаз воспринимает только одно из изображений: красный светофильтр пропускает красный цвет и задерживает сине-зеленый, а сине-зеленый светофильтр

пропускает сине-зеленый цвет и задерживает красный. Пропускаемые через светофильтры изображения суммируются, и наблюдатель воспринимает одноцветное пространственное изображение объекта.

Пространственная картина может быть получена путем сложения дополнительных цветов или на вычитании их из белого.

*Способ вычитания* применяется для получения объемных изображений. Левое и правое изображения, называемые анаглифами, печатаются на белом фоне прозрачными красками дополнительных (красного и сине-зеленого) цветов и рассматриваются через анаглифические очки. При этом белый тон воспринимается в цветах, соответствующих цветам светофильтров, и потому он сливается с изображением соответствующего снимка того же цвета. В итоге наблюдатель увидит пространственную картину черного цвета на белом (светлом) фоне.

*Способ сложения* предполагает проектирование на общий экран двух изображений, окрашенных в дополнительные цвета, и рассматривание их через анаглифические очки. Поскольку наблюдения выполняются в затемненном помещении, то левым глазом наблюдатель увидит изображение красного цвета на темном фоне, а правым глазом – изображение сине-зеленого цвета на темном фоне. Темный фон создается как черным экраном, так и погашенными изображениями. В итоге наблюдатель воспринимает пространственную картину на темном фоне.

#### **9.1.4. Стереоскопические наблюдения цифровых изображений. Жидкокристаллические стереомониторы**

При компьютерной обработке цифровых изображений основными способами поения стереоскопического эффекта являются оптический, анаглифический, затворный и др., получившие в компьютерном исполнении новые возможности.

Их реализация учитывает ряд особенностей работы с цифровыми изображениями, в частности: простота геометрических и фотометрических преобразований, формирование изображения на экране монитора с по кадровым (page-flipping) или построчным (interlace) режимом выводов, наличие видеопамати и др.

*Оптический способ стереоскопических наблюдений* предполагает вывод зоны стереонаблюдений левого и правого снимков соответственно в левую и правую части экрана. Оба изображения окрашены в естественные цвета, и для их рассматривания и получения стереоскопического эффекта нужно выполнить искусственное разделение соответственных лучей, что достигается применением специальной стереоприставки, устанавливаемой перед монитором. Это обеспечивает возможность наблюдения стереоскопической модели местности и ее измерения, минуя неизбежные потери света при использовании некоторых других способов и приспособлений.

*Анаглифический способ стереоскопических наблюдений* не предполагает наличия какого-либо специального оборудования в виде плат или адаптеров, и требует наличия лишь анаглифических очков. Наблюдаемая при этом стереоскопическая модель формируется по правилам, изложенным ранее для случая наблюдения аналоговых снимков.

Перекрывающиеся части левого и правого изображений, образующие зону стереоскопических наблюдений, окрашиваются в дополнительные цвета и выводятся на экран либо по строкам (четные – левого снимка, а нечетные – правого), либо путем наложения левого на правое. Полученное на экране монитора совмещенное изображение рассматривается через анаглифические очки, стекла которых окрашены в те же цвета, что и соответствующие им изображения снимков. В результате наблюдатель видит пространственную модель местности. В первом случае наблюдатель видит «разреженное» изображение, что снижает точность стереоскопических измерений. Во втором случае цвет и яркость каждого пикселя суммарного изображения, попадающего на элемент монитора, формируются в зависимости от цветов и яркостей накладываемых пикселей изображений. В обоих случаях каждый глаз наблюдателя видит только одно изображение, что и вызывает возникновение стереоскопической модели местности.

*Затворный способ получения стереоскопического эффекта* основан на специфике представления изображения на экране монитора и предполагает применение специальных затворных (жидкокристаллических) очков с LCD - затворами (Liquid Crystal Display) различных типов (ИБИК, NuVision, и др.), в которых стекла становятся прозрачными поочередно, в соответствии со сменой видеостраниц на экране монитора. Сущность способа заключается в следующем.

Изображения левого и правого снимков формируются на страницах видеопамати и поочередно выводятся на экран компьютера. Наблюдения выполняются через очки, представляющие собой пару плоскопараллельных пластин с заключенным между ними слоем жидкого кристалла, который при воздействии на него электрического импульса может изменять интенсивность проходящего через него света так, что в каждый момент времени наблюдатель воспринимает изображение на экране монитора только одним глазом, левым или правым. Смена страниц видеопамати на экране монитора при помощи специального канала связи синхронизирована с изменением прозрачности пластин затворных очков, так что каждый глаз наблюдателя видит только одно изображение. Для смены прямого стереоэффекта на обратный и наоборот нужно изменить фазу, управляющую последовательностью вывода страниц видеопамати.

*Покадровый (page-flipping) режим стереонаблюдений* предполагает поочередный вывод на экран левого и правого изображений синхронно со сменой прозрачности пластин затворных очков, установленных перед левым и правым глазом. Вывод полных изображений обеспечивает получение более высокого качества стереоизображения, но требует в целях обеспечения

комфортности наблюдений для глаз достаточно высокой вертикальной частоты монитора (не менее 120 герц).

*Построчный (interlace) режим стереонаблюдений* предполагает деление кадра на два полукадра с чётными и нечётными строками соответственно. Правое и левое изображения стереопары выводятся на экран поочередно в «чётном» и «нечётном» полукадре, а синхронизируемые с вертикальной разверткой монитора затворные очки позволяют наблюдать два изображения «одновременно» и таким образом проводить стереоизмерения. Необходимым условием комфортной для глаз работы в этом режиме является достаточно высокая вертикальная частота монитора (как минимум 75 герц на «каждый глаз», т.е. примерно 150 герц при переключении в интерлейс).

Построчный режим применим только к экрану в целом, что приводит к некоторым неудобствам, например, при работе с меню. Другим недостатком является прореживание картинки и, как следствие, снижение разрешения в связи с использованием полукадров.

Имеются и другие способы стереонаблюдений цифровых изображений, например, поляроидный.

***Жидкокристаллические стереомониторы.*** В последние годы все большее признание получают жидкокристаллические мониторы (LCD-мониторы), обладающие целым рядом преимуществ перед традиционными CRT (электронно-лучевыми) мониторами: более высокая четкость изображения, отсутствие мерцаний, компактность и пр. Однако LCD-мониторы не поддерживают необходимую частоту развертки, что исключает возможность временного разделения изображений и использования затворных очков. Это длительное время сдерживало их промышленное изготовление, и только достижения последних лет в области LCD-технологии позволили создать ряд моделей стереомониторов с приемлемыми техническими параметрами.

В настоящее время разработкой LCD-мониторов занимается ряд компаний США, Кореи, Испании, России и др., и на рынке появилось несколько довольно удачных конструкций.

Пригодные для точной стереоскопической визуализации и высокоточных фотограмметрических измерений LCD-мониторы базируются на использовании специальных поляризационных очков и по способу получения модели местности делятся на «интерлейсные», «фазово-поляризационные» и зеркальные.

*«Интерлейсные» мониторы* базируются на использовании построчного режима визуализации, реализованного на CRT-мониторе, но, в отличие от него, предполагают одновременный (а не последовательный) вывод левого и правого снимков. При этом одна половина стереопары выводится на четных строках, вторая – на нечетных, а оба изображения имеют ортогональную или круговую поляризацию, которая создается с помощью специального «полосчатого» фильтра и обеспечивает их разделение через поляризационные очки.

К недостаткам интерлейсных мониторов относят потерю разрешения при выводе изображения через строку, повышенную утомляемость оператора при наблюдении «полосчатого» изображения, плохую читаемость элементов интерфейса обрабатываемой программы и др.

Представляющие рассматриваемую группу стереомониторы Hyundai корейской компании выпускаются с диагональю 24" и 46" и стоят 3100 -7000 долларов США.

Среди других интерлейсных мониторов можно отметить Zalman и Miracube выпускаемых корейскими компаниями с диагональю от 19 до 46 дюймов и стоимостью от 700 до 7000 долларов США.

*Фазово-поляризационные LCD-мониторы* используют уникальный способ получения стереоэффекта. Конструктивно они состоят из пары параллельных панелей LCD с установленными перед ними поляризационными фильтрами. Одна из этих панелей используется для регистрации в каждом пикселе суммарной интенсивности, а вторая – направления поляризации. Необходимые для этого преобразования исходных изображений осуществляются с помощью расположенного в мониторе процессора или специального видеодрайвера. На выходе из монитора, после прохождения через поляризационные очки, световые сигналы формируют изображения для левого и правого глаза наблюдателя.

К достоинствам фазово-поляризационных мониторов относят повышенную яркость и контрастность изображения, сохранение разрешения исходных изображений по вертикали и по горизонтали, возможность визуализации стереоэффекта одновременно несколькими наблюдателями и пр. Одним из представителей монитора этого класса является PerceivaDSD 190 с диагональю 19" американской компании MacNaughton, однако его существенным недостатком является высокая цена, достигающая 7000долларов США.

*Зеркальные стереомониторы* реализуют принцип совмещения с помощью полупрозрачного зеркала двух ортогонально поляризованных изображений LCD-дисплеев и последующего их разделения с помощью пассивных поляризационных очков.

Важным достоинством зеркальных стереомониторов является поддержка их имеющимся программным обеспечением, в том числе с оконным стереоскопическим режимом и на уровне драйверов.

Из зеркальных LCD-стереомониторов следует отметить мониторы PLANAR (США) с диагональю от 17" до 25" стоимостью \$ 4000 - \$ 11000, OmniaTechnologias (Испания) с диагональю 19" до 20", TRUE3Di с диагональю (Канада) 8", 19", 24" и 20" и пр. Стоимость таких мониторов, как правило, достаточно высока и лежит в диапазоне от \$ 4000 до \$ 19000, за исключением российского монитора модели LcReflex выпускаемого витебским телевизионным заводом «Витязь» (Республика Беларусь) под торговой маркой Stereopixel.

Некоторые из рассмотренных выше LCD-мониторов поддерживаются цифровыми фотограмметрическими системами PHOTOMOD, ТАЛКА и др.

### 9.1.5. Способы измерения снимков и стереомодели

Разрешающая способность стереоскопического зрения дает возможность с большой точностью фиксировать совмещение одноименных точек. Поэтому стереоскопическое наблюдение широко используется для измерения координат одноименных точек.

Стереоскопический способ предполагает измерение геометрической модели, построенной по паре смежных снимков. Способ пригоден для измерения координат как контурных, так и не контурных точек.

Для совместного измерения пары снимков и модели местности в фотограмметрии используется два способа – *способ действительной марки* и *способ мнимой марки* (двух марок), предложенный в 1899 г. Пульфрихом. Он пригоден для измерения как снимков, так и модели. В нем используются две реальные марки, имеющие Т-образную форму и накладывающиеся на изображения левого ( $P_L$ ) и правого ( $P_R$ ) снимков (рис. 9.6).

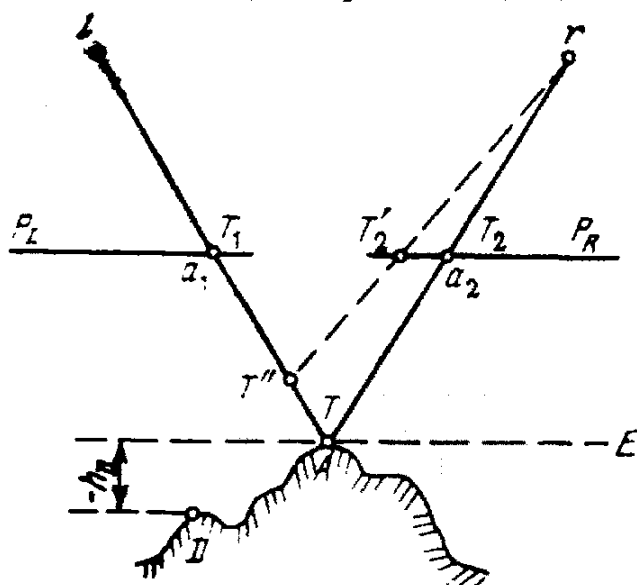


Рис. 9.6. Измерение снимков мнимой марки

Допустим, что два перекрывающихся снимка  $P_L$  и  $P_R$  получены с некоторого базиса фотографирования  $B$  и установлены в приборе так, что создана стереоскопическая модель участка местности. Если одновременно рассматривать модель и марки  $T_1$  и  $T_2$ , то они сольются в одну пространственную марку  $T$ , произвольно расположенную относительно ближайших точек модели. Если марки  $T_1$  и  $T_2$  совмещены с одноименными  $a_1$  и  $a_2$ , то видимая пространственная марка  $T$  в этот момент совмещена с точкой  $A$  модели.

Если правая марка  $T_2$  не совмещена с точкой  $a_2$ , то видимая пространственная марка  $T''$  не совместится с точкой  $A$  модели, а будет

казаться выше или ниже точки А. Для того, чтобы правая марка из положения  $T_2'$  перешла в положение  $T_2$  необходимо её (или снимок) передвигать в соответствующем направлении до тех пор, пока пространственная марка  $T''$  не совпадет с точкой А модели.

Стереофотограмметрические приборы имеют отсчетные приспособления, позволяющие измерять движения марок по осям X и Y прибора, а тем самым измерять и координаты любой точки модели в системе координат прибора.

Если прибор имеет три оси измерения X, Y, Z, то разность отсчетов по Z при последовательном совмещении видимой пространственной марки с точками А и Д модели определит превышение между этими точками в масштабе модели.

Стереофотограмметрические приборы, используемые для измерения координат точек снимков или модели способом мнимой марки, различны по конструкции: в одних перемещаются снимки относительно марок, в других - марки относительно снимков.

### 9.1.6 Поперечный и продольный параллаксы точек. Принципиальная схема стереокомпаратора. Порядок работы

Стереокомпаратор является наиболее высокоточным стереофотограмметрическим прибором, предназначенным для определения положения соответственных точек на смежных снимках, которое характеризуется координатами ее изображения, т.е. величинами  $x_1, y_1, x_2$  и  $y_2$  (рис. 9.7) или величинами  $p$  и  $q$ , причем

$$p = x_1 - x_2, \quad q = y_1 - y_2$$

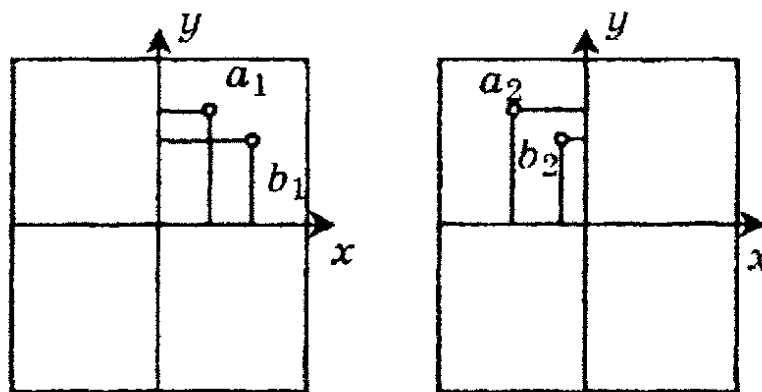


Рис. 9.7. Координаты соответственных точек на паре снимков

Величина  $p$  называется *продольным параллаксом* точки, а величина  $q$  – *поперечным параллаксом*. Для измерения этих координат и параллаксов и предназначен *стереокомпаратор*.

В настоящее время существует много типов стереокомпараторов, различающихся между собой по конструкции, точности измерения координат



смещением всей наблюдательной системы по высоте. Величина перемещения наблюдательной системы может быть определена по шкале у до 0,02 мм.

Измерение координат и параллаксов точек аэроснимков на стереокомпараторе выполняют при прямом стереоэффекте, на аэронегативах или диапозитивах.

Аэронегативы с наколотыми главными точками закладывают в кассеты эмульсией вниз, перекрывающимися частями друг к другу, покрывают стеклами и закрепляют зажимами. Затем ориентируют их по начальному направлению. Для этого штурвалами X и Y монокулярно совмещают левую марку с главной точкой левого аэронегатива. Штурвалом X и винтом поперечных параллаксов  $q$  монокулярно совмещают правую марку с главной точкой правого аэронегатива. Далее наблюдая двумя глазами поворотом левой кассеты на угол  $K_{\text{л}}$  и винта продольных параллаксов  $p$  добиваются стереоскопического восприятия модели.

После этого движением винта продольных параллаксов  $p$  опускают марку вниз («под землю») до тех пор, пока не будут видны на небольшом расстоянии друг от друга две марки (рис.9.9).

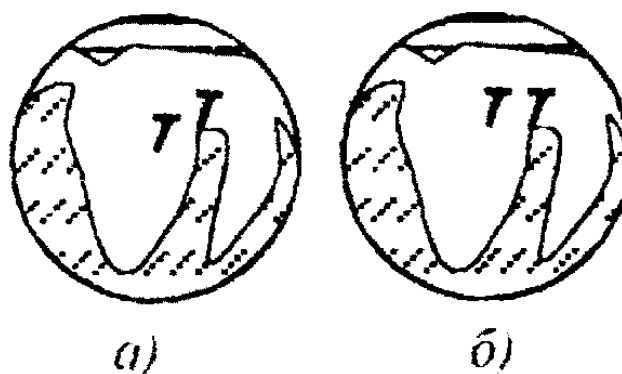


Рис.9.9. Ориентирование аэроснимков

Именно при этом положении хорошо воспринимается поперечный параллакс, как двоение марок по оси ординат.

Поворотом левой кассеты на угол  $K_{\text{л}}$  уничтожают на точке 2 поперечный параллакс, располагая марки на одно уровне.

То же делают на точке 1, используя поворот правой кассеты на угол  $K_{\text{п}}$ . При этом необходима фиксация внимания на стереоскопической модели, а не на марке, относительно которой наблюдатель видит положение марки, что и позволяет проводить измерения.

Обработку результатов измерений выполняют после их завершения. Порядок этой обработки зависит, как от назначения получаемых результатов, так и от способа ориентирования снимков. В случае ориентирования снимков по начальным направлениям координаты X и Y как правило, не вычисляются, а измеренные параллаксы находят по отсчетам на точке:

$$p = P_i - P_{\text{нач.}}, \quad q = Q_i - Q_{\text{нач.}},$$

где  $P_i$ ,  $P_{нач}$ ,  $Q_i$ ,  $Q_{нач}$  - отсчеты по шкалам продольных и поперечных параллаксов, полученные при визировании на текущую и начальную точки соответственно.

При стереоскопических измерениях, совмещая измерительную марку с точкой стереомодели наблюдатель допускает ошибку  $\Delta x$  в плане и ошибку  $\Delta h$  по высоте, величины которых зависят от остроты бинокулярного зрения первого рода  $\Delta \gamma_v$ .

Современные стереокомпараторы характеризуются высокой точностью измерений.

## **Вопрос 9.2. Теория пары снимков. Геометрическая модель местности (связка, базисная плоскость)**

Для определения пространственного положения точек данных одного снимка недостаточно, и можно определить лишь их плановые координаты при некотором фиксированном значении высоты фотографирования. Определение же пространственного положения точек возможно только по результатам обработки пары снимков.

*Стереофотограмметрия* – раздел фотограмметрии, изучающий методы и приемы полного описания объектов путем определения их формы, размеров и пространственного положения по фотографическим изображениям этих объектов. Методы стереофотограмметрии находят применение не только в топографии, но и для решения широкого круга задач нетопографического характера – изучения деформации сооружений, при архитектурных обмерах и т. п.

Методы стереофотограмметрии предполагают построение геометрической (стереоскопической, фотограмметрической) модели по двум и более снимкам, ее измерение и обработку.

Пусть участок АКТ местности изобразился на двух снимках  $p_1$  и  $p_2$ , полученных при разных положениях центров фотографирования  $S_1$  и  $S_2$ . Снимки  $p_1$  и  $p_2$  занимают такое же положение, какое они занимали во время фотографирования.

*Базис фотографирования*  $B$  - расстояние между центрами фотографирования  $S_1$  и  $S_2$ .

*Связка проектирующих лучей* - совокупность проектирующих лучей, принадлежащих какому-либо центру проекции  $S_1$  или  $S_2$ .

*Соответственные лучи* – лучи проходящие через центры проекции  $S_1$  и  $S_2$  и идентичные точки стереопары ( $S_1a_1$  и  $S_2a_2$ ).

*Базисная плоскость фотографирования* – плоскость проходящая через базис фотографирования  $B$  и один любой проектирующий луч.

*Главная базисная плоскость* – плоскость проходящая через базис фотографирования и главный луч  $S_1o_1$  или  $S_2o_2$ .

Каждая пара соответственных лучей ( $S_1a_1$  и  $S_2a_2$ ) лежит в одной и той же базисной плоскости.

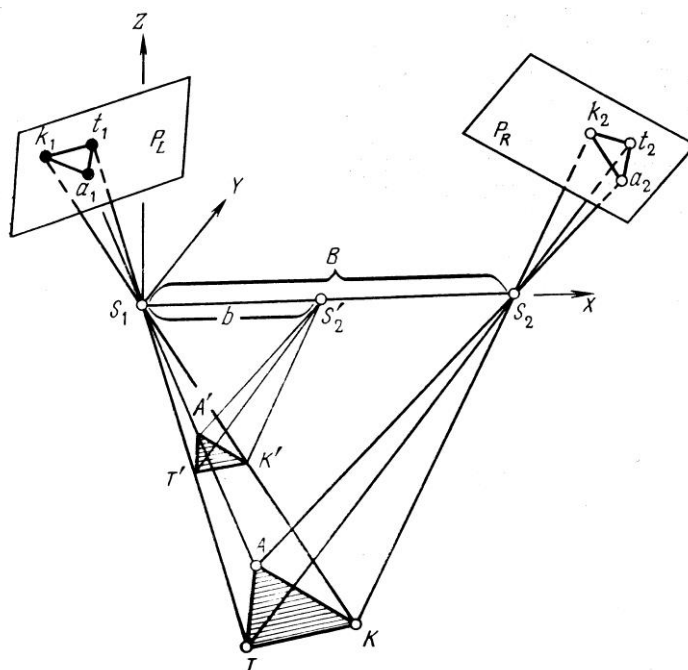


Рис. 9.11. Схема построения геометрической модели местности

Если оставить один снимок неподвижным (например левый  $p_1$ ) и перемещать правый снимок  $p_2$  по направлению базиса фотографирования  $B$ . При этом связка проектирующих лучей перемещается параллельно самой себе (т.е. каждый проектирующий луч подвижной связки будет все время параллелен своему исходному положению, а следовательно будет находиться в одной и той же базисной плоскости). Таким образом, пересечение одноименных связок лучей нигде не будет нарушено. Полученная модель будет подобна реальному объекту съемки. Такая модель называется *геометрической (стереоскопической, фотограмметрической) моделью*.

*Геометрическая (стереоскопическая, фотограмметрическая) модель* – совокупность точек пересечения соответствующих проектирующих лучей, полученных по стерепаре.

*Базис проектирования  $b_{np}$*  – расстояние между центрами проекции  $S_1$  и  $S_2$  двух связок, по которым построена модель.

*Масштаб модели* – равен отношению базиса проектирования  $b_{np}$  к базису фотографирования  $B$ .

$$1/t = b_{np}/B. \quad (9.5)$$

Базис проектирования можно выбрать произвольно, в этом случае масштаб модели будет произвольным.

*Элементы ориентирования пары снимков* – величины, определяющие их положение во время фотографирования. Так же как для одиночного снимка их можно разделить на внутренние и внешние элементы ориентирования.

*Элементы внутреннего ориентирования* – фокусное расстояние аэрофотокамеры  $f$  и координаты главной точки снимка.

Положение снимков, образующих модель местности, относительно системы координат местности характеризуется *элементами внешнего ориентирования*: величинами  $X_{S1}, Y_{S1}, Z_{S1}, \alpha_1, \omega_1, \chi_1$  для левого снимка и  $X_{S2}, Y_{S2}, Z_{S2}, \alpha_2, \omega_2, \chi_2$  для правого, т. е. шестью линейными элементами и шестью угловыми.

Если известны элементы ориентирования пары снимков, то по ним можно установить снимки в то положение, которое они занимали в момент фотографирования и сориентировать их относительно наземной системы координат.

Как правило, элементы внешнего ориентирования снимков неизвестны или известны с недостаточной точностью для фотограмметрической обработки.

С учетом этого, для построения модели и определения по ней пространственных координат точек, используют *двойную обратную фотограмметрическую засечку*. Она включает следующие этапы:

- *внутреннее ориентирование снимков* (восстановить связи проектирующих лучей, существовавших во время фотографирования)
- *взаимное ориентирование снимков* (переместить снимки относительно друг друга так, чтобы соответственные лучи пересекались);
- *построение модели местности*;
- *внешнее ориентирование модели* (ориентирование модели относительно системы координат местности по опорным точкам);
- *измерение пространственных координат точек* аэроснимков в системе координат местности.

## 9.2.2 Элементы взаимного ориентирования снимков

*Элементы взаимного ориентирования* – величины, определяющие взаимное положение пары снимков в избранной системе координат. Эти величины не связаны с системой координат местности и могут определяться только совместно.

При обработке результатов фотограмметрических измерений применяют *две основные системы элементов взаимного ориентирования*, различающиеся способом ориентирования:

- 1) наклонами и вращениями обоих снимков при неподвижном базисе;
- 2) наклонами и вращениями одного снимка и базиса фотографирования.

В *базисной системе* (рис. 9.12) неподвижным (горизонтальным) считается базис фотографирования. Начало фотограмметрической системы координат совмещено с центром проекции левого снимка  $S_1$ , ось абсцисс  $S_1X'_1$  совмещена с базисом фотографирования  $S_1S_2$ , а плоскость  $S_1X'_1Z'_1$  – с

главной базисной плоскостью левого снимка. Элементами взаимного ориентирования являются:

$\alpha'_1$  – *продольный угол наклона левого снимка* (угол в плоскости  $S_1X'_1Z'_1$  между главным оптическим лучом  $S_1O_1$  и осью  $S_1Z'_1$ );

$\chi'_1$  – *угол поворота левого снимка в своей плоскости* (угол в плоскости левого снимка  $P_1$  между осью  $O_1Y_1$  и следом сечения снимка плоскостью  $S_1O_1Y'_1$ );

$\alpha'_2$  – *продольный угол наклона правого снимка* (угол в плоскости  $S_1X'_1Z'_1$  между осью  $S_1Z'_1$  ( $S_2Z'_2$ ) и проекцией правого главного оптического луча  $S_2O_2$  на плоскость  $S_1X'_1Z'_1$ );

$\omega'_2$  – *взаимный поперечный угол наклона* (угол в плоскости  $S_2Y'_2O_2$  между главным оптическим лучом правой связки  $S_2O_2$  и плоскостью  $S_1X'_1Z'_1$ );

$\chi'_2$  – *угол поворота правого снимка в своей плоскости* (угол в плоскости правого снимка  $P_2$  между осью  $O_2Y_2$  и следом сечения снимка плоскостью  $S_2O_2Y'_2$ ).

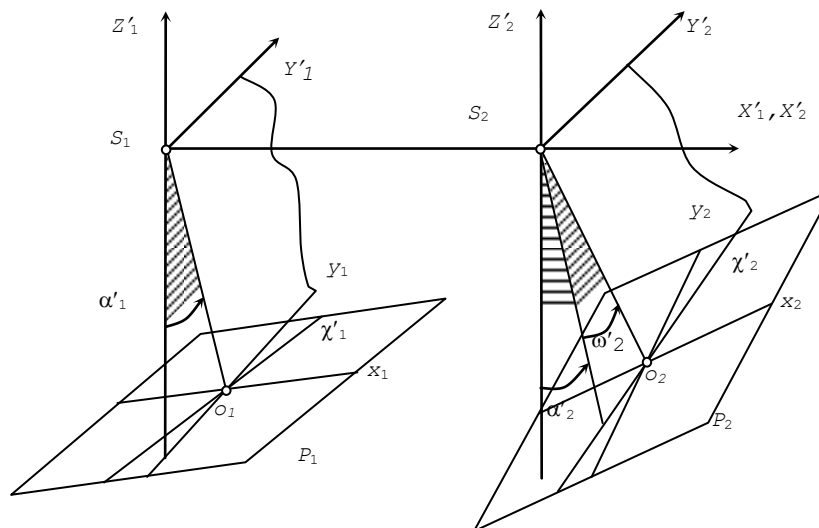


Рис.9.12 Первая (базисная) система элементов взаимного ориентирования

В линейно-угловой системе (система координат левого снимка) (рис.9.13) неподвижным считается левый снимок. Начало фотограмметрической системы координат совмещено с центром проекции левого снимка  $S_1$ , координатные оси  $X'_1$  и  $Y'_1$  направлены параллельно осям координат  $x_1$  и  $y_1$  левого снимка, а ось  $Z'_1$  является продолжением главного оптического луча левой связки. Система координат  $S_2X'_2Y'_2Z'_2$  параллельна системе  $S_1X'_1Y'_1Z'_1$ . Элементами взаимного ориентирования являются:

$\tau'$  – *угол в плоскости  $P_1$  между осью  $x_1$  и следом сечения главной базисной плоскостью левого снимка;*

$\nu'$  – *угол наклона базиса фотографирования в плоскости  $S_1S_2O_1$  между перпендикуляром к нему и осью  $S_1Z'_1$ ;*

$\Delta\alpha$  – взаимный продольный угол наклона (угол плоскости  $S_2X'_2Z'_2$  между осью  $S_2Z'_2$  и проекцией главного луча правой связки на плоскость  $X'_2Z'_2$ );

$\Delta\omega$  – взаимный поперечный угол наклона (угол в плоскости  $S_2Y'_2O_2$  между главным оптическим лучом правой связки  $S_2O_2$  и его проекцией на плоскость  $X'_2Z'_2$ );

$\Delta\chi$  – взаимный угол поворота угол в плоскости правого снимка  $P_2$  между осью  $y_2$  и следом плоскости  $S_2O_2Y'_2$ .

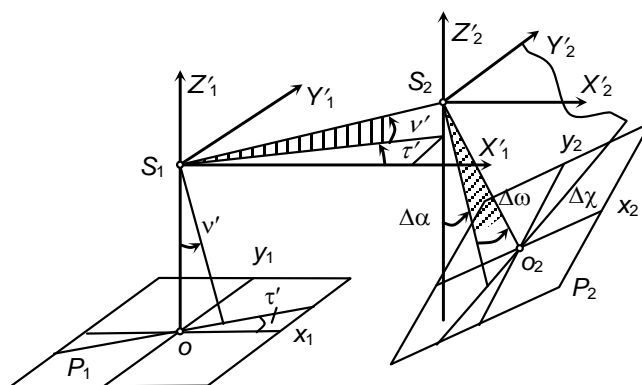


Рис. 8.13. Вторая (линейно-угловая) система

Обе системы отсчетов элементов взаимного ориентирования точно соответствует системе отсчета угловых элементов внешнего ориентирования снимков.

### 9.2.3. Внешнее (геодезическое) ориентирование модели

Модель, полученная в результате взаимного ориентирования, построена в некоторой произвольно выбранной системе координат  $OXYZ$  (рис. 9.14). В общем случае ее масштаб и положение в пространстве относительно системы координат местности  $O_T X_T Y_T Z_T$  произвольны, и должны быть определены в процессе внешнего ориентирования. При этом нужно принять во внимание, что система координат местности  $O_T X_T Y_T Z_T$  – левая, а фотограмметрическая  $OXYZ$  – правая.

Величины, определяющие положение модели в пространстве относительно системы координат местности и ее масштаб, называют *элементами внешнего ориентирования*. Таких элементов семь:

$X_0, Y_0, Z_0$  – геодезические координаты начала фотограмметрической системы координат;

$t$  – масштабный коэффициент;

$\xi$  – продольный угол наклона в плоскости  $OY_rZ_r$  между проекцией на нее оси  $Z$  фотограмметрической системы и осью  $Z_r$ ;

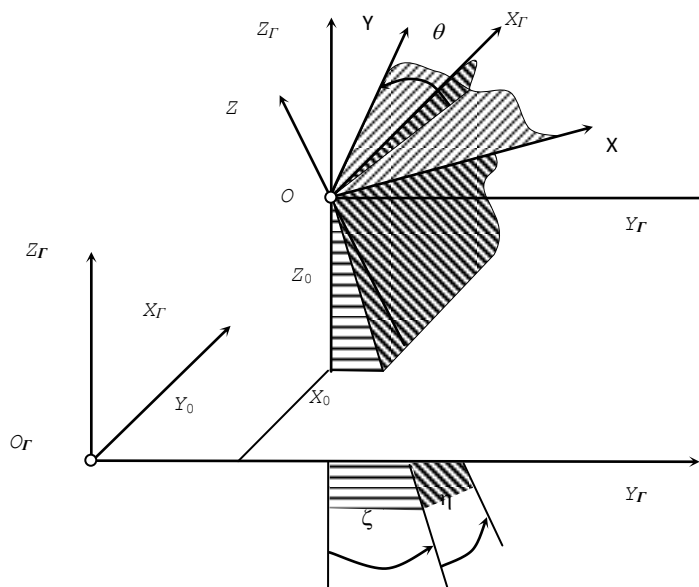


Рис. 9.14 Элементы внешнего ориентирования модели

$\eta$  – поперечный угол наклона в плоскости  $OZX_r$  между осью  $Z$  фотограмметрической системы и ее проекцией на плоскость  $Y_rZ_r$ ;

$\theta$  – угол поворота модели в плоскости  $OXY$  между осью  $Y$  и следом сечения плоскости  $OZX_r$ .

Поскольку системы отсчета угловых элементов внешнего ориентирования модели и снимка полностью идентичны, для установления связи между координатами точек в системах  $O_rX_rY_rZ_r$  и  $OXYZ$  можно воспользоваться следующими формулами, с учетом положения координатных осей:

$$\left. \begin{aligned} X_r &= X_0 + (b_1X + b_2Y + b_3Z) \times t = X_0 + \Delta X_r \\ Y_r &= Y_0 + (a_1X + a_2Y + a_3Z) \times t = Y_0 + \Delta Y_r \\ Z_r &= Z_0 + (c_1X + c_2Y + c_3Z) \times t = Z_0 + \Delta Z_r \end{aligned} \right\}, \quad (9.6)$$

где  $a_i, b_i, c_i$  ( $i=1,2,3$ ) – направляющие косинусы, с заменой углов  $\alpha, \omega, \chi$  на углы  $\xi, \eta$  и  $\theta$ .

Для решения задачи нужно иметь как минимум три опорных точки, из которых две должны быть определены в плане и по высоте, а третья – только по высоте.