



## Лекция 10: ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ФОТОТРИАНГУЛЯЦИЯ

**Вопросы: 10.1 Сущность пространственной фототриангуляции. Классификация методов. Понятие об аналоговой фототриангуляции.**

**10.2 Аналитическая маршрутная**

**фототриангуляция.**

**10.3 Способ независимых моделей. Внутреннее ориентирование снимков.**

**10.4 Уравнивание связок проектирующих лучей.**

**10.5 Точность триангуляционных сетей.**

**10.6 Программы построения и уравнивания сетей фототриангуляции.**

### 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 10.1 Сущность пространственной фототриангуляции. Классификация методов.

*Пространственной фототриангуляцией* называют метод определения планового или пространственного положения точек местности путем фотограмметрических засечек точек по перекрывающимся снимкам.

Метод применяют для определения координат опорных точек с целью последующего их использования при фототрансформировании снимков, внешнем ориентировании модели, съемке рельефа и контуров, получении ортофотоснимков и др. Сущность метода заключается в следующем.

Пусть из точек  $S_1, S_2, S_3$  и  $S_4$  (рис. 10.1) получены снимки  $P_1, P_2, P_3$  и  $P_4$ .

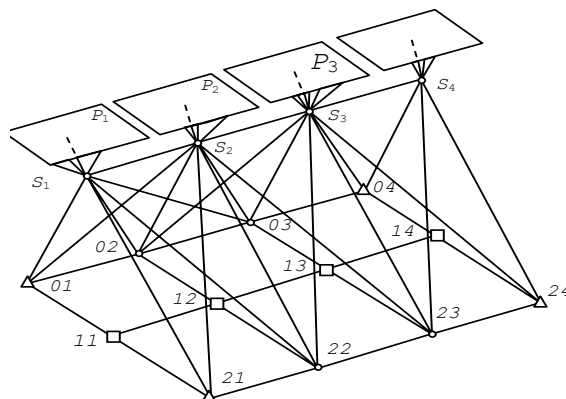


Рис. 10.1- Пространственная фототриангуляция

Установим эти снимки в то положение, которое они занимали в момент фотографирования и обратим внимание на следующее.

1. Все проектирующие лучи проходят через центры фотографирования и точки аэроснимков. Значит, *связки внутренне ориентированы*.

2. Пары соответственных проектирующих лучей  $S_{121}$  и  $S_{221}$ ,  $S_{101}$  и  $S_{201}$ ,  $S_{222}$  и  $S_{322}$ , и др., пересекаются в точках 01, 02, ..., 24, т. е. все они компланарны, лежат в базисных плоскостях, следовательно, *пары снимков взаимно ориентированы*.

3. Тройки проектирующих лучей  $S_{102}$ ,  $S_{202}$  и  $S_{302}$ , и  $S_{112}$ ,  $S_{212}$  и  $S_{312}$  и т. п., пересекаются в точках 02, 12, 22, ..., 04, 14, 24. Значит, построенные по стереопарам  $P_1$  и  $P_2$ ,  $P_2$  и  $P_3$ ,  $P_3$  и  $P_4$  и др. фотограмметрические модели в едином масштабе и представляют нечто единое – *модель маршрута*.

4. Проектирующие лучи  $S_{101}$ ,  $S_{121}$ ,  $S_{404}$  и  $S_{424}$  проходят через опорные точки 01, 21, 04 и 24. Следовательно, *маршрутная сеть ориентирована по опорным точкам*, и фотограмметрическая система координат совпадает с геодезической.

Для построения фототриангуляционной сети нужно выполнить следующие операции:

- внутреннее ориентирование снимков;
- взаимное ориентирование снимков;
- определение фотограмметрических координат точек модели (построение начального звена);
- построение следующего звена (взаимное ориентирование, определение фотограмметрических координат точек) и объединение его с предыдущим по точкам связи в зоне тройного продольного перекрытия;
- внешнее (геодезическое) ориентирование маршрутной сети по опорным точкам и перевычисление фотограмметрических координат точек в систему местности.

При построении и уравнивании фототриангуляционной сети на снимках предварительно намечают ряд точек, в частности:

- точки в стандартных зонах 1–6 для взаимного ориентирования снимков;
- связующие точки в тройном продольном перекрытии снимков для связи смежных звеньев маршрута и в поперечном перекрытии снимков для связи смежных маршрутов между собой;
- опорные точки для внешнего ориентирования сети;
- характерные точки рельефа, урезы вод и др., отображаемые на топографической карте.

Кроме того, для внутреннего ориентирования снимков используются координатные метки, а с целью повышения точности взаимного ориентирования в стандартных зонах выбирают по 3–5 точек. С учетом этого в пределах стереопары размещается 20 и более точек.

**Классификация методов фототриангуляции.** Методы построения фототриангуляционных сетей могут быть классифицированы по нескольким основаниям.

*В зависимости от назначения* различают два вида фототриангуляции: *заполняющая* и *каркасная*. *Заполняющая фототриангуляция* строится по снимкам площадной аэрофотосъемки, а каждый маршрут обеспечивается опорными точками. *Каркасная фототриангуляция* строится по снимкам каркасных маршрутов, представляющих собой одиночные маршруты по краям основных, с целью обеспечения опорными точками снимков площадной аэрофотосъемки и заполняющей фототриангуляции.

*В зависимости от количества маршрутов*, используемых для построения фототриангуляционной сети, различают фототриангуляцию *маршрутную* и *блочную*.

*Маршрутная фототриангуляция* строится по снимкам одного маршрута, обеспеченного опорными точками для его внешнего (геодезического) ориентирования.

*Блочная фототриангуляция* строится одновременно по двум и более маршрутам, поэтому необходимое число опорных точек для внешнего ориентирования такой сети значительно меньше, чем при построении отдельных маршрутов.

*В зависимости от получаемых результатов сгущения* различают фототриангуляцию *плановую*, задачей которой является получение только плановых координат точек  $X$  и  $Y$ , и *пространственную*, позволяющую получить не только плановые координаты, но и высоты точек. Способы построения плановой фототриангуляции в настоящее время потеряли актуальность и практически не используются.

*В зависимости от применяемых технических средств*, различают фототриангуляцию *аналоговую* и *аналитическую*.

*Аналоговая фототриангуляция* основана на использовании универсальных стереофотограмметрических приборов, позволяющих создавать не только одиночные модели, но общую модель маршрута. Возможности учета систематических ошибок в аналоговой фототриангуляции ограничены.

## **Вопрос 10.2 Аналитическая маршрутная фототриангуляция**

*Аналитическая фототриангуляция* основана на использовании строгих математических зависимостей между точками аэроснимка и местности. Построению аналитической фототриангуляции предшествует измерение координат и параллаксов точек снимков на высокоточных стереокомпараторах, а использование ЭВМ для их обработки открывает возможности учета всех искажений точек, выражающихся математическими зависимостями, и применения строгих методов уравнивания результатов измерений методом наименьших квадратов.

Методы аналитической фототриангуляции можно разделить на группы в зависимости от математической формулировки задачи построения фототриангуляционной сети:

✓ *способы полузависимых моделей*, предполагающие построение маршрутной сети в единой системе координат и ее последующее ориентирование по опорным точкам;

✓ *способы независимых моделей*, предполагающие построение отдельных моделей в локальных системах координат, последующее их объединение и ориентирование по опорным точкам;

✓ *способы построения блока из отдельных маршрутов*, основанные на построении маршрутов способами полузависимых моделей, объединении их в блок по связующим точкам и последующем ориентировании всего блока по опорным точкам;

✓ *способы уравнивания связок проектирующих лучей*, основанные на построении маршрутной или блочной сети непосредственно в системе координат местности с использованием условия коллинеарности соответствующих векторов.

С точки зрения точности и производительности фотограмметрического сгущения наиболее эффективными являются способы аналитической пространственной фототриангуляции, особенно при уравнивании связок проектирующих лучей и использовании бортовых измерений.

### **Вопрос 10.3 Способ независимых моделей. Внутреннее ориентирование снимков**

Сущность способа заключается в том, что каждая фотограмметрическая модель (звено) строится в локальной координатной системе (чаще всего – в базисной, начало которой совмещено с левым центром, ось абсцисс – с базисом фотографирования, а ось аппликат размещена в главной базисной плоскости левого снимка). Т. о., одно звено строится в системе  $S_{i-1} X' Y' Z'$ , другое – в системе  $S_i X'' Y'' Z''$  и т. д. (рис. 10.2), и эти системы различаются масштабом, положением начала и ориентированием координатных осей. После внутреннего ориентирования снимков выполняют обработку каждого звена в порядке:

- взаимное ориентирование снимков;
- трансформирование координат точек на плоскость  $SXY$  базисной системы; вычисление направляющих косинусов с заменой углов  $\alpha = \alpha'_1$ ,  $\omega = 0$ ,  $\chi = \chi'_1$  для левого снимка и  $\alpha = \alpha'_2$ ,  $\omega = \omega'_2$ ,  $\chi = \chi'_2$  для правого;
- определение фотограмметрических координат точек для идеального случая съемки (т. к. в базисных системах координат плоскости снимков параллельны базису фотографирования).

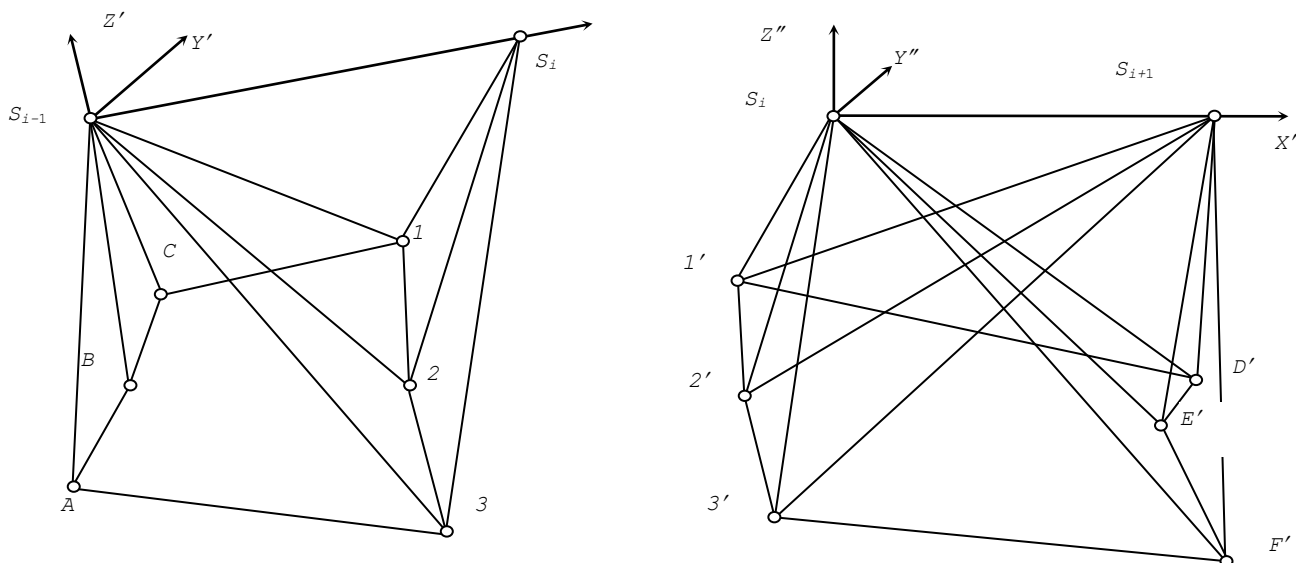


Рис.10.2. – Способ независимых моделей

После построения всех звеньев маршрута (блока) в локальных системах координат выполняют их преобразование в систему координат местности одним из рассмотренных ниже способов.

*Первый способ* предусматривает построение сети в свободной системе координат путем объединения всех звеньев, после чего выполняется внешнее ориентирование сети по опорным точкам.

С этой целью координаты точек каждого звена преобразуют в систему координат центрального звена 2.3 (рис. 10.3): сначала звеньев 1.3, 2.2, 2.4, 3.3, затем – звеньев 1.2, 1.4, 3.2, 3.4 и т.д. Элементы ориентирования каждой модели относительно центральной находят по связующим точкам в зоне тройного продольного перекрытия  $1$  и  $1'$ ,  $2$  и  $2'$ ,  $3$  и  $3'$  и общему центру  $S_i$  (рис. 10.3), и по точкам  $C$ ,  $I$ ,  $A$ ,  $3$  в зоне поперечного перекрытия. При этом учитывают, что координатные системы всех моделей – правые (фотограмметрические). В результате этих преобразований будет построена единая модель маршрута (блока) в свободной системе координат. После этого выполняют внешнее ориентирование всей сети (маршрута или блока) по опорным точкам.

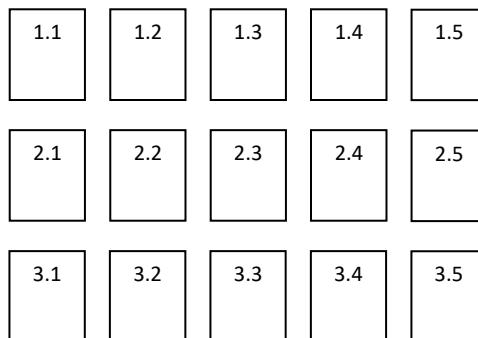


Рис. 10.3 Построение блока из независимых моделей

*Второй способ* обработки независимых моделей основан на определении элементов внешнего ориентирования каждого звена относительно системы координат местности, минуя объединение их в свободную сеть. Формируемая при этом система уравнений включает по 7 неизвестных для каждого звена: для сети из  $m$  маршрутов по  $n$  звеньев возникает система, содержащая  $7mn$  уравнений. Для их определения составляют две группы уравнений, вытекающих из различных математических условий.

*Первая группа уравнений* составляется для опорных точек и соответствует условию равенства их координат, найденных по результатам геодезических измерений и путем преобразования фотограмметрических координат звена  $i$  по формулам (10.1):

$$\begin{vmatrix} X^0 \\ Y^0 \\ Z^0 \end{vmatrix}^i + \begin{pmatrix} b_1 & b_2 & b_3 \\ a_1 & a_2 & a_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix}^i \times \begin{vmatrix} X \\ Y \\ Z \end{vmatrix}^i \times t^i - \begin{vmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \end{vmatrix} = 0, \quad (10.1)$$

где верхний индекс группы элементов обозначает принадлежность их звену с номером  $i$ . Это соответствует условию

$$\left. \begin{aligned} \varphi_X^i(X_0, Y_0, Z_0, \xi, \eta, \theta, t, X, Y, Z) - X_r &= 0 \\ \varphi_Y^i(X_0, Y_0, Z_0, \xi, \eta, \theta, t, X, Y, Z) - Y_r &= 0 \\ \varphi_Z^i(X_0, Y_0, Z_0, \xi, \eta, \theta, t, X, Y, Z) - Z_r &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (10.2)$$

Аналогичные уравнения можно составить для центров фотографирования, координаты которых определены в полете.

*Вторая группа уравнений* составляется для связующих точек смежных звеньев и соответствует условию равенства их координат, перевычисленных в систему местности путем преобразования фотограмметрических координат связующих точек звеньев  $i$  и  $j$  с учетом направления координатных осей (все системы фотограмметрические) и элементов внешнего ориентирования соответствующих моделей:

$$\left[ \begin{vmatrix} X^0 \\ Y^0 \\ Z^0 \end{vmatrix} + \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix} \times t \times \begin{vmatrix} X \\ Y \\ Z \end{vmatrix} \right]^i - \left[ \begin{vmatrix} X^0 \\ Y^0 \\ Z^0 \end{vmatrix} + \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix} \times t \times \begin{vmatrix} X \\ Y \\ Z \end{vmatrix} \right]^j = 0 \quad (10.3)$$

(верхний индекс группы элементов по-прежнему обозначает принадлежность их звеньям с номерами  $i$  и  $j$ ). Это условие в общем виде представляется следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_X^i(X_0, Y_0, Z_0, \xi, \eta, \theta, t, X, Y, Z) - \varphi_X^j(X_0, Y_0, Z_0, \xi, \eta, \theta, t, X, Y, Z) &= 0 \\ \varphi_Y^i(X_0, Y_0, Z_0, \xi, \eta, \theta, t, X, Y, Z) - \varphi_Y^j(X_0, Y_0, Z_0, \xi, \eta, \theta, t, X, Y, Z) &= 0 \\ \varphi_Z^i(X_0, Y_0, Z_0, \xi, \eta, \theta, t, X, Y, Z) - \varphi_Z^j(X_0, Y_0, Z_0, \xi, \eta, \theta, t, X, Y, Z) &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (10.4)$$

Полученная система уравнений решается методом наименьших квадратов, под условием  $[vvp]=min$ , причем вес точки, по которой составляется уравнение, связывается с надежностью ее опознавания на снимке и точностью определения координат в системе местности. Неизвестные находят методом последовательных приближений, пока поправки к неизвестным или свободные члены уравнений не окажутся меньше заданного допуска. Точность внешнего ориентирования характеризуется величинами остаточных невязок на опорных точках и характером их распределения.

Пусть блок из  $m$  маршрутов по  $n$  моделей в каждом опирается на  $k$  опорных точек, в каждой модели имеется по шесть стандартно расположенных точек, а каждая из этих точек является связующей с предыдущей, последующей моделью или смежным маршрутом. В таком блоке возникает  $16mn - 6(n+2m) + 3k$  уравнений и  $7mn$  неизвестных. При уравнивании блока из трех маршрутов по 10 снимков в каждом, опирающемся на 12 опорных точек ( $m=3, n=10, k=12$ ) возникает 420 уравнений с 210 неизвестными.

#### Вопрос 10.4 Уравнивание связок проектирующих лучей

Важнейшей особенностью рассматриваемого способа, предложенного профессором А.Н. Лобановым в 1963 г., является одновременное построение и уравнивания фотограмметрической сети по всем снимкам обрабатываемого маршрута или блока. Сущность способа заключается в использовании математической зависимости между координатами  $X, Y, Z$  точки местности, координатами  $x, y$  ее изображения на снимке и элементами внешнего ориентирования снимка  $X_S, Y_S, Z_S, \alpha, \omega, \chi$ , выражающейся формулами:

$$\left. \begin{aligned} x &= -f \frac{a_1(X_M - X_S) + b_1(Y_M - Y_S) + c_1(Z_M - Z_S)}{a_3(X_M - X_S) + b_3(Y_M - Y_S) + c_3(Z_M - Z_S)} \\ y &= -f \frac{a_2(X_M - X_S) + b_2(Y_M - Y_S) + c_2(Z_M - Z_S)}{a_3(X_M - X_S) + b_3(Y_M - Y_S) + c_3(Z_M - Z_S)} \end{aligned} \right\}, \quad (10.5)$$

где  $a_i, b_i, c_i$  ( $i=1,2,3$ ) – направляющие косинусы, вычисляемые по угловым элементам внешнего ориентирования снимка;

$f$  – фокусное расстояние съёмочной камеры.

В общем случае эти формулы содержат 9 неизвестных, в том числе 6 элементов внешнего ориентирования снимка и 3 координаты точки. Обозначив приближенные значения этих неизвестных через  $X_S^0, Y_S^0, Z_S^0, \alpha^0, \omega^0, \chi^0, X^0, Y^0, Z^0$ , а поправки к ним – через  $\delta X_S, \delta Y_S, \delta Z_S, \delta \alpha, \delta \omega, \delta \chi, \delta X, \delta Y, \delta Z$ , запишем уравнения (10.5) в виде двух условий

$$\left. \begin{aligned} \varphi_x(X_S^0, Y_S^0, Z_S^0, \alpha^0, \omega^0, \chi^0, X^0, Y^0, Z^0) - x &= 0 \\ \varphi_y(X_S^0, Y_S^0, Z_S^0, \alpha^0, \omega^0, \chi^0, X^0, Y^0, Z^0) - y &= 0 \end{aligned} \right\}$$

и приведем их к линейному виду разложением в ряд Тейлора

$$\left. \begin{aligned} a_x \delta X_s + b_x \delta Y_s + c_x \delta Z_s + d_x \delta \alpha + e_x \delta \omega + f_x \delta \chi + \\ + g_x \delta X + h_x \delta Y + i_x \delta Z + l_x = v_x \\ a_y \delta X_s + b_y \delta Y_s + c_y \delta Z_s + d_y \delta \alpha + e_y \delta \omega + f_y \delta \chi + \\ + g_y \delta X + h_y \delta Y + i_y \delta Z + l_y = v_y \end{aligned} \right\}, \quad (10.6)$$

где  $l_x = (x) - x$ ;

$l_y = (y) - y$ ;

$a, b, \dots, i$  – элементы разложений в ряд Тейлора, представляющие собой частные производные от функций (10.5) по соответствующим неизвестным;

$(x), (y)$  – координаты определяемой точки на снимке, найденные по формулам (10.5) с использованием приближенных значений неизвестных;

$v_x, v_y$  – поправки к измеренным координатам.

Если известны координаты центров фотографирования, полученные с помощью систем GPS, то для каждого из них составляют три уравнения поправок вида

$$\delta X_s + l_x = v_x, \quad \delta Y_s + l_y = v_y, \quad \delta Z_s + l_z = v_z, \quad (10.7)$$

где  $l$  – разности приближенных и полученных с помощью GPS координат центров фотографирования.

Уравнения (10.6) составляют для всех точек снимков, включенных в фотограмметрическую сеть, а уравнения (10.7) – только для центров фотографирования с известными координатами. Если сеть состоит из  $m$  маршрутов по  $n$  снимков в каждой и в нее включено  $k$  исходных точек различного назначения, то всего в системе возникает  $6mn + 3k$  неизвестных. Поскольку каждая из  $k$  точек изображается на снимках от двух до шести раз, и каждый раз для нее составляется два уравнения (10.6), то общее число уравнений всегда больше числа неизвестных. Следовательно, система переопределена, и возможно ее решение под условием  $[vvp] = \min$ , методом наименьших квадратов. Веса измерений устанавливают в зависимости от надежности опознавания точек снимков, качества изображения и точности геодезического определения их координат.

Коэффициенты  $a, b, \dots, i$  уравнений (10.6) зависят от определяемых величин, поэтому при существенных отклонениях их начальных значений от уравненной система должна решаться методом приближений, в каждом из которых нужно уточнять как свободные члены уравнений, так и коэффициенты при неизвестных.

Таким образом, сходимость итерационного процесса определяется величинами отклонений начальных значений неизвестных от их точных (или уравненных) значений. По этой причине технология аналитической обработки фотограмметрических измерений предусматривает предварительное определение начальных значений неизвестных с точностью,

достаточной для начала итераций. В различных ситуациях это достигается различными средствами. Так, уравниванию связей предшествует построение маршрута (блока) способом полузависимых моделей или объединением независимых маршрутов; внешнему ориентированию маршрута или блока – определение приближенных значений неизвестных по ограниченному числу стандартно расположенных точек и т. д.

### Вопрос 10.5 Точность триангуляционных сетей

Отступления реальных изображений снимков от центральной проекции, погрешности нанесения точек на снимки и их измерений, несовершенство вычислительной обработки (например, плохая обусловленность систем уравнений) и др. неизбежно ведут к возникновению ошибок случайного и систематического характера. Однако основными сегодня остаются ошибки отождествления точек и их измерения, в той или иной степени, деформирующие все компоненты фотограмметрических построений – элементы взаимного ориентирования, фотограмметрическую модель, и, как следствие, фототриангуляционную сеть. Общие закономерности накопления этих ошибок, установленные профессором Г. В. Романовским еще в 1945 г., справедливы и для применяемых ныне аналитических и цифровых технологий построения фотограмметрических сетей

Для установления характера влияния *случайных* (независимых) ошибок в маршрутной сети, состоящей из  $n$  звеньев, допустим, что при построении первого из них возникает случайная ошибка  $\delta_1$ , которая скажется на масштабном коэффициенте, изменит величину второго и всех последующих базисов фотографирования, т. е. сохранится во всех последующих звеньях сети. Такая же ошибка появится во втором звене ( $\delta_2$ ), третьем ( $\delta_3$ ) и т. д., причем каждая из них сохранится во всех последующих. Таким образом, ошибки будут накапливаться

$$m_n^2 = \delta^2[1^2 + 2^2 + \dots + n^2] = \delta^2(n^3 + 3n^2 + n) / 6 \approx 0,333n^3\delta^2. \quad (10.8)$$

Накопление случайных ошибок в рассмотренном порядке происходит по всем трем координатным осям.

Характер накопления ошибок в соответствии с полученной формулой отражает кривая на рис. 10.4, где отрезок  $mm'$  соответствует ошибке в положении конечной точки, а  $lk'$  – средней точке сети. После внешнего ориентирования сети по опорным точкам на ее концах точки  $m$  и  $m'$  (рис. 10.4) совместятся, кривая  $ok'm$  займет положение  $ol'm'$ , а положение средней точки сети получит поправку, равную половине ошибки конечной точки.

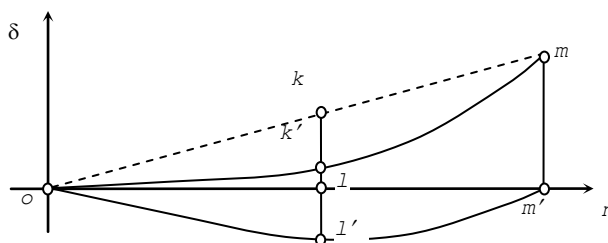


Рис. 10.4. Накопление ошибок в сети фототриангуляции

Поэтому для определения ожидаемых ошибок в середине ряда фототриангуляции в формуле (10.8) заменим  $n$  на  $n/2$ , результат разделим пополам и заменим дошибками, возникающими при построении одиночной модели:

$$m_D = 0,30mm_q\sqrt{n^3}, \quad m_Z = 0,23m\frac{f}{b}m_q\sqrt{n^3} \}, \quad (10.9)$$

где  $m_D, m_Z$  – ошибки построения сети в плане и по высоте;

$m$  – знаменатель масштаба аэрофотосъемки;

$m_q$  – средняя квадратическая ошибка измерения поперечного параллакса;

$f$  – фокусное расстояние съёмочной камеры;

$b$  – базис фотографирования на снимке.

При  $n=10$ ,  $m_q=0,01$  мм,  $f=b=70$  мм получим, что  $m_x=m_z=0,08$  мм,  $m_d=0,11$  мм и  $m_y=0,05$  мм в масштабе снимка.

Более строгие формулы оценки точности фототриангуляционных построений учитывают метод построения сети, число и схему размещения опорных точек, число точек на стереопаре при взаимном ориентировании и т. д. То же относится и к блочной фототриангуляции, точность которой в 1,5–2 раза выше точности маршрутной фототриангуляции.

Рассмотренный механизм накопления ошибок характерен как для аналитических, так и аналоговых сетей, построенных методом продолжений. Основой этого метода является последовательное подориентирование каждого последующего звена к предыдущему. Наиболее ясно и естественно этот метод реализован в способе полузависимых моделей, хотя та же идея в менее явном виде реализована и в способе независимых моделей.

Принципиально иной метод реализован в способах уравнивания связок проектирующих лучей, где накопление ошибок происходит по иным законам, что и приводит к повышению точности блочных построений в 1,5 и 2 раза в сравнении с маршрутными сетями.

Накопление *систематических* ошибок в сетях фототриангуляции происходит по тем же законам, что и при построении одиночной модели. Искажения, возникающие при построении пространственных фототриангуляционных сетей, описываются полиномами того или иного типа и устраняются по опорным точкам, размещенным парами в начале, середине и в конце секций расчетной длины. Технология их использования следующая:

вначале выполняется внешнее ориентирование сети по всем точкам, а затем устраняется систематическая деформация по остаточным невязкам на этих точках.

Эффективность применения полиномов определяется возможностями учета искажений изображения при внутреннем ориентировании. С появлением средств цифровой обработки таких изображений, повышением точности определения координат точек и учетом различного рода искажений применение полиномов потеряло смысл.

**Требования к густоте опорных точек.** Требования к числу и размещению опорных точек определяются способом построения пространственных сетей фототриангуляции, рассмотренными выше закономерностями накопления ошибок в этих сетях, параметрами аэрофотосъемки и условиями местности.

*Опорной точкой (опознаком)* называют любую контурную точку, опознанную на аэроснимке и местности, координаты которой определены по результатам геодезических измерений. В качестве таких точек используются углы изгородей, низких строений, перекрестков дорог, промоин, резких изгибов тропинок, канав, отдельные кусты и другие точки, которые можно бесспорно опознать и наколоть на аэроснимке с ошибкой не более 0,1 мм.

Процесс опознавания опорных точек и определения их координат геодезическими методами называется *привязкой аэроснимков*. При этом опорные точки могут быть определены только в плане, только по высоте или в плане и по высоте. В первом случае привязку называют *плановой*, во втором – *высотной*, а в третьем – *планово-высотной*.

Плановые координаты опорных точек определяют геодезическими методами – прямыми, обратными и комбинированными засечками или проложением теодолитных ходов, либо по результатам GPS-измерений. Высоты опорных пунктов определяют проложением, в зависимости от требуемой точности, ходов геометрического или тригонометрического нивелирования.

Опорные точки располагают в углах рабочей площади снимка, в зоне тройного продольного и поперечного перекрытий снимков, не ближе 1 см к их краям. Собственная высота контурной точки, выбираемой в качестве опорной, не должна приводить к линейному смещению, превышающему 0,1 мм. На местности эти точки должны быть доступны для геодезического определения.

Опорные точки могут обеспечивать либо каждый снимок, либо некоторое их количество. В первом случае речь идет о *сплошной* привязке, используемой для фотограмметрической обработки отдельных снимков или стереопар, а во втором – о *разреженной*. Сеть опорных точек, полученных при разреженной привязке, в дальнейшем сгущают путем построения сетей пространственной фототриангуляции с тем, чтобы в итоге обеспечить геодезическими данным каждый снимок или каждую стереопару.

Так, при создании топографических карт плоскоравнинных, равнинно-пересеченных и всхолмленных районов, в соответствии с требованиями

действующих инструкций, планово-высотные опознаки располагают поперек аэросъемочных маршрутов таким образом, чтобы на каждом маршруте было по одному опознаку каждого ряда (рис. 10.5).

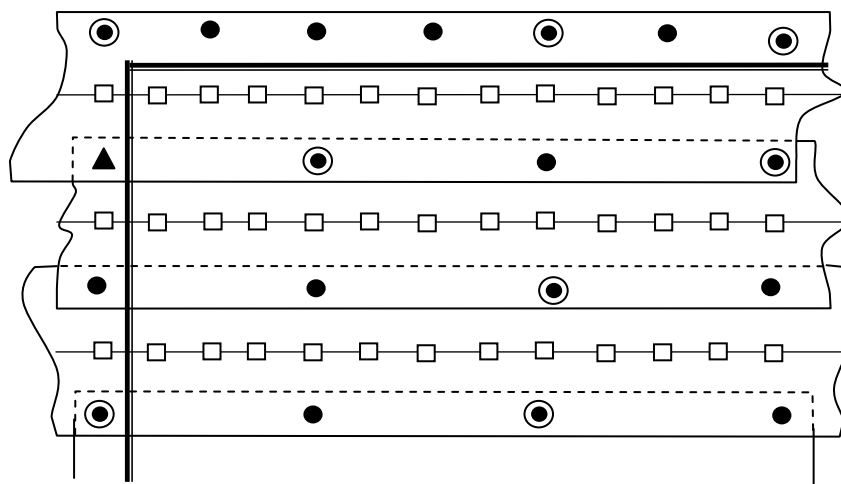






Рис. 10.5. Размещение опорных точек

Условные обозначения:

- |   |                        |   |                 |
|---|------------------------|---|-----------------|
|  | граница обработки;     |  | центр снимка;   |
|  | планово-высотная точка |  | высотная точка; |

Высотные опознаки размещают по такой же схеме, но в два раза гуще, чем планово-высотные. Для обеспечения сводок со смежными объектами по границам обработки плановые и высотные опознаки размещают в два раза гуще, чем рекомендовано действующими инструкциями.

Если параметры аэрофотосъемки или точность фотограмметрической обработки отличаются от рекомендуемых инструкциями, то расчет плотности опорных точек выполняют по формулам (10.9), исходя из конкретных значений этих параметров, точности фотограмметрического сгущения ( $m_D$ ,  $m_Z$ ) и следующих соображений.

Действующие инструкции по топографическим съемкам устанавливают, что средняя ошибка в положении четкой контурной точки равна 0,5 мм в масштабе карты (средняя квадратическая ошибка 0,6 мм). Ожидаемая средняя квадратическая ошибка планового сгущения должна быть в 2 раза меньше, т. е.  $m_D \leq 0,3$  мм. Подставив эту величину, коэффициент увеличения  $m/M$  и ошибку измерения  $m_q$  в формулу (10.9) легко определить число базисов фотографирования  $n$  между плановыми опорными точками. Например, при  $m=20\ 000$ ,  $M=10\ 000$ ,  $m_q=0,02$  мм найдем, что  $n=8$ .

Густоту высотных точек подсчитывают исходя из установленной нормативными документами средней ошибки определения высот точек по топографической карте, равной  $1/3$  сечения рельефа. Исходя из этого, легко найти среднюю квадратическую ошибку сгущения  $m_Z$  высот и расчетную густоту высотных опорных точек по формуле (10.9).

Так, при сечении рельефа через 2,5 м средняя квадратическая ошибка сгущения высот  $m_Z \leq 0,52$  м ( $0,5 \times 2,5/3 \times 1,25$ ). При  $m=20000$ ,  $M=10000$ ,

$f=b=100$  мм, и  $m_q=0,02$  мм по формуле (10.9) получим, что высотные опорные точки следует размещать через 2–3 базиса фотографирования.

В настоящее время геодезическое определение координат и высот опорных точек выполняют преимущественно на основе GPS-измерений, и их объем перестал быть определяющим. Поэтому опорные точки размещают в 2–4 раза гуще расчетного, что в итоге приводит к тому, что точность фотограмметрического сгущения оказывается сопоставимой с точностью полевых геодезических работ.

Практически каждое предприятие, выполняющее фотограмметрическую обработку материалов аэрофотосъемки, располагает типовыми схемами размещения опорных точек, разработанными применительно к принятой технологии выполнения работ, наличию оборудования, физико-географическим условиям территории и т. д.

### **Вопрос 10.6 Программы построения и уравнивания сетей фототриангуляции**

Для *аналитической фототриангуляции* могут использоваться программные средства двух типов.

1) Фототриангуляция встроена в общую автоматизированную фотограмметрическую систему обработки снимков на аналитическом или цифровом приборе (он-лайн). При этом программы фототриангуляции жестко связаны с внутренней информационной базой системы, и состав программ диктуется технологическими решениями, реализуемыми в этой системе. Целесообразно, чтобы информационная база системы содержала файлы измеренных координат точек снимков и других исходных данных, относящихся к фототриангуляции, в текстовом формате. Это позволит при необходимости переносить информацию в другие программные продукты для независимого контроля результатов обработки, сравнения различных систем и объективной оценки их. Отсутствие таких файлов в какой-либо системе должно служить предостерегающим сигналом в отношении принятия решения о ее использовании.

2) Комплексы программ для технологической обработки фотограмметрических измерений общего назначения, не накладывающие ограничения на приборы и методы сбора информации по снимкам (офф-лайн). Окончательные результаты вычислений должны быть пригодны для использования в любых обрабатывающих фотограмметрических приборах. Состав процедур и модулей таких комплексов должен позволять компилировать исполняемые файлы применительно как к задачам топографической съемки, так и к другим специальным задачам, в том числе и к проектированию работ.

Комплексы программ второго типа должны складываться, в свою очередь, из нескольких взаимно связанных компонентов. В минимальный перечень должны входить следующие компоненты:

- библиотечный, объединяющий программы составления и ведения библиотек геодезических проекций, измерительных приборов и съемочных камер;

- маршрутной фототриангуляции с программами подготовки исходных данных или заимствования их из других систем (аналитических или цифровых) и самой маршрутной фототриангуляции (с построением свободной и внешне ориентированной сети); сюда же могут входить дополнительные программы, обеспечивающие удобство анализа протоколов маршрутной фототриангуляции и сопоставления смежных маршрутных сетей;

- блочной фототриангуляции, включающей программы подготовки заданий на уравнивание блока, самого уравнивания различными способами и анализа протоколов счета;

- сервисный, включающий программы составления различных каталогов координат точек уравненной фототриангуляционной сети, а также программы подсчета установочных данных, упрощающих процедуры ориентирования одиночных снимков и стереопар на фотограмметрических приборах;

В комплексы программ могут входить и другие компоненты, например, исследовательский, позволяющий проверить, как влияет изменение каких-либо параметров фототриангуляционной сети на ее точность, и подобрать оптимальный вариант сети.

Программы аналитического построения и уравнивания фотограмметрических сетей, в соответствии с требованиями действующих нормативных документов, должны базироваться на строгих математических зависимостях (где они существуют), реализовывать всю геометрическую точность исходных аэроснимков или иных изображений и гарантировать решение задачи во всех случаях, где оно теоретически возможно. Эти программы должны обеспечивать:

- максимальную автоматизацию всех основных процессов – внутреннего, взаимного, внешнего ориентирования, построения сети и т. п. по произвольному числу точек;

- использование опорных точек, заданных в различных системах координат, а также представление в этих системах результатов обработки данных;

- обработку результатов неравноточных измерений;

- построение одномаршрутных, многомаршрутных сетей различными способами;

- получение возможно более полных протоколов обработки результатов измерений снимков и диагностики ошибок данных;

- использование данных, полученных в результате уравнивания, для дальнейшей обработки снимков с помощью любых обрабатывающих приборов и систем;

- построение фототриангуляционных сетей любых размеров;

- получение стабильных результатов при построении сетей независимо от масштаба снимков, физико-географических условий района и условий аэрофотосъемки.

Точность фотограмметрического сгущения должна определяться только геометрией уравниваемой сети и погрешностями исходных данных.