

УКД 528.14

Ужвиева Е.Н., канд. техн. наук

**АНАЛИЗ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ И УРАВНИВАНИЯ
ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ, ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ
АНАЛИТИЧЕСКИМ СПОСОБОМ**

Аннотация. В статье приведен анализ комбинированной обработки и уравнивания геодезических, фотограмметрических измерений аналитическим способом. Рассмотрен нормальный и равномерно отклоненный случай съемки. В качестве геодезической исходной информации используются горизонтальные и вертикальные углы измеренные теодолитом с двух точек базиса фотографирования на множество опорных маркированных точек.

Объект исследования – геодезические и фотограмметрические измерения.

Цель работы – обработка геодезических и фотограмметрических измерений.

Метод исследования – аналитический метод обработки геодезических и фотограмметрических измерений.

Ключевые слова: базис фотографирования, среднеквадратическая ошибка, фотограмметрические измерения, фотограмметрическая модель.

УКД 528.14

Ужвієва О.М., канд. техн. наук

**АНАЛІЗ КОМБІНОВАНОЇ ОБРОБКИ ТА УРІВНЮВАННЯ
ГЕОДЕЗИЧНИХ, ФОТОГРАМЕТРИЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ
АНАЛІТИЧНИМ СПОСОБОМ**

Анотація. У статті наведено аналіз комбінованої обробки і зрівнювання геодезичних, фотограмметричних вимірів аналітичним способом. Розглянуто нормальний і рівномірно відхилений випадок зйомки. В якості геодезичної початкової інформації використовуються горизонтальні і вертикальні кути виміряні теодолітом з двох точок базису фотографування на безліч опорних маркірованих точок.

Об'єкт дослідження - геодезичні і фотограмметричні виміри.

Мета роботи - обробка геодезичних і фотограмметричних вимірів.

Метод дослідження - аналітичний метод обробки геодезичних і фотограмметричних вимірів.

Ключові слова: базис фотографування, помилка середнеквадратична, фотограмметричні виміри, фотограмметрична модель.

UDC 528.14

Uzhviieva O.M., Cand. Eng. Sci. (Ph.D.)

THE ANALYSIS OF THE COMBINED PROCESSING AND EQUALIZING OF GEODETIC, PHOTOGRAMMETRIC MEASUREMENTS BY ANALYTICAL WAY

Abstract. In article the analysis of the combined processing and equalising geodetic, photogrammetric measurements by analytical way is resulted. The normal and in regular intervals rejected case of shooting is considered. As the geodetic initial information horizontal and vertical corners measured by a theodolite from two points of basis of photographing onset of the basic marked points are used.

Object of the study - geodetic and photogrammetric measurements.

Purpose of the study - processing geodetic and фотограмметрических measurements.

Method of the study - an analytical method of processing geodetic and photogrammetric measurements.

Keywords: basis of photographing, the srednekvadratichesky error, photogrammetrichesky measurements, photogrammetrichesky model.

Точность аналитической обработки стереопар зависит от многих факторов и прежде всего от точности определения геодезических координат опорных точек, а также от их количества и расположения в пределах перекрытия двух снимков.

В прикладной фотограмметрии в основном используется отдельный способ обработки и уравнивания геодезических и фотограмметрических измерений. Конечным результатом обработки геодезических измерений является определение координат опорных точек, которые в дальнейшем

используются как исходные данные для решения различных фотограмметрических задач для определения элементов внешнего ориентирования модели. В настоящее время в области прикладной наземной фотограмметрии широко используются высокоточные съемочные измерительные фотокамеры типа УМК-10/І318, УМК-20/І318 которые позволяют получать снимки, по точности соизмеримые с точностью геодезических измерений. Поэтому в таких случаях целесообразно использовать способ совместной обработки и уравнивания исходной информации, так как это в конечном итоге позволит повысить точность определения геодезических координат опорных точек и осуществить более объективную оценку точности решения фотограмметрических задач. В статье рассмотрен аналитический способ обработки и уравнивания геодезических и фотограмметрических измерений с оценкой точности полученных результатов. Сущность аналитического способа совместной обработки исходной информации заключается в решении задачи в два этапа, неразрывно связанных между собой [1,2].

На основе измеренных теодолитом горизонтальных и вертикальных углов на каждую опорную точку вычисляются координаты их изображений на так называемых «геодезических снимках», которые позволяют искусственным образом получить «геодезическую стереопару». «Геодезический снимок» представляет собой центральную проекцию опорных точек объекта съемки на сферу единичного радиуса (рис. 1).

На первом этапе выполняется обработка и уравнивание геодезической информации не по обычным геодезическим формулам, а по формулам двойной обратной фотограмметрической засечки, учитывающим проективные свойства связок проектирующих лучей следующим образом.

Координаты точек «геодезического снимка» связаны с измеренными горизонтальными и вертикальными углами направлений по формулам [1-4]

$$x = \cos \beta \cos \nu; y = \sin \beta \cos \nu; z = \sin \nu, \quad (1)$$

где β и ν – соответственно горизонтальный и вертикальный углы, измеренные теодолитом на данную опорную точку;

x, y, z – координаты опорной точки на «геодезическом снимке».

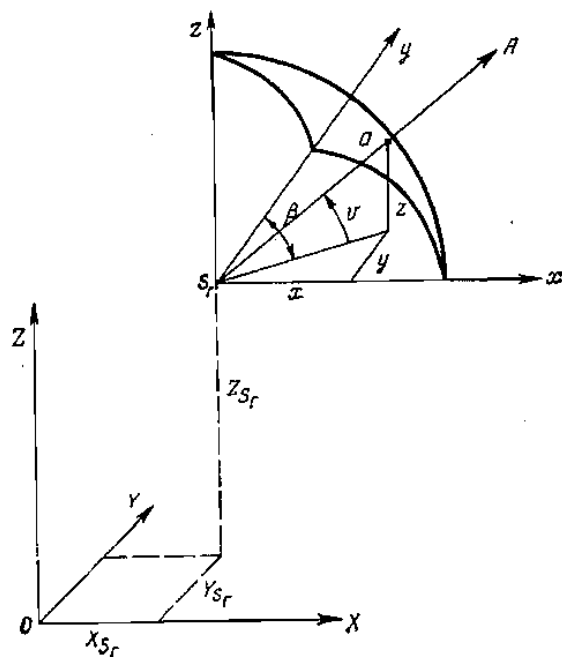


Рисунок 1 – Центральная проекция опорных точек объекта съемки на сферу единичного радиуса

Система координатных осей «геодезического снимка» S_{xyz} определяется ориентацией теодолита. Ось z близка к вертикали, а оси x и y определяются положением шкалы горизонтального круга. Для того чтобы система координат «геодезического снимка» была близка к системе координат фотоснимка нормального случая наземной стереосъемки, необходимо при наведении визирной оси теодолита на другой конец базиса иметь отсчет по горизонтальному кругу 90° и 270° соответственно на левом, и правом концах базиса фотографирования. Все элементы внутреннего ориентирования «геодезического снимка» в этом случае равны нулю. Элементами внешнего ориентирования «геодезического снимка» являются координаты центра проекции (точки S_r) в системе координат объекта ($OXYZ$), и углы α , ω , χ , и последовательных поворотов вокруг осей z , x , y . Элементами внешнего ориентирования «геодезического снимка» однозначно определяют положение и ориентацию его координатной системы в системе координат объекта $OXYZ$. В качестве последней можно использовать координатную систему одного из «геодезических снимков» или принять систему координат, связанную с характерными точками, линиями, плоскостями объекта съемки. В первом случае элементы внешнего ориентирования этого снимка становятся равными нулю, что упрощает вычислительный процесс.

Вычисленные по формуле (1) координаты точек «геодезических снимков» сначала используются для определения их элементов взаимного ориентирования, а затем для вычисления координат точек «геодезической модели».

Элементы взаимного ориентирования «геодезических снимков» могут определяться в базисной системе координат или в системе координат левого снимка. В базисной системе координат вычислительный процесс упрощается, и поэтому ее целесообразно использовать в данном случае, т. е. задача решается согласно условию [1]

$$\Phi = Y_1'Z_2' - Z_1' - Y_2'. \quad (2)$$

В функции (2) пространственные координаты точек на левом (X_1', Y_1', Z_1') и правом (X_2', Y_2', Z_2') «геодезических снимках» связаны с соответствующими им плоскими координатами следующими соотношениями

$$\begin{bmatrix} X_1' \\ Y_1' \\ Z_1' \end{bmatrix} = A_{\alpha_1' \chi_1'} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} X_2' \\ Y_2' \\ Z_2' \end{bmatrix} = A_{\alpha_2' \omega_2' \chi_2'} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

В свою очередь элементы матриц поворота левого $A_{\alpha_1' \chi_1'}$ и правого $A_{\alpha_2' \omega_2' \chi_2'}$ снимков вычисляются по соответствующим угловым приближенным элементам взаимного ориентирования на основе известных формул направляющих косинусов.

Используя выражение (2), можно составить следующее уравнение поправок [5]

$$a\delta\alpha_1' + b\delta\chi_1' + c\delta\alpha_2' + d\delta\omega_2' + f\delta\chi_2' + l = v, \quad (4)$$

где a, b, c, d, f – частные производные от функции (2) по соответствующим переменным $\alpha_1', \chi_1', \alpha_2', \omega_2', \chi_2'$;

$\delta\alpha_1', \delta\chi_1', \delta\alpha_2', \delta\omega_2', \delta\chi_2'$ – поправки к неизвестным элементам взаимного ориентирования;

l – свободный член уравнения поправок, т. е. значение функции (2), определенное по приближенным значениям элементов взаимного ориентирования [4].

Таким образом, одна опорная геодезическая точка позволяет составить одно уравнение поправок вида (4) с 5 неизвестными, поэтому, для того чтобы решить задачу, необходимо пять опорных точек, размещенных по краям «геодезической стереопары». Обычно используется большее количество опорных точек (например, $n = 6-18$), для них составляют, согласно выражению (4), систему уравнений, которую можно представить в матричном виде как [6]

$$AX + L = V, \quad (5)$$

где

$$A = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & d_1 & f_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 & d_2 & f_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_n & b_n & c_n & d_n & f_n \end{bmatrix}; X = \begin{bmatrix} \delta\alpha'_1 \\ \delta\chi'_1 \\ \delta\alpha'_2 \\ \delta\omega'_2 \\ \delta\chi'_2 \end{bmatrix}; L = \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ \vdots \\ l_n \end{bmatrix}; V = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix}.$$

Определение элементов взаимного ориентирования по способу наименьших квадратов выполняется согласно выражению

$$\Delta X = -(A^T P A)^{-1} A^T P L. \quad (6)$$

В каждой последующей итерации используются элементы взаимного ориентирования, исправленные за найденные в предыдущей итерации поправки. В результате решения задачи должны быть определены окончательные значения элементов взаимного ориентирования.

В последнем приближении вычисляются квадрат ошибки единицы веса по формуле [6]

$$\mu^2 = \frac{V^T P V}{n-5}. \quad (7)$$

И дисперсионно-ковариационная матрица элементов взаимного ориентирования по формуле

$$D(\Delta X) = \mu^2 (A^T P A)^{-1}. \quad (8)$$

Свободные члены в последнем приближении не должны превышать удвоенного значения и ошибки единицы веса μ . Если они превышают 2μ на отдельных точках, то это свидетельствует о недопустимых ошибках в угловых геодезических измерениях на опорные точки. В тех случаях, когда ошибки не удается обнаружить на этих отдельных точках, их исключают из повторных вычислений.

Вычисление координат точек «геодезической модели» осуществляется по формуле

$$R_{\Gamma} = 0,5(N_1 R'_1 + N_2 R'_2 + B), \quad (9)$$

где B – модуль базиса фотографирования.

При определении координат точек геодезической модели уточняется ее масштаб по измеренным на объекте отрезкам по формулам

$$t_i = |L_i| (\Delta X_i^2 + \Delta Y_i^2 + \Delta Z_i^2)^{-1/2}; \quad I = \frac{I}{\sum_1^n |L_i| + |B|}, \quad (10)$$

где t — масштабный коэффициент;

$i = 1, 2, \dots, n$ – номера отрезков;

$\Delta X_i, \Delta Y_i, \Delta Z_i$ – разности координат между концами отрезков;

$|L_i|$ – модуль отрезка;

$|B|$ – модуль базиса.

Используя масштабный коэффициент вводят поправки в вычисленные координаты точек геодезической модели по формулам

$$X_{\Gamma} = Xt; Y_{\Gamma} = Yt; Z_{\Gamma} = Zt, \quad (11)$$

где $X_{\Gamma}, Y_{\Gamma}, Z_{\Gamma}$ – координаты геодезической модели, исправленные за масштаб;

x, y, z – координаты точек геодезической модели, вычисленные по формуле (9).

На втором этапе производится обработка и уравнивание фотограмметрической исходной информации. При этом измерения фототеодолитных снимков рекомендуется выполнять на автоматизированных прецизионных стереокомпараторах с инструментальными ошибками порядка 0,002 мм. Определение инструментальной точности стереокомпаратора по методике [4] должно предшествовать измерению снимков на приборе.

Стереоскопические измерения опорных маркированных точек, определяемых и связующих точек, а также координатных меток должно осуществляться в два обхода. За окончательные значения измеренных координат принимаются их среднеарифметические значения. Результаты стереоскопических измерений фототеодолитных снимков используются в дальнейшем для решения задач, связанных с внутренним ориентированием снимков, определения элементов взаимного ориентирования снимков, построения фотограмметрической модели и внешнего ориентирования модели.

Внутреннее ориентирование снимков осуществляется по формулам

$$\left. \begin{aligned} x &= MO_x + a_{11}x' + a_{12}z' \\ z &= MO_z + a_{21}x' + a_{22}z' \end{aligned} \right\}, \quad (12)$$

где x, z – исправленные координаты точек;

x', z' – измеренные на приборе координаты точек снимка;

$a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}$ – коэффициенты аффинного преобразования;

MO_x, MO_z – постоянные величины.

Систему уравнений, составленную для четырех и более измеренных координатных меток, согласно (12), можно представить в матричном виде [4]

$$BX + L = V, \quad (13)$$

Система уравнений (13) решается аналогичным образом как система уравнений (5) под условием $V^T P V = \min$, т. е.

$$\Delta X = -(B^T P B)^{-1} B^T P L, \quad (14)$$

а ошибка квадрата единицы веса в этом случае будет равна [4-6]

$$\mu^2 = \frac{V^T P V}{2n - 6}. \quad (15)$$

Определение элементов взаимного ориентирования фототеодолитных снимков и вычисление координат точек фотограмметрической модели

осуществляется по аналогичной методике с использованием тех же формул, которые изложены выше для «геодезических снимков», т. е. по формулам (5) и (9).

Внешнее ориентирование фотограмметрической модели производится по опорным точкам, на основе выражений (11) с использованием в этом случае методики и формул, подробно изложенных в [4]. В [4] подробно изложена методика и формулы, по которым осуществляется переход от фотограмметрических координат к геодезическим.

При определении веса P^Γ геодезических и веса P^Φ фотограмметрических определений координат точек, то можно найти средневесовое значение координат опорных точек и охарактеризовать в отдельности точность определения координат точек геодезической и внешне ориентированной фотограмметрической модели. Для этой цели целесообразно воспользоваться квадратами ошибок единицы веса по способу наименьших квадратов в процессе оценок элементов взаимного ориентирования геодезических и фототеодолитных снимков, а именно [6]

$$P^\Gamma = K / \mu^{\Gamma 2}; P^\Phi = K / \mu^{\Phi 2}, \quad (16)$$

где K — коэффициент пропорциональности.

Известно, что в этом случае вес функции можно определить по формуле

$$P^{\Gamma\Phi} = 1 / \mu_z^2. \quad (17)$$

Использование в (17) μ_z^2 обусловлено тем, что среднеквадратические значения вертикальных параллаксов $q = (z_1 - z_2)$.

Средневесовое значение координат опорных маркированных точек определяется по формулам [4,6]

$$X_c = \frac{X^\Gamma P^\Gamma + X^\Phi P^\Phi}{P^\Gamma + P^\Phi}; Y_c = \frac{Y^\Gamma P^\Gamma + Y^\Phi P^\Phi}{P^\Gamma + P^\Phi}; Z_c = \frac{Z^\Gamma P^\Gamma + Z^\Phi P^\Phi}{P^\Gamma + P^\Phi}. \quad (18)$$

Среднеквадратические ошибки координат геодезической модели подсчитываются по формуле

$$m_i^\Gamma = (\mu_i \mu^\Gamma) / (\mu^{\Gamma 2} + \mu^{\Phi 2})^{1/2}. \quad (19)$$

Среднеквадратические ошибки координат точек фотограмметрической модели подсчитываются по формуле

$$m_i^\Phi = (\mu_i \mu^\Gamma) / (\mu^{\Gamma^2} + \mu^{\Phi^2})^{1/2}. \quad (20)$$

Среднеквадратическая ошибка координат точек средневесовой модели подсчитывается по формуле

$$m_{i_c} = (m_i^{\Gamma^2} + m_i^{\Phi^2})^{1/2} = \frac{m_i^\Gamma}{(1 + \mu^{\Gamma^2} / \mu^{\Phi^2})^{1/2}}.$$

Анализ теории аналитического способа обработки геодезических и фотограмметрических измерений. Рассмотрен; нормальный и равномерно отклоненный случай съемки. В качестве геодезической исходной информации используются горизонтальные и вертикальные углы измеренные теодолитом с двух точек базиса фотографирования на множество опорных точек.

Обработка снимков выполняется двумя аналитическими способами:

- отдельный способ обработки геодезической и фотограмметрической исходной информации;
- комбинированной обработки геодезических и фотограмметрических измерений.

Литература

1. Лобанов А. Н. Фотограмметрия: Учебник для вузов. 2 е изд., перераб. и доп./ А.Н. Лобанов. – М.: Недра, 1984. – 552 с.
2. Большаков В. Д., Гайдаев П. А. Теория математической обработки геодезических измерений./ В. Д. Большаков, П. А. Гайдаев. – М.: – Недра, – 1977. – 267 с.
3. Киенко Ю. П. Аналитические методы определения координат в наземной стереофотограмметрии / Ю. П. Киенко. – М.: – Недра, – 1972. – 395 с.
4. Назаров А.С. Фотограмметрия: учеб. пособие для студентов вузов / А.С. Назаров. – Мн.: ТетраСистемс, 2006. – 368 с.
5. Машимов М. М. Уравнивание геодезических сетей.— М.: Недра, 1989. – 267 с.
6. Яковлев Н. В. Высшая геодезия: Учебник для вузов / Н.В. Яковлев. – М.: Недра, 1989.– 445 с.

Рецензенти:

Павлюк Д.О., д-р техн. наук, Національний транспортний університет.
Гончаренко Ф.П., канд. техн. наук, ДП "Укрдіпроддор".

Reviewers:

Pavliuk D.O., Dr. Tech. Sci., National Transport University.
Honcharenko F.P., Cand. Eng. Sci. (Ph.D.), "Ukrdiprodor".

Стаття надійшла до редакції: **06.03.2017 р.**