

УДК: 528.83

DOI: 10.53816/23061456_2021_9-10_47

**ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЭЛЕМЕНТОВ ВНЕШНЕГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ
КАДРОВЫХ СНИМКОВ БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЛАНОВО-ВЫСОТНОЙ
ОСНОВЫ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ГЛОБАЛЬНЫХ СПУТНИКОВЫХ
РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

**AN APPROACH TO DETERMINING THE ELEMENTS OF THE EXTERNAL
ORIENTATION OF PHOTOS WITHOUT USING GROUND-BASED
MEASUREMENTS BASED ON DATA FROM GLOBAL SATELLITE
RADIONAVIGATION SYSTEMS**

*Канд. техн. наук И.В. Чернов, д-р геогр. наук Г.К. Осипов,
канд. техн. наук А.В. Соловьёв, канд. техн. наук К.И. Титов*

Ph.D. I.V. Chernov, D.Sc. G.K. Osipov, Ph.D. A.V. Solovyov, Ph.D. K.I. Titov

ВКА им. А.Ф. Можайского

Статья посвящена решению актуального вопроса получения фотопланов и карт без использования планово-высотной основы. Предлагается усовершенствование способа определения элементов внешнего ориентирования путём совместной обработки пары перекрывающихся кадровых снимков местности.

Особенностью предложенного подхода является возможность полной его автоматизации на основе отождествления (сопоставления) центральных точек на перекрывающихся снимках. В результате чего, можно получать фотопланы и ортофотопланы в режиме времени близком к реальному еще на борту летательного аппарата (ЛА) во время съёмки.

Предлагаемый метод получения элементов внешнего ориентирования снимков позволит повысить точность определения координат объектов (точек) местности при дистанционном зондировании Земли (ДЗЗ) без использования планово-высотной подготовки.

Ключевые слова: снимки, внешнее ориентирование, угол поворота, спутниковые системы, планово-высотное обоснование, центральная точка снимка.

The article is devoted to solving the actual issue of obtaining photo plans and maps without using a planned-altitude basis. It is proposed to improve the method for determining the elements of external orientation by jointly processing a pair of overlapping frame images of the terrain.

A special feature of the approach is the possibility of its full automation based on the comparison of central points on overlapping images. As a result, it is possible to obtain photoplans and orthophotoplans in a time mode close to real time on board the aircraft. The proposed method for obtaining elements of external orientation of images will improve the accuracy of determining the coordinates of terrain objects during remote sensing without the use of planned altitude training.

Keywords: images, external orientation, angle of rotation, satellite systems, planning and altitude justification, the central point of the image.

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) получило широкое применение для решения задач картографирования (создание фотодокументов местности, планов, карт (электронных карт), цифровых моделей местности и т.д.). В качестве исходной информации для картографирования местности используются аэрокосмические снимки, а для картографирования рельефа местности используются аэрокосмические снимки, имеющие перекрытие не менее 60 % [2, 6, 8] (в рамках публикации сканерные съёмки не рассматриваются).

Планово-высотное положение точек местности по перекрывающимся снимкам получают путём построения и уравнивания пространственной фототриангуляционной сети (способ связей не рассматривается) [8]. Одиночная модель есть элементарное звено фототриангуляции. Её получают путём взаимного ориентирования пары перекрывающихся снимков [8]. В этом случае планово-высотное положение (координаты) точек местности будут получены в системе координат снимков.

Определения координат точек местности в геодезической системе координат выполняется при внешнем ориентировании снимков (моделей). Для этого соотносят координаты точек в системе координат снимков с соответствующими геодезическими координатами или определяют элементы внешнего ориентирования (ЭВО). ЭВО являются геодезические координаты точки фотографирования (X_S, Y_S, Z_S), масштаб t_M , углы наклонов и поворота системы координат снимков относительно геодезической системы координат (ω, α, κ).

Первый принцип внешнего ориентирования включает создание планово-высотного обо-

снования (ПВО). ПВО определяют путём инструментальных измерений на местности. Это трудоёмкие и не всегда реализуемые работы. В этом случае внешнее ориентирование реализуется по данным положения и ориентации устройства дистанционного зондирования — это есть второй принцип внешнего ориентирования.

Второй принцип внешнего ориентирования предполагает дополнительные измерения при помощи установленного оборудования на борту летательного аппарата (ЛА), выполняющего дистанционное зондирование. Это оборудование включает приёмники сигналов спутниковых радионавигационных систем (СРНС), которые зачастую интегрированы с инерциальной навигационной системой [3] или системой ориентации по звёздам, горизонту [8], высотомерами [8], доплеровскими навигационными системами. Дополнительное навигационное оборудование позволяет получить элементы внешнего ориентирования в момент фотографирования. Если известны линейные ЭВО снимков — X_S, Y_S, Z_S , углы наклонов и поворота системы координат снимков относительно геодезической системы координат — ω, α, κ , масштабный коэффициент — t_M , то возможно вычислить координаты точек местности в геодезической системе координат

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{bmatrix} + \mathbf{A}_{\text{оак}} \begin{bmatrix} X_M \\ Y_M \\ Z_M \end{bmatrix} t_M, \quad (1)$$

где [6]

$$\mathbf{A}_{\text{оак}} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \kappa & -\sin \kappa \cos \alpha & \sin \alpha \\ \sin \omega \sin \alpha \cos \kappa + \cos \omega \sin \kappa & -\sin \omega \sin \alpha \sin \kappa + \cos \omega \cos \kappa & -\sin \omega \cos \alpha \\ -\cos \omega \sin \alpha \cos \kappa + \sin \omega \sin \kappa & \cos \omega \sin \alpha \sin \kappa + \sin \omega \cos \kappa & \cos \omega \cos \alpha \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где ω — поперечный угол наклона модели (угол в координатной плоскости $Y_I Z_I$ между осью Z_I и проекцией оси z на плоскость $Y_I Z_I$); α — продольный угол наклона модели (угол между проекцией оси z на плоскость $Y_I Z_I$ и осью z); κ — угол поворота модели (угол в плоскости снимка между сечением плоскости снимка и плоскостью $X_I z$) (рис. 1).

Определение линейных ЭВО реализуемо при помощи одного приёмника сигналов СРНС, установленного на борту ЛА. Повысить точность определения линейных ЭВО доступно путём реализации относительного метода космической геодезии [1], а также комплексирова различную навигационную информацию от дополнительных источников, перечисленных выше.

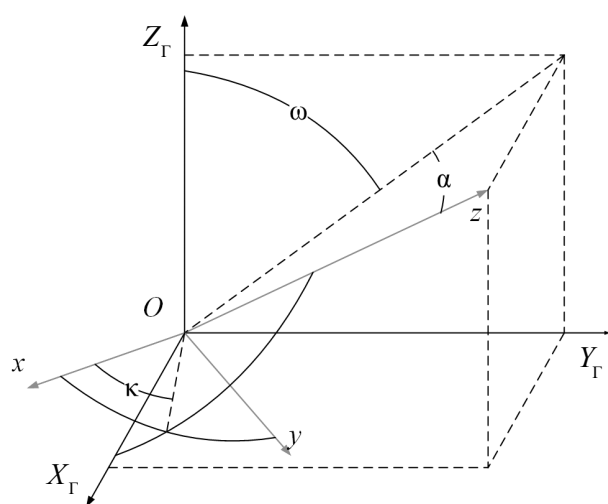


Рис. 1. Связь угловых ЭВО снимка (модели) и геодезической системой координат (СК)

Разработаны способ и устройство определения угловых ЭВО снимка с применением приёмников сигналов спутниковых радионавигационных систем [5, 6].

Устройство включает съёмочную аппаратуру и два приёмника сигналов СРНС, две антенны которых установлены на мачте неподвижно и соосно со съёмочной аппаратурой.

В момент фотографирования по сигналам СРНС определяются линейные ЭВО и углы наклона снимка по формулам [5]

$$\sin \omega = \frac{c_1}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2 + c_1^2}}; \quad \cos \alpha = \frac{c_1}{\sqrt{a_1^2 + c_1^2}},$$

где a_1, b_1, c_1 — координаты направляющего вектора прямой, проходящей через фазовые центры антенн приёмников СРНС.

Описанный способ не позволяет определять угол поворота снимка, что является существенным недостатком. Для устранения этого недостатка разработано устройство [7], включающее в свой состав дополнительный приёмник сигналов СРНС. Такое решение ведёт к удорожанию и усложнению конструкции устройства. Как следствие возникает необходимость совершенствования описанного способа.

При ДЗЗ с целью картографирования, как правило снимки получают с 50–60 % перекрытием. В результате каждый снимок будет содержать (захватывать) центральную точку соседнего снимка.

Отождествить (сопоставить) центральные точки на перекрывающихся снимках возможно в автоматизированном режиме. Поиск и сопоставление необходимых точек аэрофотоснимков возможно выполнять по методу, который базируется на алгоритмах, заимствованных в дисциплине компьютерного зрения и состоит из двух этапов. На первом этапе, с использованием алгоритмов поиска и выделения особых точек — детекторов, получают набор особых точек. На втором этапе решается задача сравнения (сопоставления) особых точек. Степень соответствия (похожести) одноименных точек определяют по «вектору признаков» — дескриптору. Дескриптор (от лат. descriptor — описывающий) это идентификатор точки, выделяющей ее из остальной массы похожих точек, он содержит компактное представление характерных особенностей. Строится дескриптор на основании информации об интенсивности, цвете и текстуре особой точки и ее окрестности. Данные алгоритмы допускают значительный процент неверных отождествлений и для их нейтрализации, применяется оригинальная методика фильтрации (отбраковки) ошибочно сопоставленных точек, разработанная на основе алгоритма RANSAC.

Процесс набора центральных точек возможно полностью автоматизировать и оператора в этом процессе заменить алгоритмом автоматического набора связующих точек для выполнения взаимного ориентирования аэрокосмических снимков [4].

Исходя из анализа выражений (1) и (2), можно сделать вывод о том, что для определения координат центральных точек достаточно линейных ЭВО. Зная геодезические координаты $\{X_1, Y_1, Z_1, B_1, L_1\}$, $\{X_2, Y_2, Z_2\}$ центральных точек O_1 и O_2 пары перекрывающихся снимков возможно определить значение геодезического азимута $A_{O_1 O_2}$ луча $O_1 O_2$ по формуле [1]

$$A = \arctg \frac{-\Delta X \sin L_1 + \Delta Y \cos L_1}{-\Delta X \sin B_1 \cos L_1 - \Delta Y \sin B_1 \sin L_1 + \Delta Z \cos B_1},$$

где $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ — разности геодезических координат точек O_1 и O_2 . Также решив обратную геодезическую задачу в СК снимка, будет вычислен угол ε между осью y и лучом O_1O_2 .

Как правило, в целях картографирования выполняется съёмка местности в надир. При съёмке в надир угол наклона снимка β (угол между направлением съёмки и отвесной линией проходящей через точку съёмки (центр проекции)) [6] не должен превышать 3° [8].

В общем случае, при выполнении аэрокосмической съёмки, когда угол $\beta \neq 0$ и $\beta < 3^\circ$, углы $A_{O_1O_2}$, κ и ε будут принадлежать разным плоскостям (рис. 2).

В идеальном случае угол наклона снимка $\beta = 0$ или после устранения углов наклона ω , α СК снимка (система координат снимка поворачивается последовательно $\omega \rightarrow \alpha \rightarrow \kappa$ против часовой стрелки вокруг осей геодезической СК [6]) относительно геодезической СК плоскость P_1 снимка будет совпадать с плоскостью γ геодезического горизонта точки фотографирования (рис. 3).

Исходя из рис. 1 и рис. 3, для ориентирования СК модели (снимка) в геодезической топоцентрической СК необходимо повернуть снимок P_1 в плоскости геодезического горизонта γ относительно точки O_1 так, чтобы ось y СК снимка совпала с восточным направлением E геодезической параллели. Угол, на который будет осуществляться поворот, будет являться углом κ (рис. 1, рис. 3).

После поворота снимка P_1 , плоскость которого совпадает с плоскостью γ геодезического горизонта, на угол κ , геодезический азимут A_y оси y составит 90°

$$A_y - \kappa = 90^\circ.$$

Азимут $A_{O_1O_2}$ линии O_1O_2 можно представить, как сумму углов A_y и ε

$$A_{O_1O_2} = A_y + \varepsilon.$$

После подстановки и преобразования будет получено выражение для вычисления угла κ поворота снимка P_1

$$\begin{aligned} A_{O_1O_2} - \varepsilon - \kappa &= 90^\circ, \\ \kappa &= A_{O_1O_2} - \varepsilon - 90^\circ. \end{aligned}$$

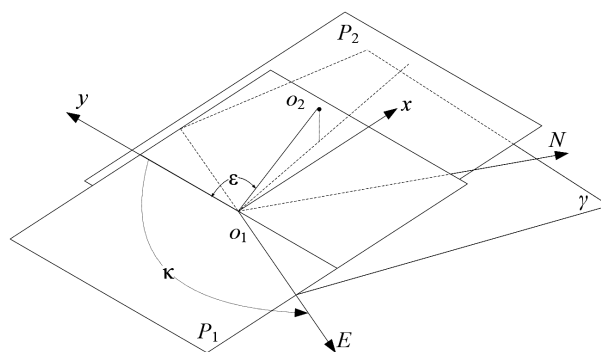


Рис. 2. Связь плоскости снимка и плоскости горизонта (O_1 — центральная точка снимка P_1 ; O_2 — центральная точка снимка P_2 ; yO_1x — плоская система координат снимка P_1 ; γ — плоскость геодезического горизонта; N — северное направление геодезического меридиана; E — восточное направление геодезической параллели)

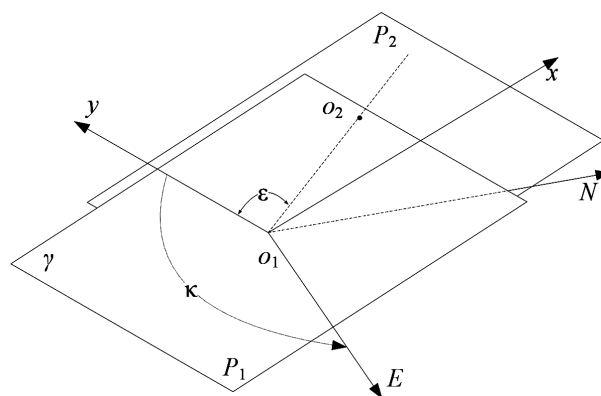


Рис. 3. Связь СК ортогонального снимка и горизонтальной топоцентрической СК

Применение полученного выражения в совокупности с описанным способом и устройством позволит определять, как линейные, так и угловые ЭВО снимка.

Заключение

Обоснованный подход позволяет усовершенствовать способ определения элементов внешнего ориентирования снимков, полученных при помощи аэрокосмической съёмки для решения задач картографирования без использования полевой планово-высотной подготовки.

Усовершенствованный способ целесообразно использовать совместно (интегрировать) с любыми другими способами внешнего ориентирования снимков.

Дополнительный независимый метод получения элементов внешнего ориентирования снимков позволит повысить точность определения координат объектов (точек) местности при ДЗЗ без использования планово-высотной подготовки.

Особенностью предложенного подхода является возможность полной его автоматизации, в результате чего можно получать фотопланы и ортофотопланы в режиме времени близком к реальному еще на борту ЛА во время съёмки.

Кроме того, разработанный подход позволяет отказаться от применения в конструкции устройства ДЗЗ третьего приёмника сигналов СРНС. Что должно привести к удешевлению самого устройства и получаемой с его применением картографической продукции.

Литература

1. Глушков В.В. Космическая геодезия: методы и перспективы развития / В.В. Глушков, К.К. Насретдинов, А.А. Шаравин. — М.: ИПВА. 2002. 448 с.

2. Лобанов А.Н. Фотограмметрия: Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. / А.Н. Лобанов. — М.: Недра. 1984. 552 с.

3. Лобанов В.С. Направления развития систем ориентации и стабилизации космических аппаратов различного назначения / В.С. Лобанов, Тарасенко Н.В., Зборошенко В.Н. // Гироскопия и навигация. № 2 (89). 2015. С. 18–29.

4. Соловьев А.В. Метод автоматического набора связующих точек для выполнения взаимного ориентирования аэрокосмических снимков // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2016. № 3. С. 20–23.

5. Способ определения угловых элементов внешнего ориентирования снимка: пат. 2704540 Рос. Федерация: МПК G01C 11/02, G01C 1/00 / Чернов И.В.; заявитель и патентообладатель Чернов И.В. № 2019102111; заявл. 25.01.19; опубл. 29.10.19. Бюл. № 31. 4 с.

6. Устройство для совместного определения линейных и угловых элементов внешнего ориентирования съёмочной аппаратуры: п. м. 186359 Рос. Федерация: МПК G01C 11/10; G01S 19/13 / Чернов И.В.; заявитель и патентообладатель Чернов И.В. № 2018134990; заявл. 03.10.18; опубл. 16.01.19. Бюл. № 2. 3 с.

7. Устройство для совместного определения линейных и угловых элементов внешнего ориентирования съёмочной аппаратуры: п.м. 188175 Рос. Федерация: МПК G01C 11/10; G01S 19/13 / Чернов И.В.; заявитель и патентообладатель Чернов И.В. № 2019104015; заявл. 13.02.19; опубл. 02.04.19. Бюл. № 10. 3 с.

8. Хрущ Р.М. Фотограмметрия: учебник. — СПб: ВКА им. А.Ф. Можайского. 2011. 541 с.

References

1. Glushkov V.V. Space geodesy: methods and prospects of development. — М.: IPVA. 2002. 448 p.

2. Lobanov A.N. Fotogrammetriya: Photogrammetry: Textbook for universities. — М.: Nedra. 1984. 552 p.

3. Lobanov V.S., Lobanov V.S., Tarasenko N.V., Zboroshenko V.N. Directions of development of systems of orientation and stabilization of spacecraft for various purposes // *Гироскопия и навигация*. 2015. № 2 (89). P. 18–29.

4. Solovev A.V. Method of automatic set of connecting points for performing mutual orientation of aerospace images // *Научные технологии в космических исследованиях Земли*. 2016. № 3. P. 20–23.

5. Method for determining the angular elements of the external orientation of the image]: pat. 2704540 Ros. Federatsiya: МПК G01C 11/02, G01C 1/00 / Chernov I.V.; zayavitel i patentoobladatel Chernov I.V. № 2019102111; zayavl. 25.01.19; opubl. 29.10.19. Byul. № 31. 4 p.

6. Device for joint determination of linear and angular elements of the external orientation of the survey equipment: p. m. 186359 Ros. Federatsiya: МПК G01C 11/10; G01S 19/13 / Chernov I.V.; zayavitel i patentoobladatel Chernov I.V. № 2018134990; zayavl. 03.10.18; opubl. 16.01.19. Byul. № 2. 3 p.

7. Device for joint determination of linear and angular elements of the external orientation of the survey equipment: p. m. 188175 Ros. Federatsiya: МПК G01C 11/10; G01S 19/13 / Chernov I.V.; zayavitel i patentoobladatel Chernov I.V. № 2019104015; zayavl. 13.02.19; opubl. 02.04.19. Byul. № 10. 3 p.

8. Hrusch R.M. Photogrammetry: textbook. — SPb.: Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky. 2011. 541 p.