

**В. Глотов, О. Пащетник**  
Національний університет “Львівська політехніка”

## **ЛІНІЙНИЙ СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ВНУТРІШНЬОГО ОРІЄНТУВАННЯ ЦИФРОВИХ НЕМЕТРИЧНИХ ЗНІМАЛЬНИХ КАМЕР**

© Глотов В., Пащетник О., 2013

*Приведен линейный способ определения элементов внутреннего ориентирования неметрических цифровых съёмочных камер. Акцентируется внимание на унифицированность средств, применяемых для реализации способа.*

*In proposed paper presents the linear method of determination of the digital unmetrical survey cameras of the elements of internal orientation. The attention is stressed on standartization of facilities which are used for realization of method.*

**Постановка проблеми.** Процес впровадження цифрових неметричних знімальних камер у наземне стереофотограмметричне знімання набув сьогодні достатнього поширення, оскільки сучасна фотограмметрія широко використовує цифрові методи для опрацювання зображень. Однак, із появою неметричних професійних та напівпрофесійних знімальних камер не лише спростилися усі види робіт, але й з'явилося багато проблем, що вимагають вирішення. Однією з таких проблем є розроблення способів визначення елементів внутрішнього орієнтування цифрових знімальних камер, оскільки їх значення значно впливає на точність визначення координат точок об'єктів, що підлягають дослідженню.

На сучасному етапі розвитку фотограмметрії існує велика кількість методів (способів) визначення елементів внутрішнього орієнтування цифрових знімальних камер, однак вони не завжди відповідають висунутим вимогам за точністю та інформативністю. Деякі з них потребують значних часових витрат та унікального калібрувального обладнання. За таких обставин необхідно розробляти більш дешеві та мобільні способи калібрування неметричних знімальних камер та систем.

**Зв'язок із важливими науковими і практичними завданнями.** Запропонований спосіб може бути використаний при визначенні елементів внутрішнього орієнтування та подальшого застосування способу у фотограмметрії в різних галузях науки і техніки (в архітектурних обмірах, військовій справі, дослідження деформацій інженерних споруд, медицині, в растровій електронній мікроскопії, медицині тощо), що дасть змогу значно підвищити точність визначення координат об'єктів, що досліджуються, та спростити технологію знімання [15–17].

**Аналіз останніх досліджень та публікацій, присвячених розв'язанню цієї проблеми.** Питанням калібрування неметричних камер та їх дослідження присвячено велику кількість наукових праць. Розглянемо деякі з них.

У результаті проведеної роботи автори [3] розробили спеціальну методичку геометричного калібрування скануючих пристроїв на лінійних ПЗЗ-детекторах, що передбачає панорамне знімання досліджуваною камерою і вимірювання теодолітом напрямків на ряд контурних точок, що зобразилися на панорамі, знімання яких виконано різними ПЗЗ-лінійками в один і той самий

момент часу. Для реалізації цієї методики було розроблено спеціальний стенд і програмне забезпечення для автоматизованої обробки вимірювань та обчислення координат лінійних ПЗЗ-детекторів у внутрішній фотограмметричній системі координат камери. Оцінювали точність обчислених координат крайніх чуттєвих елементів лінійного ПЗЗ-детектора, розраховуючи значення нормованого коефіцієнта кореляції Браве–Пірсона. Калібрування макета камери МСУ-100 (багатозонального знімального пристрою, розробленого для космічного апарату “Метеор-3М”) показало, що середнє квадратичне відхилення обчислених координат чуттєвих елементів ПЗЗ-детекторів знаходиться в межах 0,5 розміру піксела.

У публікації [5] наведено конструкцію трикамерної фотоплатформи, встановленої на спеціально розробленому безпілотному літальному апараті ПП-45, яка забезпечила значне збільшення захоплення території одним кадром (поля зору фотографічної системи). Розглянуто питання калібрування знімків і зшивання зображень. Калібрували камери з використанням плоского тест-об’єкта за методикою [2]. Для повного калібрування камер координати вузлової точки об’єктива визначались за допомогою електронного тахеометра. Методикою було передбачено трикратне знімання тест-об’єкта кожною знімальною камерою. За результатами знімання було визначено усереднені параметри калібрування трикамерної знімальної системи, оцінки продуктивності та якості експериментальної аерофотознімання (елементи внутрішнього орієнтування і знімки, приведені до центральної проєкції або параметри калібрування у вигляді елементів внутрішнього орієнтування і коефіцієнтів полінома, що описували дисторсію зображення). Недоліком цього методу є те, що при калібруванні цифрових знімальних камер за плоским тест-об’єктом виникає необхідність у вимірюванні координат великої кількості маркованих точок у вигляді хреста, кола, марок, сітки квадратів тощо. Відповідно, якщо цей алгоритм не автоматизований, то процес калібрування буде довготривалим.

У роботі [1] наведено два способи калібрування знімків на рівнинному випробувальному полігоні: «двоюрисний спосіб» та «одноюрисний спосіб». Найбільш строгим виявився одноюрисний спосіб, сутність якого полягала у вирішенні обернених просторових фотограмметричних засічок з обчисленням кутових елементів зовнішнього орієнтування, елементів внутрішнього орієнтування та параметрів фотограмметричної дисторсії. Координати центрів знімання при цьому необхідно визначити завчасно, наприклад, за результатами супутникового позиціонування. Калібрувальний полігон складався із 441 точки, кожна з яких було закріплено металевим штирем завдовжки 1 метр і замарковано бетонним майданчиком діаметром 35 см. Середнє перевищення між точками полігону становило 2 метри. Такі параметри полігону дали змогу калібрувати широкоформатні камери АФА типу RC-30, DMC, UltraCam. Водночас було забезпечено достатню густоту опорних точок для дослідження малоформатних і середньоформатних цифрових камер. Оцінювали ефективність калібрування знімків, будуючи маршрути фототріангуляції за знінками досліджуваного полігону в ЦФС «PHOTOMOD». Аналіз калібрування за цим способом показав, що результати розрахунків для знімків різних масштабів значно відрізняються. Спостерігається збіжність результатів за знінками одного маршруту. Як відомо, при калібруванні необхідно використовувати знімки з однаковим розташуванням опорних точок. Результати досліджень також показали, що в реальних умовах знімання досліджуваного полігону малоімовірна повна ідентичність схем обернених засічок для всіх знімків, що задіяні в калібруванні. При переході від маршруту до маршруту зображення полігону на аерознімках змінювало своє положення і, відповідно, на кожному знімку виникла своя, унікальна зв’язка проєктувальних променів. Хоча відмінність не дуже значна, однак це може вплинути на результати калібрування, оскільки розв’язання системи рівнянь для таких неоднакових схем оберненої засічки будуть нестійкими, змінюватися при переході від однієї групи знімків до іншої. Крім того, слід зауважити, що параметри калібрування, отримані на рівнинному полігоні, залежать від похибок координат центрів знімання. В зв’язку з цим при калібруванні камер необхідно додатково досліджувати супутникові приймачі, що забезпечують визначення координат центрів знімання, що ускладнює процес калібрування цим способом.

Ще одна робота присвячена калібруванню цифрової знімальної камери (Sony DSC-H50) [4]. У цій публікації описано метод визначення сумарної дисторсії цифрових зображень. Автор розробив алгоритм розв'язання задачі, який складається з декількох етапів: створення ідеального зображення тестового об'єкта за його реальним знімком, побудова векторної діаграми дисторсії зображення, нелінійний регресійний аналіз апроксимуючих функцій, розв'язання задачі інтерполяції, коригування зображення об'єкта дослідження. Як тестовий об'єкт використовували квадратну сітку. Було проведено декілька експериментальних досліджень, в яких варіювались: розмір сітки, фокусна віддаль, розрізнявальна здатність та відстань від камери до сітки. Під час експериментів автор виявив, що дисторсія цифрового зображення залежить від величини фокусної віддалі, і не дуже істотно – від відстані до об'єкта, що підлягає дослідженню. Крім того, при використанні полінома третього ступеня величина достовірності апроксимації досліджуваної функції становила 0,98–0,99.

**Невирішені частини загальної проблеми.** Однією із частин проблеми, яку необхідно розв'язати, є визначення фокусної віддалі та координат головної точки неметричних цифрових знімальних камер.

**Постановка завдання.** Завдання полягає у тому, щоб розробити лінійний спосіб визначення фокусної віддалі цифрових знімальних камер. Особливістю цього способу мають бути технологічність та уніфікованість стосовно використовуваних приладів.

**Виклад основного матеріалу.** В попередніх дослідженнях [6–10, 12–14] автори вже було представлено декілька способів визначення елементів внутрішнього орієнтування (координат головної точки, фокусної віддалі та еквівалентної фокусної віддалі варіооб'єктива) цифрових неметричних знімальних камер, які можна реалізувати за допомогою неноменклатурного обладнання, тобто існуючих і поширених у топографо-геодезичному (фотограмметричному) виробництві уніфікованих пристроїв і приладів.

У цій статті запропоновано новий спосіб визначення фокусної віддалі, який заснований на дефініції лінійних вимірів на цифровому зображенні. Суть запропонованого способу є такою. Якщо зазнімкувати квадратний фрагмент контрольно-вимірної сітки, яка розташована в горизонтальній площині та відповідно зорієнтована, то отримаємо зображення у вигляді рівнобічної трапеції  $abcd$  (рис. 1).

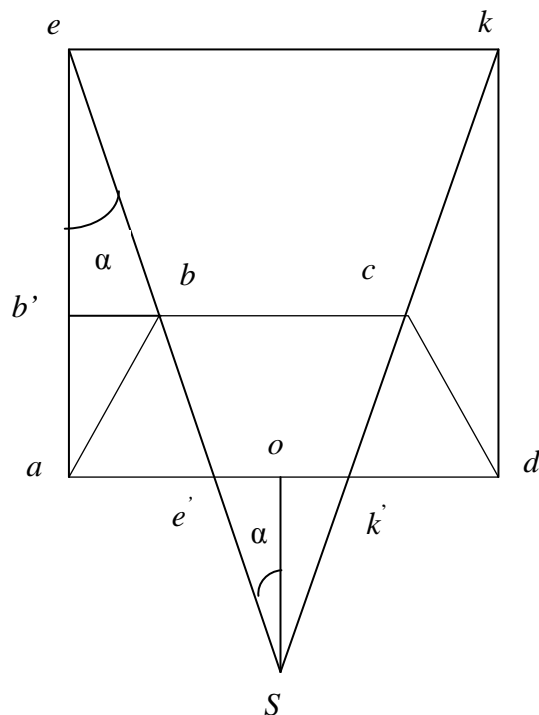


Рис. 1. Теоретичні основи способу визначення фокусної віддалі

Тепер, взявши за основу більший бік трапеції  $ab$ , на її основі збудуємо квадрат  $aekd$ . Проведемо проєктувальні промені через точки  $eb$  і  $kc$ , у перетині отримаємо точку проєкції  $S$ . З точки  $S$  опустимо перпендикуляр на сторону  $ad$  (точка  $o$ ). Утворений відрізок  $oS$  буде фокусною віддалю знімальної камери. Для її знаходження розглянемо спочатку трикутник  $b'be$  р, за яким знайдемо  $tg \alpha$ :

$$tg \alpha = b'b/eb' \quad (1)$$

За трикутником  $ae'e'$  обчислимо катет  $ae'$ :

$$ae' = ae \cdot tg \alpha \quad (2)$$

Оскільки трикутник  $e'oS$  подібний до трикутника  $ae'e'$ , то  $e'o = ae \cdot (1 - tg \alpha)$ . Тоді:

$$oS = (ad \cdot b'e/2b'b) - ad \quad (3)$$

Отже, задачу розв'язано строго.

Розглянемо технологію визначення фокусної віддалі. Встановлюють два штативи у безпосередній близькості один від одного. За допомогою накладного рівня горизонтують підставки. На одну з них встановлюють цифрову камеру з допомогою втулки, а на другу (у горизонтальному стані) – фрагмент контрольно-вимірної сітки (рис. 2).



Рис. 2. Загальний вигляд розташування приладів при визначенні фокусної віддалі

Орієнтують цифрову камеру відносно контрольно-вимірної сітки так, щоб мітки фокатора проходили через центральну вертикальну риску контрольно-вимірної сітки, після чого виконують знімання сітки. Надалі на цифровій фотограмметричній станції (ЦФС «Дельта-2») у вікні «Взаємне орієнтування» проводять виміри відповідних координат сторін, які фігурують у формулі (3) та обчислюють фокусну віддаль (рис. 3).



Рис. 3. Фрагмент зображення контрольно-вимірної сітки

Для апробації запропонованого способу розрахуємо апріорну оцінку точності визначення фокусної віддалі. З цією метою продиференціюємо за всіма змінними величинами та перейдемо до середньої квадратичної похибки:

$$m_f = \sqrt{2} \left[ \left( \frac{c}{2b} - 1 \right)^2 m_a^2 + \left( \frac{a}{2b} \right)^2 m_c^2 + \left( \frac{ac}{2b^2} \right)^2 m_b^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

де  $a - ad$ ,  $b - b'b$ ,  $c - b'e$ .

Враховуючи значення вимірів  $a=13,135$  мм,  $b=2,178$  мм,  $c=11,606$  мм,  $m_a=m_b=m_c=2$  мкм, тоді  $m_f=0,02$  мм, що не перевищує допусків [9–11].

Для апробації способу визначали фокусну віддаль камери Canon EOS 450D № 2280509198 з позначкою 55 мм. У результаті вимірів та обчислень фокусна віддаль у цьому діапазоні склала 51,552 мм. Відповідна дефініція фокусної віддалі для цієї камери, яку визначено тригонометричним способом, – 51,543 мм, що не перевищує розрахункової точності [11].

### Висновки:

1. У результаті аналізу способів визначення елементів внутрішнього орієнтування цифрових неметричних знімальних камер за останніми публікаціями було з'ясовано проблеми, що виникають під час розв'язання цих задач.

2. Наведено теорію способу визначення фокусних віддалей для цифрових знімальних камер, який дає змогу оперативнo в камеральних умовах визначити фокусну віддаль з відповідною точністю, що не перевищує допустимої та точності вимірювання координат знімків на цифрових фотограмметричних станціях [9–11].

3. Запропонований лінійний спосіб визначення елементів внутрішнього орієнтування неметричних знімальних камер за конструкторським та технологічним рішеннями можна реалізувати за допомогою простого та недорогого обладнання, існуючих і поширених в топографо-геодезичному (фотограмметричному) виробництві уніфікованих пристроїв і приладів.

4. В подальших дослідженнях планується удосконалити запропонований спосіб з метою підвищення точності визначення фокусної віддалі цифрових камер, що досліджуються.

1. Быков А.Л. Исследования методики калибровки снимков на равнинном испытательном полигоне / А.Л. Быков, В.Л. Быков, Л.В. Быков // Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология: VIII Междунар. науч. конгр., 10–20 апреля 2012 г., Новосибирск: СГГА (Россия). – Т. 1. – С. 50–55 (180 с.). 2. Быков В.Л. Полевая калибровка снимков с использованием средств спутникового позиционирования / В.Л. Быков // Геодезия и картография – 2007 – № 9. – С. 39–43. 3. Василейский А.С. Методика наземной геометрической калибровки съёмочных камер на линейных ПЗС / А.С. Василейский, М.М. Железнов, Я.Л. Зиман, И.В. Полянский / Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса. – М.: Институт космических исследований РАН, 2005. – Т. 2. – № 1. – С. 216–221. 4. Жимбуева Л.Д. Метод определения суммарной дисторсии цифровых изображений / Л.Д. Жимбуева // Компьютерная оптика. – 2011. – Т. 35. – № 3. – С. 347–355. 5. Костюк А.С. Методика калибровки и предварительной обработки снимков, полученных трехкамерной фотографической системой с беспилотного летательного аппарата / А.С. Костюк, А.Л. Быков, Л.В. Быков // Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология: VIII Междунар. науч. конгр., 10–20 апреля 2012 г., Новосибирск: СГГА (Россия). – Т. 1. – С. 28–31 (180 с.). 6. Пат. на винахід № 94376 Україна, МПК UA G01M 11/02. Спосіб визначення фокусної віддалі цифрової знімальної камери / Глотов В.М., Пацетник О.Д.; заявник та власник патенту Національний університет "Львівська політехніка". – № а 2010 12265; подан. 18.10.2010; опубл. 26.04.2011, Бюл. № 8. 7. Пат. на винахід № 99984 Україна, МПК UA G01C 11/00. Спосіб

визначення фокусної віддалі цифрової неметричної знімальної камери / В.М. Глозов, О.Д. Пацетник; заявник та власник патенту Національний університет "Львівська політехніка". – № а 2011 09071; подан. 20.07.2011 р., опубл. 25.10.2012, Бюл. № 20. 8. Пат. на корисну модель № 50155 Україна, МПК UA 19 U 13, G01C 11/00 Спосіб визначення планових елементів внутрішнього орієнтування цифрових знімальних камер / В.М. Глозов, О.Д. Пацетник; заявник та власник патенту Національний університет "Львівська політехніка". – № u200912908; подан. 14.12.2009; опубл. 25.05.2010, Бюл. № 10. 9. Пацетник О.Д. Визначення необхідної точності фокусної віддалі цифрових неметричних знімальних камер / В.М. Глозов, О.Д. Пацетник // Геодезія, картографія і аерофотознімання: міжв. наук.-техн. зб. – Л., 2009. – Вип. I – С. 231–237. 10. Пацетник О.Д. Визначення апріорної точності планових елементів внутрішнього орієнтування цифрової камери Canon EOS 350D / В.М. Глозов, О.Д. Пацетник // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: збірн. наук. праць. – Л., 2009. – № I(17). – С. 217–221. 11. Пацетник О.Д. Розробка та дослідження способів визначення елементів внутрішнього орієнтування неметричних цифрових знімальних камер : дис. на здобуття наук. ступеня кандидата техн. наук: 05.24.01 / О.Д. Пацетник. – Львів, 2012. – 222 с. 12. Пацетник О.Д. Спосіб визначення планових елементів внутрішнього орієнтування цифрових неметричних знімальних камер / В.М. Глозов, О.Д. Пацетник // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів, II (18). – 2009. – С. 75–79. 13. Пацетник О.Д. Спосіб визначення зміни еквівалентної фокусної віддалі варіооб'єктива цифрової неметричної камери / В.М. Глозов, О.Д. Пацетник // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів, I (21). – 2011. – С. 150–153. 14. Пацетник О.Д. Спосіб визначення фокусної віддалі цифрових неметричних знімальних камер / В.М. Глозов, О.Д. Пацетник // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів, II (20). – 2010. – С. 150–153. 15. Уставич Г. А. Применение неметрических цифровых камер при выполнении инженерно-геодезических работ на промплощадке / Г.А. Уставич, В.А. Кошелев, Я.Г. Пошивайло, Т.А. Хоменко // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка, 2006. – № 4. – С. 11–15. 16. Cardenal J. Evaluation of a digital non metrical camera (Canon D 30) for the photogrammetric recording of historical bulding [Текст] / J. Cardenal, E. Mata, P. Castro, J. Delgado, M. Hernandez i ін. // XXXV congress ISPRS: the International Archives of the Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – Istanbul Website, 23 October, 2004y. – P.564–569. – Режим доступу: <http://www.ISPRS.org/istanbul2004/comm5/papers/617.pdf>. 17. Tokarczyk R. Fotogrametria cyfrowa w zastosowaniach medycznych do pomiaru ciała ludzkiego – przegląd i tendencje rozwojowe systemów pomiarowych / R. Tokarczyk // Геодезія, картографія і аерофотознімання: укр. міжвідом. наук.-техн. зб. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2005.– Вип. 66. – С. 233–241.