

Взаимное ориентирование аэроснимков с оптимальным сочетанием угловых элементов в стереопаре

Н.Ф. Добрынин, Т.М. Пимшина

Ростовский государственный университет путей сообщения

Аннотация: Рассмотрен возможный вариант взаимного ориентирования аэроснимков с оптимальным выбором угловых элементов.

Ключевые слова: Фотограмметрия, условия компланарности, оптимальное сочетание элементов взаимного ориентирования, корреляционные связи.

Отрасль геодезии и картографии переживает непростые времена. Состояние предприятий, особенно финансовое, объединенных в ОАО «Роскартография» еще в 2012 году [1], из-за допущенных промахов проработки Концепции развития отрасли до 2020 года [2] достаточно тяжелое. По признанию работников Росреестра [3] реализовано лишь 15% от всех предусмотренных Концепцией мероприятий.

Однако научные исследования в отрасли геодезии и картографии, может быть в меньшей степени из-за отсутствия дополнительного финансирования со стороны ОАО «Роскартографии», продолжаются. Остановимся лишь на совершенствовании методов взаимного ориентирования аэроснимков и построении одиночной модели.

Все настойчивее традиционному методу построения модели по паре снимков ставится в альтернативу предложенный еще в конце прошлого столетия проф. М.С. Урмаевым [4] новый принцип реализации уравнений коллинеарности и компланарности на основе аппарата алгебры кватернионов. Например, в работах В.М. Безменова [5, 6] (Казанский федеральный университет) приведены алгоритмы реализации некоторых уравнений фотограмметрии названным способом. Однако, как уже указывалось в работе авторов данной статьи [7], пока далее возможности использования алгебры кватернионов в фотограмметрии по нашим данным

сведений нет. Остается ждать дальнейших практических результатов, чтобы выявить достоинства этого подхода к решению фотограмметрических задач.

Сделана попытка «реанимировать» предложенный докт. техн. наук, проф. В.Б. Дубиновским (Московский государственный университет геодезии и картографии) метод калибровки снимков реализацией только условий компланарности, т.е. без использования опорных данных. Позднее было установлено, что такой подход полностью не решает поставленную задачу. Однако в работе [8] предпринята новая попытка отказаться от создания дорогостоящего полигона с опорными геодезическими точками, а найти более простое решение. Авторы данной публикации полностью согласны с позицией докт. техн. наук, проф. И.Т. Антипова (Сибирская государственная геодезическая академия), изложенной в его работе [9], в которой он последовательно и убедительно показал несостоятельность приведенных в статье [8] выводов и предложений.

К взаимному ориентированию аэроснимков на протяжении всей истории развития фотограмметрии уделялось и уделяется в настоящее время пристальное внимание. Во-первых, в результате взаимного ориентирования снимков стереопары создается модель сфотографированного объекта. Во-вторых, от надежности решения этой фундаментальной задачи фотограмметрии зависит точность окончательных результатов обработки стереопары.

Обращаясь к точности определения элементов взаимного ориентирования (ЭВЗО), необходимо заметить, что кроме известных факторов, влияющих на точность взаимного ориентирования снимков (дисторсия объектива АФА, деформация, погрешности измерительного прибора и т.д.), замечены корреляционные связи между ошибками самих ЭВЗО. Причем коэффициенты корреляции варьируют в зависимости от выбора фотограмметрической системы координат, в пространстве которой

ведется определение ЭВЗО. Связано это с различным сочетанием угловых элементов, которое обусловлено как раз выбором фотограмметрической системы координат. Например, в базисной системе элементов наибольшая корреляционная связь замечена между углами α и χ как левого, так и правого снимков стереопары. Предлагаемый ниже вариант взаимного ориентирования снимков практически свободен от взаимных корреляционных связей ЭВЗО.

Для взаимного ориентирования аэроснимков используем следующие ЭВЗО: ω_1, χ_1 для левого и α_2 и χ_2 для правого снимков стереопары, а также угол наклона базиса фотографирования (проектирования) ν . Остальные углы (τ, α_1 и ω_2) должны быть нулевыми. Такая ситуация возникнет в том случае, если фотограмметрическую систему координат, в пространстве которой будет осуществляться взаимное ориентирование аэроснимков, назначить следующим образом:

- начало системы в левой точке фотографирования (S_1);
- плоскость ZX совместить с главной базисной плоскостью правого снимка (проходит через базис фотографирования и главный луч правого снимка стереопары);
- плоскость ZY направить через главный луч левого снимка перпендикулярно плоскости ZX .

При таком выборе фотограмметрической системы координат базисные компоненты (B_X, B_Y, B_Z) получают следующие значения:

$$\left. \begin{aligned} B_X &= X_{S_2} - X_{S_1} = B \cos \nu; \\ B_Y &= Y_{S_2} - Y_{S_1} = 0; \\ B_Z &= Z_{S_2} - Z_{S_1} = B \sin \nu, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где B – базис фотографирования;

ν – угол его наклона относительно плоскости XY .

Традиционное условие пересечения соответственных (одноименных) проектирующих лучей в координатной форме в виде определителя третьего порядка примет вид

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & \operatorname{tg} \nu \\ X'_1 & Y'_1 & Z'_1 \\ X'_2 & Y'_2 & Z'_2 \end{vmatrix} = 0,$$

или, раскладывая его по элементам первой строки,

$$(X'_1 Y'_2 - Y'_1 X'_2) \operatorname{tg} \nu + (Y'_1 Z'_2 - Z'_1 Y'_2) . \quad (2)$$

Здесь X' , Y' , Z' – пространственные координаты точки на левом и правом снимках стереопары в пространственных прямоугольных системах с началами в точках фотографирования (S_1 и S_2) и осями, параллельными одноименным осям фотограмметрической системы.

Направляющие косинусы, являющиеся функциями углов ω_1 , χ_1 , α_2 , χ_2 , примут следующие значения:

$$\left. \begin{aligned} a_{11} &= \cos \chi_1; & a_{21} &= \cos \alpha_2 \cos \chi_2; \\ a_{12} &= -\sin \chi_1; & a_{22} &= -\cos \alpha_2 \sin \chi_2; \\ a_{13} &= 0; & a_{23} &= \sin \alpha_2; \\ b_{11} &= \cos \omega_1 \sin \chi_1; & b_{21} &= \sin \chi_2; \\ b_{12} &= \cos \omega_1 \cos \chi_1; & b_{22} &= \cos \chi_2; \\ b_{13} &= -\sin \omega_1; & b_{23} &= 0; \\ c_{11} &= \sin \omega_1 \sin \chi_1; & c_{21} &= -\sin \alpha_2 \cos \chi_2; \\ c_{12} &= \sin \omega_1 \cos \chi_1; & c_{22} &= \sin \alpha_2 \sin \chi_2; \\ c_{13} &= \cos \omega_1; & c_{23} &= \cos \alpha_2, \end{aligned} \right\}$$

а связь между пространственными и плоскими (x , y) координатами точки на стереопаре будет выглядеть так:

$$\left. \begin{aligned} X'_1 &= x_1 \cos \chi_1 - y_1 \sin \chi_1; \\ Y'_1 &= x_1 \sin \omega_1 \sin \chi_1 + y_1 \cos \omega_1 \cos \chi_1 + f \sin \omega_1; \\ Z'_1 &= x_1 \sin \omega_1 \sin \chi_1 + y_1 \sin \omega_1 \cos \chi_1 - f \cos \omega_1; \\ X'_2 &= x_2 \cos \alpha_2 \cos \chi_2 - y_2 \cos \alpha_2 \sin \chi_2 - f \sin \alpha_2; \\ Y'_2 &= x_2 \sin \chi_2 + y_2 \cos \chi_2; \\ Z'_2 &= -x_2 \sin \alpha_2 \cos \chi_2 + y_2 \sin \alpha_2 \sin \chi_2 - f \cos \alpha_2, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где f – фокусное расстояние снимков стереопары.

Выражение (2) является уравнением взаимного ориентирования снимков стереопары в назначенной (целенаправленно выбранной) фотограмметрической системе координат. Уравнение строгое и может использоваться для определения любых значений угловых ЭВЗО. В то же время оно тригонометрическое (нелинейное) и содержит пять неизвестных, для вычисления которых необходимо в пределах продольного перекрытия аэроснимков измерить плоские координаты (x_1, y_1, x_2, y_2) как минимум пяти точек стереопары. Решают такую систему уравнений, как правило, методом Ньютона через приближенные значения определяемых неизвестных. При избыточном числе уравнений (измерены плоские прямоугольные координаты более пяти точек стереопары) применяют метод наименьших квадратов. Рассмотрим параметрический способ реализации метода Ньютона.

Пусть нам известны предварительные (приближенные) величины ЭВЗО (v) , (ω_1) , (χ_1) , (α_2) и (χ_2) и измерены плоские координаты соответственных (одноименных) точек стереопары. При этом $n > 5$ (n – число точек для определения ЭВЗО), а поправки к предварительным значениям неизвестных обозначим δv , $\delta \omega_1$, $\delta \chi_1$, $\delta \alpha_2$ и $\delta \chi_2$. Тогда традиционно уравнения поправок, соответствующих исходному выражению (2), примут следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} a_1 \delta v + b_1 \delta \omega_1 + c_1 \delta \chi_1 + d_1 \delta \alpha_2 + e_1 \delta \chi_2 + l_1 &= v_1; \\ a_2 \delta v + b_2 \delta \omega_1 + c_2 \delta \chi_1 + d_2 \delta \alpha_2 + e_2 \delta \chi_2 + l_2 &= v_2; \\ \text{-----} & \\ a_n \delta v + b_n \delta \omega_1 + c_n \delta \chi_1 + d_n \delta \alpha_2 + e_n \delta \chi_2 + l_n &= v_n, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где a, b, c, d, e – коэффициенты, являющиеся частными производными первого порядка от выражения (2) по переменным $\nu, \omega_1, \chi_1, \alpha_2$ и χ_2 , а свободные члены l_i вычисляются подстановкой в уравнение (2) приближенных значений определяемых ЭВЗО и вычисленных по ним (формулы (3)) пространственных координат соответственных точек стереопары.

Вычислим несколько коэффициентов для уравнений поправок (4), например, a и b .

Коэффициент a вычисляется просто:

$$a = \frac{\partial F}{\partial \nu} = (X'_1 Y'_2 - Y'_1 X'_2) \sec^2 \nu,$$

так как во втором слагаемом функции (2) нет переменной ν (частная производная будет равна нулю), нет ее и в пространственных координатах соответственных точек стереопары, которые здесь играют роль лишь коэффициентов при указанном выше определяемом неизвестном.

Чтобы вычислить коэффициент b сначала найдем частные производные для первых трех выражений в формулах (3), в которые входит ЭВЗО ω_1 :

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial X'_1}{\partial \omega_1} &= 0 \quad \left(\text{не участвует элемент } \omega_1 \text{ при вычислении } X'_1 \right); \\ \frac{\partial Y'_1}{\partial \omega_1} &= -x_1 \sin \omega_1 \sin \chi_1 - y_1 \sin \omega_1 \cos \chi_1 + f \cos \omega_1 = -Z'_1; \\ \frac{\partial Z'_1}{\partial \omega_1} &= x_1 \sin \omega_1 \sin \alpha_1 \sin \chi_1 + y_1 \cos \omega_1 \cos \chi_1 + f \sin \omega_1 = Y'_1. \end{aligned} \right\}$$

Пространственные координаты точки на правом снимке стереопары будут выступать константами в общем дифференциале функции (2), поскольку в вычислениях этих координат не используется ω_1 .

Таким образом, для коэффициента b получим следующий результат:

$$b = \frac{\partial F}{\partial \omega_1} = Z'_1 (X'_2 \operatorname{tg} \nu - Z'_2) - Y'_1 Y'_2.$$

Аналогично вычисляются частные производные (коэффициенты уравнений (4)) по остальным переменным. В результате получим недостающие для уравнений поправок (4) коэффициенты:

$$c = \frac{\partial F}{\partial \chi_1} = \left[-Y_2' (x_1 \sin \chi_1 + y_1 \cos \chi_1) - X_2' (x_1 \cos \chi_1 - y_1 \sin \chi_1) \cos \omega_1 \right] \operatorname{tg} \nu + (x_1 \cos \chi_1 - y_1 \sin \chi_1) (Z_2' \cos \omega_1 - Y_2' \sin \omega_1);$$

$$d = \frac{\partial F}{\partial \alpha_2} = Y_1' Z_2' \operatorname{tg} \nu - Y_1' X_2';$$

$$e = \frac{\partial F}{\partial \chi_2} = (x_2 \cos \chi_2 - y_2 \sin \chi_2) (X_1' \operatorname{tg} \nu - Z_1') + (x_2 \sin \chi_2 + y_2 \cos \chi_2) (Y_1' \operatorname{tg} \nu \cos \alpha_2 + Y_1' \sin \alpha_2)$$

Составленную систему уравнений поправок (4) при $n > 5$ решают под условием

$$[\nu] = \min,$$

т.е. с использованием метода наименьших квадратов.

Поскольку в результате взаимного ориентирования аэроснимков, вообще говоря, создается модель сфотографированного объекта, приведем формулы для вычисления пространственных фотограмметрических координат точек этой модели:

$$X = N X_1';$$

$$Y = N Y_1';$$

$$Z = N Z_1',$$

где множитель N для любой (правой) фотограмметрической системы координат можно вычислить по следующей универсальной формуле [10]:

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

Процесс взаимного ориентирования с новыми коэффициентами в уравнениях поправок (4) проверен по макетным снимкам. Максимальный коэффициент корреляции, как и ожидалось, выявлен между ошибками в

углах α_2 и χ_2 и составил +0,23, т.е. по нашим данным ниже, чем при других сочетаниях ЭВзО.

Литература:

1. Указ Президента Российской Федерации «Об открытом акционерном обществе «Роскартография»» от 12.03.2012 г. № 296 // Собрание актов Президента и Правительства Российской Федерации.

2. Распоряжение Правительства Российской Федерации «Об утверждении Плана мероприятий по реализации Концепции развития отрасли геодезии и картографии до 2020 г.» от 07.07.2011 г. № 1177-р // Собрание актов Президента и Правительства Российской Федерации.

3. Васильев И.В., Коробов А.В., Побединский Г.Г., Приданкин А.Б. Топографо-геодезическое и картографическое обеспечение Российской Федерации. Состояние и перспективы развития отрасли геодезии и картографии // Геодезия и картография. 2014. №12. С. 2-11.

4. Урмаев М.С. Применение алгебры кватернионов в фотограмметрии // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 1986. №2. С. 81-90.

5. Безменов В.М. Элементы кватернионов в фотограмметрии // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2009. №4. С. 48-56.

6. Безменов В.М. Применение кватернионов в фотограмметрии // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2014. №5. С. 22-27.

7. Добрынин Н.Ф., Пимшина Т.М. Взаимное ориентирование снимков с новым сочетанием угловых элементов в стереопаре // «Инженерный вестник Дона», 2014, № 2 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2014/2347.

8. Семенцов А.В. Калибровка камер без использования твердых опорных данных // Геодезия и картография. 2014. №4. С. 26-30.

9. Антипов И.Т. Калибровка камер без использования твердых опорных данных (рецензия) // Геодезия и картография. 2014. №7. С. 59-60.



10. Добрынин Н.Ф., Пимшина Т.М. Использование космических средств позиционирования при обработке аэро- и космической информации // «Инженерный вестник Дона», 2013, № 3 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1835.

11. Lu Dengsheng, Moran Emilio, Hetrick Scott. Detection of impervious surface change with multitemporal Landsat images in an urban- rural frontier // ISRRS J. Photogramm. and Remote Sens, 2011. 66, № 3. pp. 298-306.

12. Balci Murat, Foroosh Hassan. Subpixel estimation of shifts directly in the Fourier domain //IEEE Trans. Image Process, 2006. 15, - № 7. pp. 1965-1972.

References

1. Ukaz Prezidenta Rossijskoj Federacii ot 12.03.2012 g. № 296. Sobranie aktov Prezidenta i Pravitel'stva Rossijskoj Federacii.

2. Rasporjazhenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 07.07.2011 g. № 1177-r. Sobranie aktov Prezidenta i Pravitel'stva Rossijskoj Federacii.

3. Vasil'ev I.V., Korobov A.V., Pobedinskij G.G., Pridankin A.B. Geodezija i kartografija. 2014. №12. pp. 2-11.

4. Urmaev M.S. Izv. vuzov «Geodezija i ajerofotos'emka». 1986. №2. pp. 81-90.

5. Bezmenov V.M. Izv. vuzov «Geodezija i ajerofotos'emka». 2009. №4. pp. 48-56.

6. Bezmenov V.M. Izv. vuzov «Geodezija i ajerofotos'emka». 2014. №5. pp. 22-27.

7. Dobrynin N.F., Pimshina T.M. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2014, № 2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2014/2347.

8. Semencov A.V. Geodezija i kartografija. 2014. №4. pp. 26-30.

9. Antipov I.T. Geodezija i kartografija. 2014. №7. pp. 59-60.



10. Dobrynin N.F., Pimshina T.M. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №3
URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1835.

11. Lu Dengsheng, Moran Emilio, Hetrick Scott. Detection of impervious surface change with multitemporal Landsat images in an urban- rural frontier. ISRRS J. Photogramm. and Remote Sens, 2011. 66, № 3. pp. 298-306.

12. Balci Murat, Foroosh Hassan. Subpixel estimation of shifts directly in the Fourier domain. IEEE Trans. Image Process, 2006. 15, № 7. pp. 1965-1972.