УДК 528.721

М. ФИС¹, В. ГЛОТОВ², А. ГУНІНА², М. ПРОЦИК²

¹ Кафедра картографії та геопросторового моделювання, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна, тел. (067)-42-75-402, ел.пошта: mykhailo.m.fys@lpnu.ua

² Кафедра фотограмметрії та геоінформатики, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна, тел. (097)-03-06-572, ел. пошта: alla.v.hunina@lpnu.ua

РЕЗУЛЬТАТИ ЗАСТОСУВАННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ЗОВНІШНЬОГО ОРІЄНТУВАННЯ ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ АЕРОТОПОГРАФІЧНОГО ЗНІМАННЯ З БПЛА

Однією із проблем застосування БПЛА для високоточного картографування є те, що на цих апаратах неможливо встановити точну систему стабілізації для визначення кутових ЕЗО знімків, у зв'язку з чим виникає потреба розроблення методів точного знаходження ЕЗО. Сьогодні є немало розробок для визначення ЕЗО. Разом з тим, виникає низка питань під час їх практичної реалізації. Це стосується, передусім, спроби підвищення точності отримання координат точок об'єктів на місцевості. **Мета.** Дослідити можливість запропонованого алгоритму для визначення ЕЗО цифрових знімків, одержаних під час аерознімання з БПЛА. **Методика.** Основана на визначенні мінімуму функцій (двох типів), отриманих на основі умов колінеарності. Процес визначення ЕЗО реалізується за допомогою програмного забезпечення. Різноманітний набір програм дає можливість виконати такий пошук, а обґрунтоване початкове наближення ЕЗО забезпечує збіжність ітераційного процесу та визначення оптимальних параметрів [Нлотов, 2020; Заварзин, 2013; Березіна, 2018; Ким Хон Ир, 2017]. **Результати.** Запропонований підхід перевірено на відповідних цифрових зображеннях, отриманих під час аерознімання з БПЛА за контрольними точками, що дало можливість обґрунтувати ефективність запропонованої методики. Значення заданих СКП такі: $m_x = 0,15$ м, $m_y = 0,18$ м, $m_z = 0,40$ м. Після уточнення похибки вони дорівнювали $m_x = 0,06$ м, $m_y = 0,03$ м, $m_z = 0,25$ м. Аналіз наведених результатів підтверджує підвищення точності визначення координат за рахунок уточнення значень ЕЗО відносно отриманих у програмному пакеті Models та за запропонованим алгоритмом. **Наукова новизна.** Розроблено алгоритм, який дає можливість визначати значення ЕЗО, застосовуючи програмне забезпечення без залучення спеціальних програмних засобів оброблення цифрових зображень. **Практична значущість.** Передусім це дає можливість підвищити точність визначення ЕЗО для цифрових знімків, отриманих з БПЛА, та істотно розширити коло завдань з використанням БПЛА.

Ключові слова: математичне забезпечення; пакети прикладних програм; мінімум функції; безпілотний літальний апарат; елементи зовнішнього орієнтування.

Вступ

Необхідно зазначити, що технологія аерознімання з безпілотних літальних апаратів (БПЛА) сьогодні загалом відпрацьована, однак є ще достатньо питань, вирішенню яких потрібно приділити увагу [Галецький, 2012; Глотов, 2010, 2013, 2014]. Однією із проблем застосування БПЛА для високоточного картографування є неможливість встановлення на цих апаратах точної системи стабілізації для визначення кутових елементів зовнішнього орієнтування (ЕЗО) знімків [Глотов, 2020], у зв'язку з чим виникає потреба розроблення методів точного знаходження ЕЗО. Розглянемо деякі з останніх праць, які стосуються проблематики визначення ЕЗО цифрових знімків, отриманих у результаті аерознімання з БПЛА.

У публікації [Гриб, 2017] розглянуто сучасні моделі БПЛА як дешевший спосіб добування інформації, який здатний забезпечувати оперативними даними з високою розрізненістю та істотно доповнює джерела одержання даних систем розвідки, поряд з космічним

зніманням та аерозніманням. Однак це призводить до значного зростання обсягу інформації, що потребує опрацювання. Аналіз робіт з цієї тематики показав, що існують алгоритми обробки знімків, достатньо глибоко опрацьовані для даних космічного та висотного аерознімання, але вони не враховують особливості даних з БПЛА, такі як: невелика висота польоту і, як наслідок, незначна зона огляду; низька точність визначення елементів зовнішнього орієнтування знімальної апаратури; стохастичні збурення, спричинені щільними шарами атмосфери, які призводять до значних перспективних спотворень на зображенні, тощо. Уточнення значень ЕЗО сприятиме підвищенню точності визначення просторових координат точок об'єктів.

У статті [Симинев, 2003, 2012] автори наголошують, що для географічної прив'язки об'єктів, зображених на знімках, необхідно знати ЕЗО знімків у просторі. Визначення ЕЗО є одним із основних завдань фотограмметрії і називається оберненою засічкою. Запропонований авторами спосіб визначення

оптимального коефіцієнта масштабування нормальних рівнянь на основі аналізу сингулярних чисел гарантує отримання матриці системи нормальних рівнянь, а також забезпечує високу надійність і точність розв'язання задачі.

У праці [Заварзин, 2013] запропоновано методику для оперативного визначення ЕЗО оптико-електронної апаратури дистанційного зондування Землі, яка встановлюється на космічних апаратах, за вимірюваннями навігаційних приладів. Методика дає змогу здійснювати коригування і координатну прив'язку знімків, трансформування знімків, що істотно спрощує розв'язання фотограмметричних задач. Геометрична корекція, координатна прив'язка, відновлення зображення є одними з найскладніших процедур під час аналізу знімків дистанційного зондування Землі, від ефективності яких в кінцевому підсумку залежать достовірність і оперативність розпізнавання об'єктів або ситуацій, що потрапляють в поле огляду оптико-електронної апаратури.

У публікації [Березіна, 2018] проаналізовано методи координатної прив'язки зображень із застосуванням апроксимуючих функцій та відновлення ЕЗО класичними методами за допомогою рядів Тейлора. Встановлено, що ці методи не враховують особливостей знімків, отриманих з БПЛА, таких як наявність великих перспективних спотворень і недостатня точність початкових наближень. Досліджено можливість використання симплекс-методу деформуючого багатогранника для розв'язання поставленої задачі. Розглянутий у роботі метод, який використовує симплекс-метод деформуючого багатогранника, дає змогу відновлювати істинні значення ЕЗО, які надалі використовують для отримання географічних координат точок на знімку. Під час реалізації цього методу для визначення ЕЗО камери як незалежні змінні використано кути зовнішнього орієнтування. Просторове положення розраховано на підставі кутів та заданих реперних точок.

У статті [Hlotov, 2020] виконано мінімізацію функції, побудованої на підставі умови колінеарності, що забезпечує уточнення ЕЗО цифрових зображень. Запропонована функція – це сума квадратів різниць між вирахованими та даними спостережень опорних точок на відповідних цифрових зображеннях. Послідовність реалізації запропонованого алгоритму зумовлена тим, що врахування умови мінімуму цієї функції дає можливість отримати систему шести нелінійних рівнянь стосовно ЕЗО. Визначають ЕЗО двома способами: в першому випадку функцію G мінімізують безпосередньо одним з числових методів, а в другому – одержують як розв'язок системи рівнянь, що дає уточнені значення ЕЗО на підставі початкових наближень, отриманих безпосередньо із телеметрії БПЛА. Для контролю точності визначення ЕЗО застосовують

видозмінені умови мінімуму функції G , в яких відсутні операції диференціювання. В результаті отримують остаточні значення ЕЗО в момент знімання. Упровадження розробленого алгоритму дасть змогу істотно підвищити точність опрацювання великомасштабних ортофотопланів та топографічних планів, створених за матеріалами аерознімання з БПЛА.

У публікації [Ким Хон Ир, 2017] наголошено, що ЕЗО знімків, отриманих у результаті аерознімання, відіграють важливу роль у створенні ортофотопланів, визначенні положення й орієнтування камери під час знімання. Останнім часом поширення набуло знімання із БПЛА, які низько літають, особливістю яких є проблема стабілізації та орієнтування знімальної апаратури. У цих умовах проблему визначення параметрів зовнішнього орієнтування неможливо вирішити традиційними методами фотограмметрії. В роботі наведено алгоритм розв'язання рівняння колінеарності на основі апарату алгебри кватерніонів і метод визначення параметрів зовнішнього орієнтування незалежно від початкового значення і кута нахилу. Крім того, визначено елементи орієнтування в різних умовах, і підтверджено те, що ЕЗО визначаються незалежно від початкового значення.

У роботі [Шульц, 2015] розглянуто виконання попереднього розрахунку точності визначення координат точок за матеріалами аерофотознімання із застосуванням БПЛА. Наведено математичну модель визначення координат за парою аерознімків, що враховує застосування даних GNSS для визначення координат центрів фотографування та коригування інерціальної навігаційної системи (INS). Кутів елементи зовнішнього орієнтування у наведеній математичній моделі визначають за допомогою INS. Використовуючи алгоритм перетворення кореляційних матриць, автори отримали строгий вираз для виконання попереднього розрахунку точності. Методом варіювання одержано вираз для розрахунку впливу систематичних похибок

Мета

Дослідити можливість використання запропонованого алгоритму для визначення ЕЗО цифрових зображень, отриманих аерозніманням з БПЛА.

Методика

Сьогодні є немало розробок для визначення ЕЗО. Разом з тим, виникає низка питань щодо їх практичної реалізації. Це стосується, насамперед, спроби підвищити точність отримання координат точок об'єктів на місцевості. Розглянемо можливі варіанти розв'язування задачі.

Класичний підхід, використовуваний у фотограмметрії, полягає у застосуванні умови колінеарності та лінеаризації цих рівнянь із використанням ряду

Тейлора за змінними α , κ , X_S , Y_S , Z_S для подальшого визначення поправок до них [Дорожинський, 2008]. Розроблені на цій основі алгоритми реалізовано в деяких програмних продуктах, таких як Digital тощо, які достатньо добре себе зарекомендували та застосовуються у фотограмметричному виробництві.

Однак під час експлуатації цих програмних продуктів виникає низка зауважень, і насамперед, питання

оцінювання точності визначення параметрів ЕЗО. Хоча для цієї методики застосовують стандартні підходи математичного опрацювання геодезичних вимірів до критерію оптимальності, проте такий підхід не повністю відображає зміст задачі. Задачу оптимального визначення ЕЗО можна сформулювати як визначення екстремуму деякої функції. Для цього запишемо умову колінеарності так:

$$F(\alpha, \omega, \kappa, X_S, Y_S, Z_S) = \sum_{i=1}^n \left(x_i - x_0 + f \frac{a_1(X_i - X_S) + b_1(Y_i - Y_S) + c_1(Z_i - Z_S)}{a_3(X_i - X_S) + b_3(Y_i - Y_S) + c_3(Z_i - Z_S)} \right)^2 + \\ + \left(y_i - y_0 + f \frac{a_2(X_i - X_S) + b_2(Y_i - Y_S) + c_2(Z_i - Z_S)}{a_3(X_i - X_S) + b_3(Y_i - Y_S) + c_3(Z_i - Z_S)} \right)^2. \quad (1)$$

Вона ґрунтується на залежності між координатами на знімку та місцевості й відображає відхилення розрахованих за отриманими фотограмметричними

координатами та за значеннями, отриманими з вимірювань цифрових зображень. Обернений зв'язок дає подібну функцію:

$$G(\alpha, \omega, \kappa, X_S, Y_S, Z_S) = \sum_{i=1}^n \left(X_i - X_S - (Z_i - Z_S) \frac{a_1(x_i - x_0) + a_2(y_i - y_0) - a_3f}{c_1(x_i - x_0) + c_2(y_i - y_0) - c_3f} \right)^2 + \\ + \left(Y_i - Y_S - (Z_i - Z_S) \frac{b_1(x_i - x_0) + b_2(y_i - y_0) - b_3f}{c_1(x_i - x_0) + c_2(y_i - y_0) - c_3f} \right)^2. \quad (2)$$

Тоді задача пошуку ЕЗО зводиться до визначення мінімуму виразів (1) та (2):

$$F(\alpha, \kappa, X_S, Y_S, Z_S) \rightarrow \min \quad (3)$$

або

$$G(\alpha, \kappa, X_S, Y_S, Z_S) \rightarrow \min \quad (4)$$

Умови (3), (4), своєю чергою, породжують систему рівнянь (те саме a для G):

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial X_S} = 0, \frac{\partial F}{\partial Y_S} = 0, \frac{\partial F}{\partial Z_S} = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial \alpha} = 0, \frac{\partial F}{\partial \omega} = 0, \frac{\partial F}{\partial \kappa} = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Для реалізації умов (3), (4) чи (5) доцільно залучити математичні пакети, в яких є всі інструменти для їх виконання: можливість аналітичного взяття похідних,

мінімізація функцій багатьох змінних, розв'язування систем нелінійних рівнянь тощо. Використання цих програмних продуктів потребує задавання початкового наближення. Саме воно визначає кінцеві значення параметрів ЕЗО, які залежать, зокрема, і від його вибору. Все це є наслідком нелінійного характеру задачі. Тому вибір оптимальних значень тісно пов'язаний із варіюванням початкових значень.

Якщо значення елементів ЕЗО отримано за допомогою пакета Digital (або подібного), то логічно вибрати ці значення початковими для подальшого їх уточнення. Якщо вони відсутні, необхідно діяти так: кутові елементи вибрати нульовими, а лінійні значення – як середнє із координат опорних точок:

$$\alpha = \beta = \kappa = 0,$$

$$X_S = \frac{1}{n+1} \sum_{i=0}^n X_i, Y_S = \frac{1}{n+1} \sum_{i=0}^n Y_i, Z_S = \frac{1}{n+1} \sum_{i=0}^n Z_i + H. \quad (6)$$

Для параметра Z_S додають висоту знімання H . Очевидно, що таке початкове наближення не завжди гарантує збіжність ітераційних процесів розв'язування систем нелінійних рівнянь типу (5), проте числові експерименти підтверджують доцільність такого підходу [Hlotov, 2020].

Змодельємо реалізацію описаної методики на конкретному прикладі. Для цього розглянемо два знімки, забезпечені координатами опорних точок (табл. 1).

За початкове наближення приймаємо значення, отримані у результаті обробки даних програмою Digital, та в другому варіанті за формулами (6). За цими значеннями визначимо ЕЗО. За розглянутою методикою

знаходимо уточнені ЕЗО (табл. 2, другий та четвертий рядки) лівого та правого знімків, використовуючи систему (5). Обчислені значення параметрів ЕЗО для двох випадків збігаються, тобто вибір нульового наближення в нашому випадку не впливає на остаточний результат. Тому за відсутності інформації про значення ЕЗО можна вибирати за формулами (6).

Виникає питання оцінки точності. Єдиним критерієм перевірки є порівняння за контрольними точками, причому координати контрольних точок визначено за допомогою GPS-приймача, що гарантує коректний спосіб оцінювання (табл. 3).

Таблиця 1

Значення координат опорних точок та їх координати на лівому і правому знімках

	X, м	Y, м	Z, м	x _л , МКМ	y _л , МКМ	x _п , МКМ	y _п , МКМ
BR1-10_2019	5455641,65	670978,31	582,27	10060	-14961	2068	-11559
BR2-7_2019	5455813,10	670992,31	575,94	10382	3314	2559	6611
BR2-9_2019	5455778,60	670917,36	579,53	2839	-565	-5087	2583
BR2-13_2019	5455872,82	670972,23	573,72	7873	9240	89	12599
BR5-1_2019	5455728,07	670891,10	579,33	312	-6031	-7504	-2835
BR6-8_2019	5455914,58	670861,25	572,83	-3501	12792	-11196	15782

Таблиця 2

Визначені за програмою Digital за опорними точками та координатами на знімках ЕЗО значення

		α^0	ω^0	κ^0	X _s (м)	Y _s (м)	Z _s (м)
лівий	заданий	-0°37'48"	2°35'48'38"	-2°38'39"	5455770,89	670894,11	914,97
	уточнений	-0°57'50"	2°21'57"	-2°40'30"	5455772.18	670896.03	915.26
правий	заданий	-4°26'17"	0°36'42"	-3°18'18"	5455747,73	670989,43	911,44
	уточнений	-4°24'55"	0°40'53"	-3°20'17'	5455747.30	670989.30	911.25

Таблиця 3

Значення контрольних точок та їх координати на лівому і правому знімках

№ точки	X, м	Y, м	Z, м	x _л , МКМ	y _л , МКМ	x _п , МКМ	y _п , МКМ
BR1-9_2019	5455674,65	670954,56	581,33	7341	-11497	-629	-8154
1_2020_4br	5455681,20	670953,62	581,49	7204	-10789	-766	-7456
BR2-3_2019	5455708,83	670936,00	580,64	5173	-7889	-2762	-4630
BR3-1_2019	5455720,91	670905,58	579,65	1874	-6733	-5985	-3508
BR3-71_2019	5455755,5	670874,72	578,88	-1523	-3185	-9306	-67
BR5-6_2019	5455754,42	670862,69	578,72	-2792	-3355	-10532	-247
BR6-2_2019	5455788,67	670932,61	578,94	4390	553	-3543	3724
BR2-8_2019	5455804,21	670958,74	576,88	7001	2276	-885	5498
BR1-1_2019	5455819,72	670984,03	575,95	9493	3957	1661	7244
28_2014	5455743,12	670868,54	578,60	-2118	-4538	-9856	-1401
7_2019	5455850,70	670974,45	574,81	8303	7032	492	10347
BR2-14_2019	5455859,78	670921,31	574,42	2811	7718	5020	10892
BR1-4_2019	5455702,99	670933,05	580,74	4913	-8535	-3028	-5251
2_2020_4br	5455740,07	670862,74	578,64	-2731	-4866	-10440	-1728

Координати на знімку та на місцевості пов'язані формулами:

$$\begin{cases} X_A = X_{S_1} + (Z_A - Z_{S_1}) \frac{a_1(x_i - x_0) + a_2(y_i - y_0) - a_3f}{c_1(x_i - x_0) + c_2(y_i - y_0) - c_3f}, \\ X_A = X_{S_P} + (Z_A - Z_{S_P}) \frac{a_1(x_i - x_0) + a_2(y_i - y_0) - a_3f}{c_1(x_i - x_0) + c_2(y_i - y_0) - c_3f}, \\ Y_A = Y_{S_L} + (Z_A - Z_{S_L}) \frac{a_1(x_i - x_0) + a_2(y_i - y_0) - a_3f}{c_1(x_i - x_0) + c_2(y_i - y_0) - c_3f}, \\ Y_A = Y_{S_P} + (Z_A - Z_{S_P}) \frac{a_1(x_i - x_0) + a_2(y_i - y_0) - a_3f}{c_1(x_i - x_0) + c_2(y_i - y_0) - c_3f}. \end{cases} \quad (7)$$

Далі обчислюють значення просторових координат на місцевості з урахуванням значень ЕЗО (табл. 2) та вимірних значень координат на знімках (табл. 3). Зауважимо, що ця система перевизначена, а тому результати можуть відрізнятися, якщо вибрано різні рівняння для однозначності розв'язку. Тому, якщо

немає ніяких застережень, систему розв'язують за умови мінімального відхилення усіх рівнянь від нуля.

Для цих значень середні квадратичні похибки відхилень обчислено за формулами

$$\begin{aligned} m_X &= \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (X_i^{\text{ВИМ}} - X_i^{\text{ЕО}})^2}{n}}, \\ m_Y &= \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (Y_i^{\text{ВИМ}} - Y_i^{\text{ЕО}})^2}{n}}, \\ m_Z &= \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (Z_i^{\text{ВИМ}} - Z_i^{\text{ЕО}})^2}{n}}, \end{aligned}$$

Результати

Результати обчислень наведено в табл. 4.

Таблиця 4

**Середні квадратичні похибки координат
на місцевості**

похибка	задані	уточнені
$m_{x, м}$	0,15	0,06
$m_{y, м}$	0,18	0,03
$m_{z, м}$	0,40	0,25

Аналіз наведених в табл. 4 результатів підтверджує підвищення точності визначення координат за рахунок уточнення значень ЕЗО відносно отриманих в програмному пакеті Models та за запропонованим алгоритмом.

Наукова новизна та практичне значення

Розроблено алгоритм, який дає можливість обчислювати значення ЕЗО, застосовуючи програмне забезпечення без залучення спеціальних програмних засобів обробки цифрових зображень. Це насамперед дає можливість підвищити точність визначення ЕЗО для цифрових зображень, отриманих з БПЛА, та істотно розширити коло завдань, вирішуваних із використанням БПЛА.

Висновки

Досліджені критерії, що впливають на точні характеристики запропонованого способу, дають змогу зробити певні висновки:

1. Запропоновано та досліджено алгоритм визначення ЕЗО, який покращує їх визначення порівняно з наявним пакетом Digital.
2. Обов'язково необхідно вибирати початкове наближення ЕЗО; це можна робити за положенням розміщення опорних точок на місцевості або за логічними автопілота.
3. Точність визначення координат на місцевості за знімками потребує подальшого залучення нових інструментів для її підвищення.

Література

- Hlotov V., Fys M., Pashchetnyk O. (2020). Development of a methodics for improving the accuracy of determination of spatial coordinates of object points during air surveillance from a UAV. *Geodesy, Cartography, and Aerial Photography; Vol. 92, No. 92*, 45–54. URL: http://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2020/dec/23035/geodezia_922020-45-54.pdf.
- Березіна С., Логачов С., Солонець О. (2018). Метод координатної прив'язки знімків, отриманих з БПЛА, за елементами зовнішнього орієнтування. *Системи озброєння і військова техніка, № 1*, С. 76–83. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/soivt_2018_1_13.

- Галецький В., Глотов В., Колісниченко В., Прохорчук О., Церклевич А. (2012) Другий етап експериментальних робіт з аерознімання сільських населених пунктів БПЛА. *Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища GPS і GIS технології*: зб. наук. матер. XVII Міжн. наук.-техн. симпозиуму (Алушта, вересень 2012). Львів, С. 274–277.
- Глотов В., Церклевич А., Колісниченко В., Прохорчук О. (2013). Аналіз і перспективи аерофотознімання з БПЛА. *Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища GPS і GIS технології*: зб. наук. матер. XVIII Міжн. наук.-техн. симпозиуму. (Алушта, вересень 2013). Львів, С. 5–10.
- Глотов В., Церклевич А., Збруцький О., Колісниченко В., Прохорчук О., Карнаушенко Р., Галецький В. (2014). Аналіз і перспективи аерознімання з безпілотного літального апарата. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва, вип. I(27)*, С. 131–136.
- Глотов В., Гуніна А. (2016). Порівняльний аналіз сучасних методів опрацювання великомасштабних планів. *Геодезія, картографія і аерофотознімання, Вип. 83*, С. 53–63.
- Глотов В., Фис М. (2020). Оцінка точності кутових елементів зовнішнього орієнтування цифрових зображень, отриманих з БПЛА з застосуванням похідних неявно заданих функцій. Матеріали 25-ї міжнародної наук.-техн. конференції “Геофорум-2020” 1–3 квітня 2020 р., Львів–Яворів–Брюховичі, Україна. Львів: Видавництво Львівської політехніки, С. 3–6. URL: <http://zgt.com.ua/мнтк-геофорум-3-2-2-2/>
- Гриб Д., Карлов Д., Березіна С., Остапова А. (2017). Проблемні питання використання даних БПЛА при веденні розвідки, *Новітні технології – для захисту повітряного простору*: зб. тез доповідей Тринадцятої наукової конференції Харківського нац. університету Повітряних сил ім. Івана Кожедуба. 12–13 квітня 2017 р. Харків, 383 с. URL: <http://www.hups.mil.gov.ua/assets/doc/science/conference/13/section13.pdf>.
- Дорожинський О., Тукай Р. (2008). Фотограмметрія: підручник. Нац. ун-т “Львівська політехніка”. Л., 332 с.
- Заварзин В., Ли А. (2013). Методика определения элементов внешнего ориентирования для оперативной координатной привязки снимков оптико-электронной аппаратуры дистанционного зондирования Земли. *Инженерный журнал: наука и инновации, Вып. 9(21)*, С. 1–12. URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/908.html>
- Ким Хон Ир, Рю Чхоль Бом, Ким Жун Хян, Жен Чхол (2017). Исследование возможности использования кватернионов для определения параметров внешнего ориентирования в фотограмметрии.

Научные исследования, Вып. (5 (16)). URL: <https://scientificresearch.ru/images/PDF/2017/16/issledovanie-vozmozhnosti-ispolzovaniya.pdf>

Симинев А. (2003). Обратная фотограмметрическая засечка: новый подход к решению. *Математические методы в геоинформационных системах*: сб. науч. трудов. Ярославль, С. 69–77.

Симинев А., Тарасова Е. (2012). Обратная фотограмметрическая засечка: надежность решения задачи. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о*

Земле, 4, С. 129–134. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obratnaya-fotogrammetricheskaya-zasechka-nadezhnost-resheniya-zadachi/viewer>

Шульц Р., Войтенко С., Крельштейн П., Маліна І. (2015). До питання розрахунку точності визначення координат точок під час аерофотознімання з безпілотних літальних апаратів. *Інженерна геодезія, Вип. (62)*, С. 124–136. URL: <http://repository.knuba.edu.ua/bitstream/handle/987654321/1761/201562-124-136.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

M. FYS, V. HLOTOV, A. HUNINA, M. PROTSYK

¹ Department of Cartography and Geospatial Modeling, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery str., Lviv, 79013, Ukraine, tel. (067) -42-75-402, e-mail mykhailo.m.fys@lpnu.ua

² Department of Photogrammetry and Geoinformatics, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery str., Lviv, 79013, Ukraine, tel. (098) -59-21-463, e-mail alla.v.hunina@lpnu.ua

RESULTS OF THE SOFTWARE APPLICATION FOR DETERMINATION ELEMENTS OF EXTERNAL ORIENTATION OF DIGITAL IMAGES OF TOPOGRAPHIC AERIAL SURVEYING FROM UAV

One of the problems with the use of UAVs for high-precision mapping is the inability to install on these devices an accurate stabilization system to determine the angular EEO images, so there is a need to develop methods for accurate location of EEO. To date, there are many developments in the definition of elements of EEO. However, there are a number of issues in their practical implementation. This applies primarily to attempts to improve the accuracy of obtaining the coordinates of the points of objects on the ground. **Aim.** Investigate the possibility of the proposed algorithm for determining the elements of EEO of digital images obtained by aerial surveying from an UAV. **Methodology.** Based on the condition of collinearity, two types of functions are determined for which the minimum is searched. This process of determining the elements of the EEO is performed using software. A diverse set of programs makes it possible to implement such a search, and a reasonable initial approximation of the EEO and provides a definition of their optimal parameters [Hlotov, 2020; Zavarzin, 2013; Berezina, 2018; Kim Hon Ir, 2017]. **Results.** The proposed approach was tested on the corresponding digital images obtained by aerial surveying from UAVs at checkpoints, which made it possible to justify the effectiveness of the proposed method. The specified RMSE had the following values: $m_x = 0.15$ m, $m_y = 0.18$ m, $m_z = 0.40$ m. After specifying the steel error $m_x = 0.06$ m, $m_y = 0.03$ m, $m_z = 0.25$ m. The analysis of the unknown results confirms the improvement of the accuracy of coordinate determination by specifying the values of RMS relative to those obtained in the software package Models and the proposed algorithm. **Scientific novelty and practical significance.** An algorithm has been developed that makes it possible to determine the value of EEO using software without the use of special software for digital image processing. First of all, it makes it possible to improve the accuracy of EEO determination for digital images obtained from UAVs and allows to significantly expand the range of tasks using UAVs.

Key words: mathematical software; application packages; minimum functions; unmanned aerial vehicle; elements of external orientation.

References

- Hlotov V., Fys M., Pashchetnyk O. (2020). Development of a methodics for improving the accuracy of determination of spatial coordinates of object points during air surveillance from a UAV. *Geodesy, Cartography, and Aerial Photography*; Vol. 92, No. 92, 45–54. Access mode: <http://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2020/dec/23035/geodezia922020-45-54.pdf>.
- Berezina S., Logachov S., Solonets O. (2018). *Metod koordynatnoi pryv'язky znimkiv, otrymanykh z BPLA, za elementamy zovnishnoho oriientuvannia*. [Method of coordinate reference of images obtained from UAVs by elements of external orientation]. *Weapons systems and military equipment*, No. 1, 76–83. Access mode: http://nbuv.gov.ua/UJRN/soivt_2018_1_13.
- Galetsy V., Glotov V., Kolisnichenko V., Prokhorchuk O., Tserklevych A. (2012). Druhyi etap eksperymentalnykh robot z aeroxnimannia sil'skykh naselenykh punktiv BPLA [The second stage of experimental works on aerial

- surveying of rural settlements of UAVs]. *Geoinformation monitoring of the environment GPS and GIS technology: coll. science. mater. XVII International scientific and technical symposium. (Alushta, September 2012).* Lviv, 274–277.
- Glotov V., Tserklevych A., Kolisnichenko V., Prokhorchuk O. (2013). Analiz i perspektyvy aierofotoznmannia z BPLA [Analysis and prospects of aerial photography from UAVs]. *Geoinformation monitoring of the environment GPS and GIS technology: coll. science. mater. XVIII International scientific and technical symposium. (Alushta, September 2013).* Lviv, 5–10.
- Glotov V., Tserklevych A., Zbrutsky O., Kolisnichenko V., Prokhorchuk O., Karnaushenko R., Galetsky V. (2014). Analiz i perspektyvy aeroxnmannia z bezpilotnoho litalnoho aparata [Analysis and prospects of aerial photography from an unmanned aerial vehicle]. *Modern achievements of geodetic science and production, issue I (27)*, 131–136.
- Glotov V., Gunina A. (2016). Porivnialnyi analiz suchasnykh metodiv opratsiuvannia velykomasshtabnykh planiv. [Comparative analysis of modern methods of processing large-scale plans]. *Geodesy, cartography and aerial photography, Vol. 83*, 53–63.
- Glotov V., Fis M. (2020). Otsinka tochnosti kutovykh elementiv zovnishnoho oriiientuvannia tsyfrovyykh zobrazhen otrymanykh z bpla z zastosuvanniam pokhidnykh neiiavno zadanykh funktsii. [Estimation of accuracy of angular elements of external orientation of digital images obtained from UAVs using implicitly given functions]. *Proceedings of the 25th International Scientific and Technical Conference “Geoforum-2020” April 1–3, 2020, Lviv–Yavoriv–Bryukhovychi, Ukraine, Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House*, 3–6. Access mode: <http://zgt.com.ua/МНТК-геофорум-3-2-2-2-2/>
- Hryb D., Karlov D., Berezina S., Ostapova A. (2017). Problemni pytannia vykorystannia danykh BPLA pry vedenni rozvidky [Problematic issues of using UAV data in reconnaissance]. *New technologies – for airspace protection: Coll. abstracts of the Thirteenth Scientific Conference of the Ivan Kozhedub Kharkiv National University of the Air Force. April 12–13. Kharkiv*, 383 p. Access mode: <http://www.hups.mil.gov.ua/assets/doc/science/conference/13/section13.pdf>.
- Dorozhynsky O., Tukay R. (2008). *Fotogrammetriia [Photogrammetry: a textbook]. Nat. Lviv Polytechnic University. Lviv*, 332 p.
- Zavarzin V., Lee A. (2013). Metodika opredeleniya elementov vneshnego orientirovaniya dlya operativnoy koordinatnoj privyazki snimkov optiko-elektronnoy apparatury distancionnogo zondirovaniya Zemli [Methods for determining the elements of external orientation for the operational coordinate binding of images of optoelectronic equipment for remote sensing of the Earth]. *Engineering Journal: Science and Innovation, Iss. 9 (21)*, 1–12. Access mode: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/908.html>
- Kim Hon Il, Ryu Chhol Bom, Kim Rong Hyang, Zhen Chhol (2017). Issledovanie vozmozhnosti ispol'zovaniya kvaternionov dlya opredeleniya parametrov vneshnego orientirovaniya v fotogrammetrii. [A study of the possibility of using quaternions to determine the parameters of external orientation in photogrammetry]. *Scientific research, Vol. (5 (16))*. Access mode: <https://scientificresearch.ru/images/PDF/2017/16/issledovanie-vozmozhnosti-ispolzovaniya.pdf>
- Шульц Р., Войтенко С., Крельштейн П., Малина І. (2015). До питання розрахунку точності визначення координат точок під час аерофотознімання з безпілотних літальних апаратів. *Інженерна геодезія, Bun. (62), С. 124–136*. Access mode: <http://repository.knuba.edu.ua/bitstream/handle/987654321/1761/201562-124-136.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Simineev A. (2003). Obratnaya fotogrammetricheskaya zasechka: novyj podhod k resheniyu [Reverse photogrammetric notch: a new approach to the solution]. *Mathematical methods in geoinformation systems: sat. scientific works*, 69–77.
- Simineev A., Tarasova E. (2012). Obratnaya fotogrammetricheskaya zasechka: nadezhnost' resheniya zadachi. [Reverse photogrammetric notch: the reliability of the problem] *Bulletin of St. Petersburg University. Earth Sciences, (4)*, 129–134. Access mode: <https://cyberleninka.ru/article/n/obratnaya-fotogrammetricheskaya-zasechka-nadezhnost-resheniya-zadachi/viewer>
- Schultz R., Voitenko S., Krelstein P., Malina I. (2015). Do pytannia rozrakhunku tochnosti vyznachennia koordynat tochok pid chas aerofotoznmannia z bezpilotnykh litalnykh aparativ [On the question of calculating the accuracy of determining the coordinates of points during aerial surveying from unmanned aerial vehicles]. *Engineering Geodesy, Iss. (62)*, 124–136. Access mode: <http://repository.knuba.edu.ua/bitstream/handle/987654321/1761/201562-124-136.pdf?sequence=1&isAllowed=y>