



ФОТОГРАММЕТРІЯ ТА ДИСТАНЦІЙНЕ ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

УДК 528.74:72

<https://doi.org/10.32347/0130-6014.2019.67.95-101>

В. О. Катусков, *д-р. техн. наук,*
професор кафедри геоінформатики і фотограмметрії
Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ
Б. Р. Сосса, *старший геодезист, ТОВ «Проект-Інвестбуд»*

ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФОРМАЦІЇ ОДИНОЧНОГО АНАЛІТИЧНОГО АЕРОЗНІМКА З ДРОНА

На основі аналітичного моделювання компланарного зв'язку між точками земної поверхні та їх зображенням на аналітичних аерознімках розглянуто особливості визначення елементів зовнішнього орієнтування при аерозніманні з борта безпілотного літального апарата. Показана деформація центральної проєкції при екстраполярному та інтерполярному розташуванні опознаків, за допомогою яких обчислюється зворотна фотограмметрична задача. За проведеним аналізом надані рекомендації по використанню різних методів прив'язування до опознаків.

Ключові слова: *квадрокоптер, аналітичний аерознімок, елементи зовнішнього орієнтування, ітераційне рішення, натурний жезл, опознак, екстраполяційне, інтерполяційне розташування опознаків.*

Вступ. Існуючі безпілотні літальні апарати (БПЛА) за конструкцією бувають різними: радіокеровані літаки, гелікоптери, шари, ракети, дрони. БПЛА бувають великої чи малої потужності, можуть літати на різні відстані, підніматися на різні висоти, виконувати великий спектр задач. БПЛА застосовують для отримання пошукової інформації, перевезки потрібного вантажу, тушіння пожеж та інш. Точки траєкторії польоту - ракурси вибирає оператор з командного приладу, який може розташовуватись далеко від знімаемого місця. Великопотужні БПЛА перелітають далекі відстані і знаходяться у польоті довго. Малопотужні БПЛА частіше збирають прикладну візуальну інформацію за короткий час. При збиранні інформації дають можливість отримати її з різних ракурсів. Траєкторія руху переміщення БПЛА у простішому випадку задається вручну, а може задаватися і програмно, як що на борту БПЛА встановлена навігаційна система.

В статті розглядається модельне знімання з борта малопотужного БПЛА – дрон (квадрокоптер) з чотирма пропелерами та знімальною камерою. Зображення з камери передається на монітор ноутбука оператора стоячого на землі. При

© В. О. Катусков, Б. Р. Сосса 2019

цьому оператор керує траєкторією польоту та може змінювати ракурси, таким чином, щоби отримати найбільшу кількість інформації, міняючи просторове положення квадрокоптера. Польовий кут захвату об'єктива у квадрокоптера широкоформатний. Елементи внутрішнього орієнтування f , x_0 , y_0 взяті з паспорта квадрокоптера. Вражають мікронні розміри фокусної відстані та кадру. Наприклад, фокусна відстань має величину 3077 мкм, або 3,077 мм. Ні в наземній ні в аеро-космічній фотограмметрії камери з такими елементами внутрішнього орієнтування не використовують.

При такій технології для отримання видимої ситуації достатньо мати один чи декілька знімків, що залежить від складності та об'єму дослідного об'єкта. Дослідження виконане на аналітичних (макетних) знімках координати зображення яких підраховані аналітичним шляхом.

Аналітичні знімки – це штучні, неіснуючі у натурі знімки [1], координати точок на них розраховані по заданих елементах внутрішнього і зовнішнього орієнтування (ЕЗО) та координатах точок на земній поверхні і дозволяють проводити дослідження у потрібному напрямку. При визначенні ЕЗО з прив'язкою до опорних знаків (чи точок, далі будемо називати їх скорочено ОЗ), як показали попередні роботи у нас [2; 3] та за кордом [5; 6], не завжди отримуємо вірну, недеформовану модель центральної проекції. Нагадаємо, що просторові координати ОЗ треба знати з потрібною точністю. Домовимось що при наступному дослідженні, координати ОЗ та точок на знімку визначені безпомилково, а увагу поставимо лише питанню деформації моделі, що залежить від нахилу аерознімків та розташовуванню ОЗ. Дисторсія об'єктива так саме не розглядається, хоча при дійсному зніманні радіальну дисторсію обов'язково треба враховувати.

Мета роботи показати при якому розташуванні ОЗ отримуємо вірну недеформовану модель об'єкта на земній поверхні обчислюючи одиночний аерознімок.

Виклад основного матеріалу. Для дослідження вибрані два методи прив'язування аерознімка до ОЗ *екстраполяційний* та *інтерполяційний*.

Варіанти обчислення ЕЗО розглянуто з прив'язуванням до найменшої кількості ОЗ (трьох) найменшої кількості знімків (один) та малої висоти аерофотознімання 10 м. Обчислення виконано програмним забезпеченням VZAOR яке дозволяє визначати всі елементи орієнтування, опираючись на координати знімка (знімків) та просторові координати ОЗ. Але при наступному дослідженні функція визначення елементів внутрішнього орієнтування була виключена, тому як відомі паспортні значення f , x_0 , y_0 .

У першому методі використовуємо *екстраполяційне* розташування ОЗ, коли точки об'єкта, що оброблюється, розташовані за зоною жезла на якому закріплені ОЗ. Метод *інтерполяційного* прив'язування використовується коли ОЗ розташовані з зовнішньої сторони відносно точок об'єкта.

По координатах аналітичних знімків вирішуємо зворотну фотограмметричну засічку з визначенням ЕЗО – α , ω , κ , X_s , Y_s , Z_s ітераційним

методом послідовного наближення [4]. В наведених таблицях 1-4 жирним шрифтом у першому рядку надані істинні - безпомилкові значення ЕЗО.

У таблицях 1-4 літерою Q позначена кількість або порядок ітерацій. У першій ітерації, коли $Q = 1$, скорочення *поч* позначає *початкове* значення усіх ЕЗО, яке приймалося нульовим. Позначення *виз* розшифровується як значення *визначених* поправок до початкового чи іншого значення. Початкове значення у таблицях після першої ітерації вже позначає не початкове значення, а сумарне значення, як сума початкового значення та поправки, що визначена у цій ітерації. В наведених таблицях ця сума позначена скорочено як *поп*, що позначає *попереднє* значення ЕЗО для рішення i -тої ітерації. У першому стовпчику таблиць надані назви ЕЗО в яких кутові елементи нахилу знімків приведені як: α , ω , κ у радіанах, а лінійні елементи просторового положення центра проекції X_s , Y_s , Z_s – у метрах. Третя координата Z_s відповідає висоті польоту квадрокоптера, яка у фотограмметрії позначається буквою $Z_s = H$. У нашому випадку висота фотографування для усіх випадків обчислення прийнята як постійна величина у 10 м. Значення кутових поправок в кожній ітерації показані в радіанах, а значення лінійних поправок у метрах. В останньому стовпчику кутові ЕЗО переведені у градусні величини.

Таблиця 1

Екстраполяційна прив'язка горизонтального знімка

Істинне значення ЕЗО: $\alpha = \omega = \kappa = 0^{\circ}00,0'$, $X_s = 22$ м, $Y_s = 10$ м, $Z_s = 12$ м.								
назва ЕЗО	$Q = 1$		$Q = 2$		$Q = 3$		кінцеве значення	ЕЗО
	<i>поч</i>	<i>виз</i>	<i>поп</i>	<i>виз</i>	<i>поп</i>	<i>виз</i>		
α	0	-.001	-.001	.001	0	0	0	0°00'0
ω	0	.001	.001	-.001	0	0	0	0°00'0
κ	0	0	0	0	0	0	0	0°00'0
X_s , м	0	22.023	22.023	-.018	22.005	0	22.005	22.005
Y_s , м	0	9.959	9.959	.008	9.966	0	9.966	9.966
Z_s , м	0	11.985	11.985	.020	12.005	0	12.005	12.005

ЕЗО окремого знімка табл. 1 обчислені з горизонтальними кутами нахилу α , ω і нульовим розворотом κ . При цьому, ЕЗО визначені з прив'язкою до трьох ОЗ (1, 2, 3) розташованих близько між собою на трикутному жезлі зі стороною 0,3 м.

У табл. 2 надані результати обчислено ЕЗО з граничними «горизонтальними» кутами нахилу у 3° . Відомо що знімки з кутами нахилу α , $\omega \leq 3^{\circ}$ так саме як і в табл. 1 вважаються горизонтальними. Кількість наближень при цьому збільшилася на одиницю.

Таблиця 2

Екстраполяційна прив'язка нахиленого на 3° знімка

Істинне значення ЕЗО: $\alpha = \omega = 3^{\circ}00'00''$ $\kappa = 0^{\circ}00,0'$, $X_s = 22$ м, $Y_s = 10$ м, $Z_s = 12$ м.										
назва ЕЗО	Q = 1		Q = 2		Q = 3		Q = 4		кінцеве значення	значенн я ЕЗО
	поч	виз	поп	виз	поп	виз	поп	виз		
α	0	.039	.039	.002	.042	0	.042	0	.042	2°23,3'
ω	0	.066	.066	.011	.077	0	.078	0	.078	4°26,9'
κ	0	0	0	-.003	-.004	.001	-.003	0	-.003	0°10,9'
X_s , м	0	21.742	21.742	.38	22.123	-.003	22.119	0	22.119	22.119
Y_s , м	0	11.648	11.648	-1.703	9.945	-.008	9.937	0	9.937	9.937
Z_s , м	0	11.195	11.195	.573	11.768	-.021	11.747	0	11.747	11.747

У табл. 3 ЕЗО обчислені з кутами нахилу у 6°. Кількість наближень залишилась тою самою, а деформація моделі судячи по відхиленню визначених ЕЗО від істинних збільшилася. Так саме видно що при нульових нахилах знімку деформація моделі дуже мала. Максимальне відхилення бачимо на координаті Y_s , яке досягає значення 0.034 м.

Таблиця 3

Екстраполяційна прив'язка нахиленого на 6° знімка

Істинне значення ЕЗО: $\alpha = \omega = 6^{\circ}00'00''$ $\kappa = 0^{\circ}00,0'$, $X_s = 22$ м, $Y_s = 10$ м, $Z_s = 12$ м.										
назва ЕЗО	Q = 1		Q = 2		Q = 3		Q = 4		Кінцеве значення	значен ня ЕЗО
	поч	виз	поп	виз	поп	виз	поп	виз		
α	0	.12	.12	.038	.158	.005	.163	0	.163	9°22.1'
ω	0	.111	.111	.031	.142	.002	.144	0	.144	8°15.6'
κ	0	.003	.003	-.01	-.007	-.003	-.003	0	-.003	0°11.8'
X_s , м	0	20.641	20.641	.995	21.636	-.216	21.419	.001	21.418	21.418
Y_s , м	0	13.963	13.963	-4.124	9.839	-.079	9.761	.001	9.762	9.762
Z_s , м	0	10.824	10.824	.935	11.616	-.143	11.616	0	11.616	11.616

При кутах нахилу знімка в 3° кутові ЕЗО відносно нульових значень табл. 1 піднялися до 36,7' на α , і 1°29,6' на ω . При кутах нахилу знімка в 6° кутові ЕЗО піднялися до 37,9' на α , і 2°15,6' на ω . Лінійні ЕЗО досягають абсолютних значень для 3° нахилу знімка 0,119 м на X_s , і 0,373 м на Z_s . При 6° нахилу знімка ці несходження з істинними досягли значень 0,582 мм на X_s , і 0,484 мм на Z_s .

Зовсім інша картина виникає при використанні ОЗ розташованих на більшій відстані між собою. В цьому випадку запропоноване *інтерполяційне* розташування ОЗ, коли визначуваний об'єкт знаходиться всередині ОЗ. Наприклад замість трьох ОЗ метрового жезла 1, 2, 3 приймемо три ОЗ 1, 17, 18. Тут два ОЗ 2, 3 замінені ОЗ 17, 18, які знаходяться на відстанях 18 та 28 м від 1 ОЗ. Результат обчислення ЕЗО з кутами нахилу знімків у 6° показаний у табл. 4.

Таблиця 4

Інтерполяційне прив'язування до трьох опознаків 1, 17, 18

Істинне значення ЕЗО: $\alpha = \omega = \kappa = 6^{\circ}00'00''$, $X_s = 22$ м, $Y_s = 10$ м, $Z_s = 12$ м.									
назва ЕЗО	Q = 1		Q = 2		Q = 3		Q = 4		значення ЕЗО
	поч	виз	поч	виз	поч	виз	поч	виз	
α	0	.103	.103	-.002	.101	.004	.104	0	5°58,8'
ω	0	.101	.101	.001	.103	.002	.105	0	5°59,3'
κ	0	.065	.065	.056	.121	-.016	.105	0	6°00,2'
X_s , м	0	20.928	20.928	1.129	22.058	-.053	22.005	0	22.004
Y_s , м	0	13.544	13.544	-3.591	9.953	.043	9.996	-.001	9.995
Z_s , м	0	11.119	11.119	.91	12.028	-.026	12.003	0	12.003

Аналізуючи результати обчислення з різними кутами нахилу бачимо, що відхилення визначених ЕЗО при збільшенні кутів нахилу так саме зростають. У табл. 5 надані різниці $\delta = \text{ЕЗО}_{\text{виз}} - \text{ЕЗО}_{\text{іст}}$ тобто різниці визначених ЕЗО від їх істинних значень.

Таблиця 5

Різниці визначених ЕЗО від істинних при різних кутах нахилу знімків

Кути нахилу	кутові ЕЗО, °'			лінійні ЕЗО, м		
	δ_α	δ_ω	δ_κ	δ_x	δ_y	δ_z
3° екстр	0.6°	1.5°	0.2°	0.1	-0.1	-0.3
6° екстр	3.3°	2.3°	0.2°	-0.6	-0.2	-0.4
6° інтер	-1.2'	-0.7'	0.2'	0.004	-0.005	0.003

У табл. 4 кутові і лінійні різниці δ при екстраполяційному прив'язуванні закруглені до десятої долі. Так краще відчувається зв'язок деформацій двох нахилених знімків. Видно що деформація на кутових та лінійних ЕЗО має нелінійну залежність та великі значення. Бачимо стрибки деформації ЕЗО на повздовжньому та поперечному кутів нахилу знімка $\delta_\alpha = 3.3^\circ$, $\delta_\omega = 2.3^\circ$ та просторовій координаті $\delta_x = -0.6$ м. Така велика деформація ЕЗО приводить до суттєвих помилок у координатах точок на місцевості.

Видна різниця у деформації ЕЗО при екстраполяційному та інтерполяційному розташуванні ОЗ. Третій рядок табл. 4 показує деформацію кутових ЕЗО в інтерполяційному прив'язуванні вже не в градусах та десятих долях метра, як у екстраполяційному, а в хвилинах та міліметрах.

Висновок. Результати експериментальних досліджень дозволяють зробити висновок, що екстраполяційне прив'язування, незважаючи на простоту розташування і закріплення ОЗ дає гірший результат деформації ЕЗО та значно програє методу інтерполяційного розташування ОЗ і може пропонуватися при виконанні не топографічних задач. У свою чергу, метод інтерполяційного прив'язання рекомендується для збирання великомасштабних топографічних планів або просторових моделей при вирішенні реставраційних задач, охорони

пам'яток історичної спадщини, використанні ситуацій з ДТП та інших, де вимоги до точності достатньо суворі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Аналитические модели местности и снимков (макетные снимки)*. А.Н. Лобанов, В.Б. Дубиновский, А.И. Салищев и др.-1-е изд. Пер. и доп.-М.: Недра, 1989, 140 с.
2. *Катушков В.О.* Аналітичне модулювання макетних знімків// Інж. геодезія, Вип. 42, 2000, С. 66-73.
3. *Атаманенко Ю. Ю.* Спосіб визначення лінійних елементів зйомки місцевості безпіотною моделлю/ О.Є. Куліковська, Ю. Ю. Атаманенко, О. С. Намінат// Гірничий вісник. – Кривий Ріг. – 2016. – № 101. – С. 41 – 46.
4. *Ітераційний процес обчислення компланарної залежності в наземній прикладній фотограмметрії/ Катушков В.О., Шульц Р.В., Катушкова К.В., Никитенко А.І.*// Містобудування та територіальне планування. Київ, 2012, Вип. 46, С. 260 – 268.
5. *Fraser C. S.* Optimization of Precision in Close-Range Photogrammetry / C. S. Fraser // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. – №48(4). – 1982. – С. 561 – 570.
6. *Fraser C. S.* Network Design Optimization in Non-Topographic Photogrammetry / C. S. Fraser // XVth ISPRS Congress Technical Commission V: OTHER APPLICATIONS OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING, 17-29 June 1984, Rio de Janeiro, Brasil. – Rio de Janeiro. – 1984. – С. 296 – 307.

REFERENCES

1. Lobanov, A.N., Dubinovskii, V.B., Salischev, A.I., et al. (1989). *Analiticheskie modeli mestnosti I snsmkov (maretnue snimki)*[Analytical models of terrain and images (layout images)] Moskva: Nedra [in Russian].
2. Katushkov, V.O. (2000). Analiichne moduliuvannia maketnikh znimkiv [Layout images analytical modeling]. *Inzhenerna geodeziia – Engineering geodesy*, 42, 66-73 [in Ukrainian].
3. Atamanenko, Y.Y., Kulikovska, O.Y., et al.(2016). Spособ vuznachennia lineinyh elementiv ziomki mistevosti bezpilotnoim modelliu [The way to determine a surveying linear elements via UAV model]. *Girnychii visnyk – Mining bulletin*, 101, 41- 46 [in Ukrainian].
4. Katushkov,V.O., & Shults,R.V., et al.,(2012). Iteratsiinui protsess obchilennia komplanatornoi zalezhnosti v nazemniiprikladnoi fotogrammetrii [Urban Design and Territory Planning]. *Mistobuduvannia ta teritorialne planuvannia. - Urban Design and Territory Planning*, 46, 260 – 268 [in Ukrainian].
5. Fraser, C. S., (1982). Optimization of Precision in Close-Range Photogrammetry. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, American Society of Photogrammetry, 48(4), 561 – 570.
6. Fraser, C. S., (1984). Network Design Optimization in Non-Topographic Photogrammetry. XVth ISPRS Congress Technical Commission V: OTHER

APPLICATIONS OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING, 17–29, June 1984, Rio de Janeiro, Brasil, 296 – 307.

В.О. Катусков, Б.Р. Сосса

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ОДИНОЧНОГО
АНАЛИТИЧЕСКОГО АЭРОСНИМКА С ДРОНА**

На основании аналитического моделирования компланарной зависимости между точками на земле и их изображениями на аналитических аэроснимках рассмотрены особенности определения элементов внешнего ориентирования при съемке с борта беспилотного летательного аппарата. Показана деформация центральной проекции при экстраполярном и интерполярном расположении опознаков по которым решается обратная фотограмметрическая задача. По анализу даны рекомендации использования разных методов привязки к опознакам.

Ключевые слова: квадрокоптер, аналитический аэроснимок, элементы внешнего ориентирования, итерационное решение, натуральный жезл, экстраполяционное, интерполяционное расположение опознаков.

V. Katushkov, B. Sossa

**INVESTIGATION OF DEFORMATION OF A SINGLE ANALYTICAL
AEROGRAPH FROM A DRONE**

Experimental modeling of aerial photography was performed with a location determination of the drone - quadcopter and its referencing to the tags, which are located on the earth's surface. The experiment was made using tags coordinates calculated analytically and points on the ground-located object. It makes possible to eliminate errors caused by the use of real camera installed on low-power drones. The determination of orientation elements with a strict solution of the space resection is considered, when nine unknown orientation elements are calculated from the tags known spatial coordinates. It's possible to determine six instead of nine unknown elements by using pre-calibrated camera. These elements are three angular: two tilts and rotation of the aerial image and three linear: the center of projection spatial coordinates. The elements of orientation determination allow to store and define separate objects of road accident spatial position by solving a photogrammetric traverse computation. The study was made using minimal source material - a single aerial image, using to create a 3D model. In most cases, the created model is enough to provide a correct and objective analysis of the object that was captured. The study of the analytical model proves the expediency of using drones. Recommendations of tags location depending on surveying object spatial coordinates determination preliminary accuracy are given.

Keywords: drone; quadcopter; single image; orientation elements; analytical modeling; collinear dependence; natural bar; point scale.