

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ТОЧЕК ПО ОДИНОЧНОМУ АЭРОСНИМКУ И РАСТРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА

Н. Ф. Добрынин, Т. М. Пимшина

Determining of position data based on single aerial view and bitmap model of relief

N. F. Dobrynin, T. M. Pimshina

One of the options of combined photogrammetric plotting of single shot and digital model of the aerial view object (DMBO) for solving spatial tasks was examined. Tasks of this type occur (or might occur) during updating of topographical maps, solving engineering and science-application tasks. The latter ones are monitoring of environment, studying of modern active volcanism, reconstruction based on shots of geological processes and list of other tasks. Principle of detecting spatial coordinates of the point based on single shot is quite simple: all you have to do is make equations of the projecting ray and surface close to its meeting with digital microprocessor-based oscilloscope. However realization of this principle becomes complicated by the fact that in order to determine the plane coordinates of meeting point you have to know its height above a specific horizontal plane (or level of Baltic Sea), in order to find the elevation of this point, it is impossible to do it without plane coordinates. Furthermore there is a certain difficulty of searching the DMBO area where the meeting point of projected ray is projected. Resolution of these conflicts is proposed by focused organization of DMBO that is named bit-mapped. The concept of spatial matrix that has three indexes was introduced. With its help it became possible to rigidly connect the coordinates and height points of DMBO with their position on the location and to the memory of computer. This allowed calculating the spatial coordinates of a plotted point by a method of stepwise approximation. Having given the height Z_0 , invariably higher than any DMBO point, plane coordinates of point in question are determined. After that the numbers of spatial matrix indexes are calculated, and then based on them the area of DMBO where this point is projected based on the coordinates. Now instead of Z_0 is designated as an arithmetic mean out of a few heights of points that are located close to the one that is identified. And so it goes like this after the indexes of spatial matrix within the neighboring iterations. After that the task on identification of final coordinates of projecting ray contact with DMBO.

Keywords: single shot; digital model of the object (DMBO); equations of a plane and projecting ray; spatial matrix of DMBO.

Рассмотрен один из вариантов совместной фотограмметрической обработки одиночного снимка и цифровой модели объекта аэросъемки (ЦМО) для решения пространственных задач. Задачи подобного рода возникают (или могут возникнуть) при обновлении топографических карт, решении инженерных и научно-прикладных задач. К последним можно отнести мониторинг окружающей среды, изучение современного активного вулканизма, реконструкцию по снимкам геологических процессов и ряд других задач. Принцип определения пространственных координат точки по одиночному снимку довольно прост: достаточно составить уравнения проектирующего луча и поверхности в окрестности его встречи с ЦМО. Однако реализация этого принципа усложняется тем, что для определения плановых координат точки встречи необходимо знать ее высоту над некоторой горизонтальной плоскостью (или уровнем Балтийского моря), а чтобы найти отметку этой точки, то без плановых ее координат этого сделать невозможно. К тому же возникает определенная трудность поиска области ЦМО, куда проектируется точка встречи проектирующего луча. Разрешение этих противоречий предложено целенаправленной организацией ЦМО, названной растровой. Введено понятие пространственной матрицы, имеющей три индекса. С ее помощью удалось строго связать координаты и высоты точек ЦМО с их положением на местности и в памяти компьютера. Это позволило методом последовательных приближений вычислить пространственные координаты определяемой точки. Задав высоту Z_0 , заведомо выше любой точки ЦМО, определяют плановые координаты искомой точки. Затем вычисляют номера индексов пространственной матрицы, а по ним область ЦМО, куда проектируется по координатам эта точка. Теперь вместо Z_0 назначается Z как среднее арифметическое из нескольких высот точек, расположенных вблизи определяемой. И так продолжается до тех пор, пока не повторятся в смежных итерациях индексы пространственной матрицы. После этого решается задача по определению окончательных координат встречи проектирующего луча с ЦМО.

Ключевые слова: одиночный снимок; цифровая модель объекта (ЦМО); уравнения плоскости и проектирующего луча; пространственная матрица ЦМО.

В практике фотограмметрических работ, связанных с использованием геометрических свойств одиночного снимка, возникают задачи (чаще всего в области инженерных и научно-прикладных направлений), когда необходимо определить пространственное положение объекта (X, Y, Z) по одному аэроснимку. Поскольку без дополнительных данных пространственные прямоугольные координаты точки невозможно получить по измеренным на снимке (x, y) плоским (даже если известны элементы внешнего ориентирования этого снимка), то в качестве вспомогательных величин предлагается использовать цифровую модель рельефа местности. Рассмотрим возможный вариант совместного использования модели рельефа и измеренных на аэроснимке плоских прямоугольных координат характерных точек объекта для определения их пространственного положения.

Суть решения задачи в общем виде показана на рис. 1, на котором снимок P с известными элементами внутреннего и внешнего ориентирования $x_0, y_0, f, X_s, Y_s, Z_s, \alpha, \omega, \chi$ изображает на снимке местность, т. е. точка-

ма a и b изображены точки A и B местности. Если измерить плоские прямоугольные координаты точек a и b , а используя угловые элементы α, ω, χ перейти к пространственным координатам этих точек (X', Y', Z') , то по формулам

$$\left. \begin{aligned} X &= X_s + \frac{X'}{Z'}(Z - Z_s); \\ Y &= Y_s + \frac{Y'}{Z'}(Z - Z_s) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

можно вычислить плоские координаты точек A и B при известных значениях их высот $(Z_A$ и $Z_B)$.

Анализируя формулы (1), можно заметить, что для вычисления высот точек A и B надо знать по ним плоские прямоугольные координаты (X, Y) . Поэтому без использования цифровой модели объекта съемки (ЦМО) решение задачи по определению пространственного его положения не представляется возможным.

Проследим по рис. 1 процесс определения пространственных прямоугольных координат (X, Y, Z) точки A . Задав высоту Z_0 (заведомо больше максимальной отметки какой-либо точки на объекте, изображенном на снимке), по формулам (1) вычислим X, Y точки A_0 , лежащей на виртуальном проектирующем луче Sa . Предположим, что удалось найти несколько точек в ЦМО (об алгоритме поиска речь пойдет далее) с плоскими координатами, близкими в заданных пределах аналогичным величинам точки A_0 . Взяв среднее арифметическое из их высот Z_i , вновь обратимся к формулам (1), чтобы вычислить X, Y точки A_1 . Продолжим вычислительный процесс до тех пор, пока на следующем шаге не получим предыдущий ответ, или, задавшись допустимым отклонением от него, найдем достаточно близкие координаты (X, Y, Z) для точки A . Окончательные значения координат этой точки найдем как пересечение проектирующего луча Sa с поверхностью ЦМО в ее окрестности.

В векторном виде уравнение виртуального проектирующего луча Sa [1]:

$$r = at,$$

которое в координатной форме и параметрическом виде применительно к обозначениям, используемым в фотограмметрии (для фотограмметрической системы координат), примет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} X &= X_s + \Delta X t; \\ Y &= Y_s + \Delta Y t; \\ Z &= Z_s + \Delta Z t, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

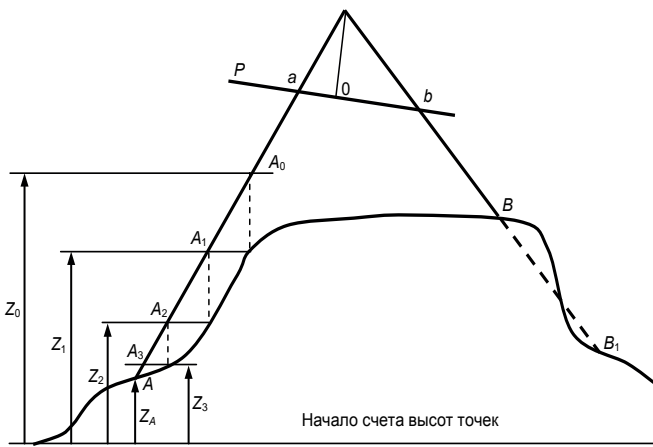


Рисунок 1. Графическая интерпретация взаимного положения снимка и цифровой модели местности.

где $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ – разности между одноименными координатами двух точек, по которым составляется уравнение проектирующего луча Sa ; t – множитель, обеспечивающий положение определяемой точки на проектирующем луче.

В качестве точек, задающих направление проектирующего луча Sa , примем точку фотографирования $S(X_s, Y_s, Z_s)$ и мнимую точку, координаты которой (X, Y, Z) вычислены из последней итерации предварительного определения координат реальной точки ЦМО (A).

Выбрав из ЦМО ближайшие к A точки (достаточно трех) для описания поверхности в ее окрестности, воспользуемся тремя уравнениями плоскости вида

$$Z = c_0 + c_1 X + c_2 Y, \quad (3)$$

из решения которых найдем коэффициенты c_0, c_1 и c_2 , позволяющие решить систему уравнений (2) и (3) с четырьмя неизвестными (X, Y, Z, t) .

Обращаясь к алгоритму предложенного ранее принципа определения пространственного положения объекта и не рассматривая здесь известных методов определения элементов внутреннего и внешнего ориентирования аэроснимков [2, 3], будем полагать, что эти величины известны и представлены в правой фотограмметрической пространственной системе координат и Балтийской системе высот. В это же координатное пространство переведена и цифровая модель объекта съемки. При этом воспользуемся системой угловой ориентировки снимков, предложенной проф. И. Т. Антиповым [4].

Осталось лишь рассмотреть технологию ее формирования и функционирования, обратив особое внимание на возможность обеспечения надежности, однозначности и минимизации сортировки информации при поиске области ЦМО в окрестности предполагаемой точки A (рис. 1: точки $A_0, A_1, A_2, A_3, \dots, A$).

Математическое обеспечение современных вычислительных средств позволяет выполнять операции с пространственными массивами – матрицами, имеющими более двух индексов [5]. Воспользуемся этой возможностью для размещения в памяти ЭВМ информации об объекте. А если в структуру матрицы вложить еще и геометрический смысл, поставив в соответствие определенным клеткам матрицы реальные части объекта, цифровая модель приобретает динамический характер, а поиск характерных точек обрабатываемого участка исключит всякий перебор информации.

Реализацию предложенной идеи формирования ЦМО рассмотрим в предположении, что на данном объекте модель создается впервые. Пусть поверхность в районе предстоящих работ отражена дискретно координатами и высотами характерных точек с известной (заданной) плотностью, обеспечивающей назначенную точность вычисления координат и высот определяемых точек по ЦМО. Выберем такой размер ΔL элементарного участка квадратной формы, чтобы в нем оказалось не более одной точки, допуская их отсутствие в некоторых квадратах и заноса «лишние» (попадающие вторыми в элементарный участок) в резервный массив. Если ЦМО создается по снимкам прошлых лет, то размер квадрата можно вычислить по следующей формуле:

$$\Delta L = \frac{L_1 + L_2 + \sqrt{(L_1 + L_2)^2 + 4L_1 L_2 (n - 1)}}{2(n - 1)}, \quad (4)$$

полученной в предположении, что все n точек равномерно расположены на объекте размером $L_1 \times L_2$. При этом отдельные ячейки растра могут оказаться свободными от точек ЦМО (как показано на рис. 2, где символом «*» помечено их наличие), но это не имеет принципиального значения. Область поиска точек можно расширить.

Обозначим в пространственной матрице, например, ЦМО $[k, m, n]$ управляемый ординатами точек индекс через i (рис. 2), а связанный с абсциссами через j . Тогда

$$\left. \begin{aligned} i &= a + 1; \\ j &= b + 1, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где a – целая часть результата от деления ординаты точки на ΔL ; b – целая часть от аналогичного деления абсциссы этой точки.

Пределы изменения индексов зависят от размера объекта. Если L_1 и L_2 в формуле (4) – его размеры соответственно вдоль оси X и Y , то, приняв $a = L_1, a = L_2$ и вычислив по формулам (5) индексы i и j , определим размер матрицы ЦМО $[k, m, n]$, т. е. $k = i, m = j$. Значение константы n (третьего индекса матрицы) зависит от возможностей дальнейшего использования созданной ЦМО, названной авторами растровой. Например, при обновлении топографических карт и планов в этот смысловой вектор постоянной длины n можно заносить кроме координат точки закодированную цифрами семантическую информацию. Применительно же к нашему случаю величина n может принять значение три (для X, Y и Z), если «лишние» точки помещать в дополнительный массив, либо шесть, если предусмотреть возможность размещения двух точек в одной ячейке растра. В последнем случае потребуется в два раза больше свободной оперативной памяти компьютера, а полученное по формуле (4) значение ΔL следует увеличить в два раза.

В качестве иллюстрации покажем, как находятся ближайшие, например, к точке A_0 точки ЦМО. После определения плоских координат этой точки по формуле (1) вычисляются индексы i и j , указывающие на местоположение ее координат в пространственной матрице. Далее целенаправленной манипуляцией индексов вызываются на рабочее поле программы координаты окружающих A_0 точек. Пусть надо вызвать координаты одной из точек, если A_0 проектируется (по своим координатам) в заштрихованный на рис. 2 квадрат.

Тогда вызов координат из соседнего квадрата (расположенного, например, восточнее данного) можно осуществить так (используя абстрактный язык программирования):

$$X := \text{ЦМО} \left[i, j + 1, 1 \right]; Y := \text{ЦМО} \left[i, j + 1, 2 \right]; Z := \text{ЦМО} \left[i, j + 1, 3 \right].$$

При выполнении аэросъемки горной местности на крутых склонах, направленных от центра снимка, могут появляться «мертвые» зоны (перспективные тени), что может привести к ошибочному определению координат следа виртуального проектирующего луча на поверхности ЦМО. Например (рис. 1), по плоским координатам точки B на снимке (x_B, y_B) вычислим координаты B_1 на поверхности ЦМО, если в качестве Z_0 примем величину, значение которой меньше высоты точки B_1 , которой нет на снимке, но есть на поверхности ЦМО. По этой причине поиск точки встречи любого проектирующего луча с ЦМО предлагается начинать, назначив Z_0 больше максимальной отметки любой точки растровой модели местности. Заметим, что в работе [6] автор ограничился лишь рассмотрением уклонов местности, не превышающих 45° .

Если ЦМО создается по карте в виде регулярной модели на квадратной сетке, то для перевода ее в растровую достаточно задать координаты исходной модели юго-западного угла и размер сетки. Этих данных вполне достаточно для решения данной задачи. Метод триангуляции Делоне также легко преобразуется в растровую модель [7].

При построении ЦМО по снимкам, полученным цифровыми широкоформатными съемочными камерами [8], появится возможность создавать плотные модели рельефа, что должно повысить точность и надежность окончательных результатов по определению координат точек рассмотренным методом. Приведенные в различных литературных источниках данные по исследованию фотограмметрической обработки таких снимков свидетельствуют об этом [9, 10].

Возвращаясь к алгоритму определения пространственного положения объекта по одиночному снимку и ЦМО, отметим, что введение дополнительного неизвестного t позволило существенно упростить процесс отыскания неизвестных. Действительно, подставив в уравнение

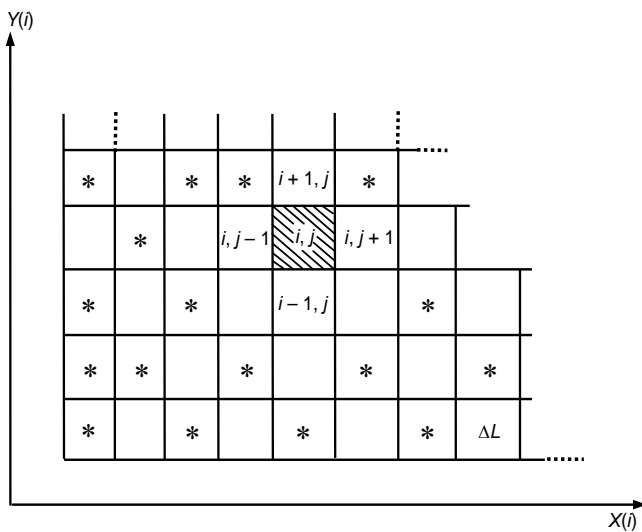


Рисунок 2. Принцип функционирования растровой ЦМО.

плоскости (3) координаты X, Y, Z из выражений (2) после того как будут определены коэффициенты c_0, c_1, c_2 , получим уравнение с одним неизвестным t , из решения которого найдем масштабный множитель, т. е.

$$t = \frac{Z_s - c_0 - c_1 X_s - c_2 Y_s}{c_1 \Delta X + c_2 \Delta Y - \Delta Z} \quad (6)$$

Координаты точки $A (X, Y, Z)$ вычислим по формулам (2). При этом необходимо произвести контрольные вычисления, суть которых состоит в следующем.

Сначала по формулам (5) следует вычислить индексы (i, j) для определения возможного местоположения координат точки A в пространственной матрице ЦМО $[i, j, n]$. Затем целенаправленной манипуляцией индексов находятся три ближайшие к A точки ЦМО, чтобы по ним вновь определить коэффициенты уравнения плоскости (3) и по формуле (6) вычислить t , полагая

$$\Delta X = X - X_s, \quad \Delta Y = Y - Y_s, \quad \Delta Z = Z - Z_s.$$

С новыми данными вновь вычисляют координаты точки A по тем же формулам (2).

Контрольные вычисления продолжают до тех пор, пока не стабилизируются значения индексов i и j , или координаты точки A в повторных вычислениях не окажутся в пределах установленных заранее допусков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Выгодский М. А. Справочник по высшей математике. М.: Наука, 1973. 873 с.
2. Бабашкин Н. М., Нехин С. С. Топографическая аэросъемка. Современное состояние и перспективы развития // Геодезия и картография. 2015. № 7. С. 36–41.
3. Соколова К. А., Резник Ю. Н. Определение элементов внешнего ориентирования одиночного аэроснимка // Избр. докл. 60-й университет. науч.-техн. конф. студентов и молодых ученых. Томск: ТГАСУ, 2015. С. 465–468.
4. Антипов И. Т. Об использовании систем угловой ориентировки сним-

- ков // ГЕО-Сибирь-2006: сб. материалов Междунар. науч. конгресса (Новосибирск, 24–28 апр. 2006 г.). Новосибирск: СГГА, 2006. Т. 3. Ч. 1. С. 52–58.
5. Аккерман Ф. Рост производительности компьютеров и развитие фотограмметрии // Геоматика. 2011. № 1 (10). С. 23–31.
6. Андронов В. Г. Орбитальный метод планово-высотной координатной привязки одиночных космических изображений. // Сб. статей по итогам Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 230-летию основания МИИГАиК. 2009. Вып. 2. Ч. II. С. 211–215.
7. Лимонов А. Н., Гаврилова Л. А., Обиралов А. И. Совершенствование технологических процессов создания цифровых моделей местности по материалам аэрофотосъемки. М.: ГУЗ, 2006. 80 с.
8. Ковров А. А. Новые технологии компании Microsoft Vexcel по сбору и обработке данных аэросъемки // Геопрофи. 2012. № 2. С. 12–14.
9. Wang Cheng-long. Aerotriangulation accuracy analysis of GPS-assisted aerial photogrammetry based on SWDC // Chinese academy of Surveying and Mapping. 2011. Vol. 36, № 2. P. 101–103.
10. Geng Xun, Yang Tina-ke, Miao Tian. Research on datum transformation for the aerial photogrammetry of airborne three-line CCD skanner // Chinese academy of Surveying and Mapping. 2010. Vol. 35, № 4. P. 65–67.

REFERENCES

1. Vygodskiy M. A. 1973, *Spravochnik po vysshey matematike* [Guidebook on higher mathematics]. Moscow, 873 p.
2. Babashkin N. M., Nekhin S. S. 2015, *Topograficheskaya aëros'emka. Sovremennoe sostoyaniye i perspektivy razvitiya* [Topographical aerial imagery. Modern condition and development prospects]. Geodeziya i kartografiya [Geodesy and cartography], pp. 36–41.
3. Sokolova K. A., Reznik Y. N. 2015, *Opredeleniye elementov vneshnego orientirovaniya odinochnogo aërosnimka* [Identification of elements of absolute orientation of a single aerial image]. Sb. izbr. dokladov 60 universitetskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov i molodykh uchenykh Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta [Collection of chosen reports of 60th University Scientific-Technical Conference of students and young scientists of Tomsk State Architectural-Construction University], pp. 465–468.
4. Antipov I. T. 2006, *Ob ispol'zovanii uglovoy orientirovki snimkov* [On the usage of angled oriented shots]. GEO-Sibir-2006: Sb. materialov Mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa [GEO-Siberia-2006: Collection of materials of International Scientific Congress]. Novosibirsk, 24–28 of April 2006. Vol. 3. Monitoring okruzhayushey sredy, geokologiya, distantsionnye metody zondirovaniya zemli i fotogrammetriya [Monitoring of environment, geology, remote sensing methods of earth sounding and photo charting]. Part 1. Novosibirsk: Siberian State University of Geosystems and Technologies, 2006. pp. 52–58.
5. Akkerman F. 2011, *Rost proizvoditel'nosti komp'yut'ov i razvitie fotogrammetrii* [Performance gain of computers and development of photo charting]. Geomatika [Geomatics]. No. 1 (10). pp. 23–31.
6. Andronov V. G. 2009, *Orbital'nyi metod planovo-vysotnoy koordinatnoy privyazki odinochnykh kosmicheskikh izobrazheniy* [Orbital method of plan-vertical positioning of single space images]. Sb. statei po itogam Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashennoy 230-letiyu osnovaniya Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta geodezii i kartografii [Collection of articles according to the results of International Scientific-technical conference, dedicated celebrating 230 years since Moscow State University of Geodesy and Cartography was founded]. Issue 2. Part II. Moscow, pp. 211–215.
7. Limonov A. N., Gavrilova L. A., Obiralo A. I. 2006, *Sovershenstvovanie tekhnologicheskikh protsessov sozdaniya tsifrovyykh modeley mestnosti po materialam aërofotos'emki* [Technological advancement of creating digital terrain models based on materials of aerial imagery]. Moscow, State University of Land Use Planning. 80 p.
8. Kovrov A. A. 2012, *Novye tekhnologii kompanii Microsoft Vexcel po sboru i obrabotke dannykh aëros'emki* [New technologies of company Microsoft Vexcel on collection and processing of aerial photography data]. Geoprofi [Geoprofi.ru]. No. 2. pp. 12–14.
9. Wang Cheng-long. Aerotriangulation accuracy analysis of GPS-assisted aerial photogrammetry based on SWDC. Cehui kexue = Sci. Surv. and Mapping, 2011. 36. no. 2. pp. 101–103.
10. Geng Xun, Yang Tina-ke, Miao Tian. Research on datum transformation for the aerial photogrammetry of airborne three-line CCD skanner. Cehui kexue = Sci. Surv. and Mapping, 2010. 35. № 4. pp. 65–67.

Николай Федорович Добрынин,

ips@rgups.ru

Татьяна Михайловна Пимшина,

pimshina.tat@jandex.ru

Ростовский государственный университет путей сообщения
Россия, Ростов-на-Дону, пл. им. Ростовского Стрелкового Полка
Народного Ополчения, 2

Nikolai Fedorovich Dobrynin,

ips@rgups.ru

Tatyana Mikhaylovna Pimshina,

pimshina.tat@jandex.ru

Rostov State Transport University

Rostov-on-Don, Russia