



ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ТОЧНОСТІ СТЕРЕОПАРИ КОСМІЧНИХ ЗНІМКІВ ІЗ СУПУТНИКА WORLDVIEW-2

Выполнено оценивание геометрической точности ортотрансформированных снимков со спутника WorldView-2. Для ортотрансформирования использовано математическую модель сенсора RPC и полученную со стереопары цифровую модель местности. При этом опорные точки не использовались. Установлено, что полученные таким способом ортоснимки удовлетворяют требованиям к точности карт масштаба 1:10 000.

Geometric accuracy of orthorectified imagery from WorldView-2 satellite is analyzed. Mathematical sensor model RPC and the digital surface model, extracted from the stereo pair, were used for orthorectification. Ground control points were not used. It is found, that obtained in this manner orthoimagery satisfies the accuracy requirements for topographic maps scale 1:10 000.

Вступ. Супутник WorldView-2 запущено 8 жовтня 2009 р. з авіабази Ванденберг (штат Каліфорнія, США), а перші знімки отримано у січні 2010-го. Розрахований термін його перебування на орбіті становить 10-12 років. Супутник здатен виконувати знімання до 975 000 км² земної поверхні за добу та отримувати знімки з просторовою роздільною здатністю 0,46 м у панхроматичному каналі й 1,84 м у мультиспектральному. Проектування і розроблення WorldView-2 здійснювалось паралельно з WorldView-1 компанією DigitalGlobe. Обидва супутники за своїми технічними характеристиками схожі; принципова різниця між ними тільки в тому, що WorldView-1 веде знімання у панхроматичному каналі, а WorldView-2 – у панхроматичному та мультиспектральному. Разом із супутниками GeoEye-1, QuickBird та IKONOS вони утворюють сузір'я супутників надвисокої просторової роздільної здатності, що може виконувати знімання однієї і тієї ж точки земної поверхні навіть декілька разів на добу. Такі характеристики дають підстави говорити про значний інтерес до знімків з WorldView-2 з боку картографів як можливий альтернативний спосіб створення топографічних карт і планів.

Аналіз попередніх публікацій з теми дослідження. Питання дослідження геометричної точності одиночних знімків з WorldView-2 висвітлено досить детально у зарубіжних публікаціях. У працях [1, 2] проаналізовано геометричні характеристики одиночних знімків з WorldView-2, ортотрансформованих із використанням загальнодоступної цифрової моделі рельєфу (ЦМР) SRTM та набору опорних точок. Автор цих публікацій робить такий висновок: загалом знімки відповідають заявленій поставці даних геометричній точності та можуть використовуватися для створення ортофотопланів масштабу 1:5000 і ортофотокарт масштабу 1:10 000 залежно від кількості опорних точок, що використовуються для уточнення поставлених RPC-коефіцієнтів. Аналогічні висновки автора праці [6]. У джерелі [8] аналізуються геометричні характеристики стереопари знімків з WorldView-2 з точки зору можливості побудови за ними цифрових моделей місцевості (ЦММ) та отримання тривимірних моделей топографічних об'єктів.

Постановка завдання. Автору не вдалося знайти опублікованих робіт про геометричну точність стереопари WorldView-2 та її використання для

топографічних цілей. Тому вважаємо таке дослідження актуальним. Отже, в даній статті йтиметься про геометричну точність ортотрансформованих знімків, отриманих зі стереопари WorldView-2, та про можливість їх використання для топографічного картографування місцевості.

Основні результати дослідження. Супутник WorldView-2 знімає у панхроматичному і восьми спектральних діапазонах (табл. 1). Місцевість сканується за технологією "pushbroom" по всій ширині поля зору супутника – 16,4 км.

Таблиця 1. Спектральні діапазони супутника WorldView-2

Спектральний діапазон	Довжина хвилі, нм
Панхроматичний	450-800
Узбережжя	400-450
Синій	450-510
Зелений	510-580
Жовтий	585-625
Червоний	630-690
Крайній червоний	705-745
Ближній інфрачервоний 1	770-895
Ближній інфрачервоний 2	860-1040

Синій, зелений, червоний, обидва інфрачервоні та панхроматичний діапазони є традиційними для супутників надвисокої роздільної здатності, тоді як інші три є нововведенням у WorldView-2 і призначені для поглибленого мультиспектрального аналізу [9].

Стереопари космічних знімків з WorldView-2 доступні для трьох рівнів оброблення: Basic Stereo, Orthoready Stereo та GeoStereo. На рівні оброблення Basic Stereo виконується радіометрична корекція та усуваються геометричні спотворення за внутрішню геометрію сенсора. У комплекті поставляються RPC-коефіцієнти, які максимально апроксимовані до фізичної моделі сенсора. Отже, стереопара готова до процесу фотограмметричного оброблення.

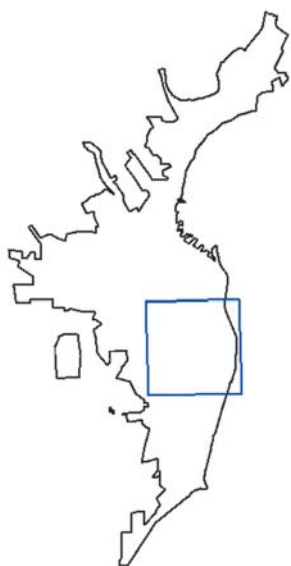
На рівні оброблення Orthoready Stereo виконується радіометрична корекція, усуваються геометричні спотворення за внутрішню геометрію сенсора, знімок проектується на площину в певній картографічній проекції і виконується його ортотрансформування на середню висоту місцевості без використання ЦМР. Такий рівень оброблення більше підходить для користувачів, яким не потрібна висока геометрична точність знімків, оскільки трансформування знімка на середню висоту місцевості робить



його непридатним для подальшого трансформування з використанням ЦМР. Після цього знімок готовий до використання в геоінформаційних системах.

Рівень GeoStereo призначений для поглибленого фотограмметричного оброблення: тривимірна візуалізація об'єктів, отримання детальних ЦММ, одержання тривимірних векторних моделей топографічних об'єктів тощо. Геометрична точність тут не має особливого значення, головне при цьому – оптимальні кути конвергенції для виконання вищезгаданих операцій.

У даному дослідженні було використано стереопару панхроматичних і мультиспектральних зображень рівня оброблення Basic Stereo, яку автору люб'язно надала компанія ТВІС (м. Київ) для експериментальних цілей. Знімки мають перекриття 100 %. Їх отримано 11 червня 2013 р. з одного витка. Досліджувана територія – центральна частина м. Одеси (мал. 1). Вона характеризується наявністю щільної забудови, незабудованих місць і морського узбережжя та має квадратну форму з розміром сторони 5 км і площею 25 км². Метадані про стереопару подано в табл. 2.



Мал. 1. Межа Одеси (чорний колір) та досліджувана територія (синій колір)

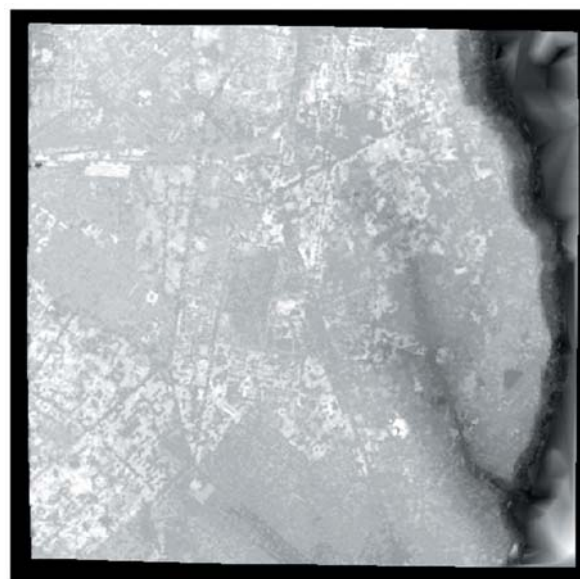
Відношення базису фотографування до висоти (коефіцієнт B/H) становить 0,57; кут конвергенції – 33°. За висновками авторів публікації [5], такий кут не є ідеальним для отримання високої вертикальної та горизонтальної точності стереопари. Найвища можлива точність досягається при збільшенні кута конвергенції до 60°, проте при такому куті при стереозніманні можливе потрапляння деяких об'єктів або їх ділянок у зону невидимості.

Експериментальні дослідження виконано в програмному забезпеченні ENVI 5. На першому етапі було отримано ЦММ зі стереопари панхроматичних зображень. Зв'язувальні точки виявлено в автоматичному режимі за допомогою кореляційних технік пошуку ідентичних точок на знімках стереопари. Зіставлення виконувалось порівнянням статистичних даних про яскравість і контрастність у кожній ділянці зображення встановленого розміру. Розмір пікселя

Таблиця 2. Метадані про стереопару

Показники	Передній знімок	Задній знімок
Формат	GeoTIFF	GeoTIFF
Рівень геометричного оброблення	Basic Stereo	Basic Stereo
Глибина кольору	11 біт	11 біт
Дата знімання	11.06.2013 09:29:04	11.06.2013 09:30:03
Хмарність	0%	0%
Розмір у пікселях	10 000×10 000	10 000×10 000
Розмір пікселя на місцевості:		
панхроматичний канал	0,5 м	0,5 м
мультиспектральний канал	2 м	2 м
Азимут Сонця	164,1°	164,6°
Висота Сонця над горизонтом	66,2°	66,2°
Система координат	WGS-84	WGS-84

отриманої ЦММ – 0,5 м (мал. 2). У параметрах було встановлено середній рівень детальності й тип місцевості з перепадами висот. Опорні точки при створенні ЦММ не використовувались.



Мал. 2. Отримана зі стереопари ЦММ

Потім було здійснено процедуру підвищення чіткості мультиспектрального зображення за допомогою панхроматичного спектрального діапазону ("pansharpening"). У результаті отримано синтезоване зображення в натуральних кольорах з розміром пікселя на місцевості 0,5 м. Після цього було виконано ортотрансформування синтезованого зображення за допомогою поставлених RPC та отриманої ЦММ. При цьому опорні точки також не використовувались. Модель RPC описується такими формулами [4]:

$$l_N = \frac{P_1(\varphi_N, \lambda_N, H_N)}{P_2(\varphi_N, \lambda_N, H_N)}, \quad s_N = \frac{P_3(\varphi_N, \lambda_N, H_N)}{P_4(\varphi_N, \lambda_N, H_N)}$$

¹ Відповідно до чинного законодавства США, для комерційних продаж знімки поставляються після підвищення розміру пікселя до 0,5 м для панхроматичного каналу і до 2 м – для мультиспектрального.



де l_N, s_N – нормалізовані координати точки на знімку; P_1, P_2, P_3, P_4 – поліноми третього степеня; $\varphi_N, \lambda_N, H_N$ – геодезичні координати точки на поверхні еліпсоїда.

Оцінювання геометричної точності виконано за відхиленнями координат п'ятнадцяти вимірних на ортознімку контрольних точок, рівномірно розташованих на досліджуваній території (мал. 3).



Мал. 3. Набір контрольних точок

За контрольні точки було взято добре видимі на знімку чіткі контури місцевості, похибка дешифрування яких не перевищувала одного пікселя растру. Еталонні координати контрольних точок взято з векторного плану Одеси, який у плановому положенні відповідає вимогам точності для масштабу 1:1 000. СКП координат, знятих з цього плану, становила 40 см. Заявлена геометрична точність ортознімка (у межах СКП) дорівнювала 2,9 м [10]. Приймаючи до уваги той факт, що еталонні координати мають бути мінімум у три рази точнішими, ніж оцінювані, координати контрольних точок з векторного топографічного плану прийняли за еталонні.

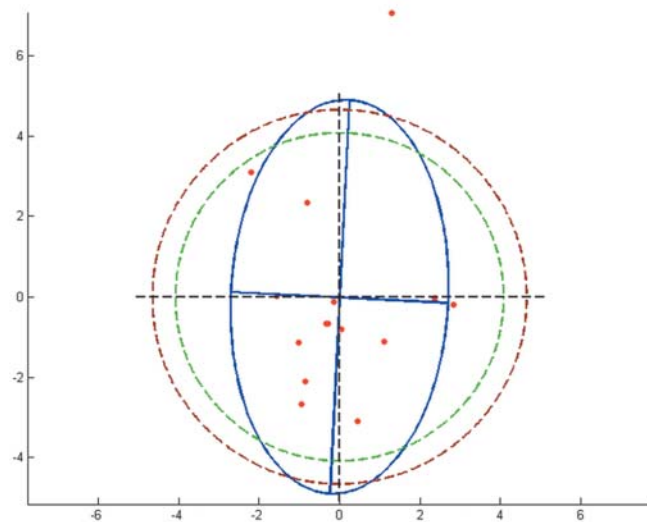
При обробленні результатів приймалося, що кожне вимірювання містить систематичну і випадкову похибки. Систематичну складову було виключено з результатів вимірювань. Результати оцінювання точності передає табл. 3. Еліпс похибок з осями $2\sigma_x$ та $2\sigma_y$ виглядає так, як на мал. 4.

На мал. 5 зображено вектори зміщень на контрольних точках відносно еталонних значень. Зміщення є випадковими, систематичних похибок не спостерігається.

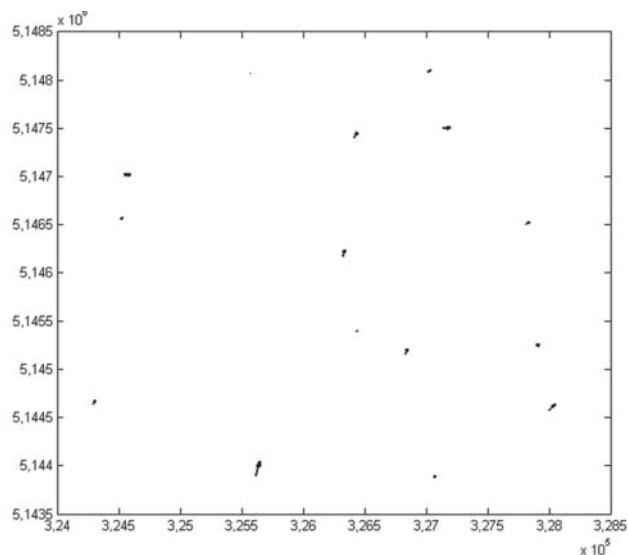
Табл. 3 засвідчує, що СКП чітких контурів на ортознімку, отриманому з використанням ЦММ зі стереопари без опорних точок, не перевищує 3 м (6 пікселів растру) або 0,3 мм у масштабі 1:10 000. Таким чином, створена ортофотокарта задовольняє рівень точності для карт масштабу 1:10 000 відповідно до вимог як вітчизняного нормативу

Таблиця 3. Результати оцінювання точності ортознімка, одержаного зі стереопари

Параметр	Значення, м
Систематична похибка s_x	-2,193
Систематична похибка s_y	-2,395
СКП по осі x (σ_x)	1,356
СКП по осі y (σ_y)	2,457
Загальна СКП	2,806
Кругова похибка CE_{90}	4,091
Кругова похибка CE_{95}	4,666
Середня радіальна похибка MRE	2,268
Середня похибка	2,756
Максимальне радіальне відхилення R_{max}	7,201



Мал. 4. Розсіювання похибок на контрольних точках. Синім кольором відображено еліпс похибок, зеленим – кругову похибку CE_{90} , коричневим – похибку CE_{95}



Мал. 5. Вектори похибок на контрольних точках

[3], так і американського стандарту [7]. Цей висновок є особливо важливим з економічної точки зору, оскільки йдеться про створення ортофотокарт масштабу 1:10 000 без наземної прив'язки космічних знімків.



Висновок та перспективи досліджень. У статті проаналізовано геометричну точність стереопари космічних знімків із супутника WorldView-2 у частині можливості їх використання для топографічних цілей. Експериментальні дослідження включали побудову цифрової моделі місцевості зі стереопари панхроматичних зображень, підвищення чіткості мультиспектрального зображення за допомогою панхроматичного спектрального діапазону та ортотрансформування лівого знімка стереопари за допомогою отриманої ЦММ. У результаті було одержано кольоровий ортофотознімок. Оцінювання його точності виконано за відхиленнями координат п'ятнадцяти виміряних на ортознімку контрольних точок. Еталонні координати взято з векторного плану масштабу 1:1000 на територію м. Одеси. Ортознімок було отримано за моделлю RPC з використанням одержаної зі стереопари ЦММ та без будь-яких опорних точок. Встановлено, що СКП твердих контурів на отриманому ортознімку не перевищує 3 м (6 пікселів растру) і задовольняє вимоги точності для карт масштабу 1:10 000. Це важливо економічно, адже дозволяє створювати ортофотокarti масштабу 1:10 000 за допомогою космічних знімків без їх наземної прив'язки. Використання інших моделей сенсора та опорних точок для досягнення вищої геометричної точності кінцевих ортознімків може бути предметом подальших досліджень.

Подяка. Автор висловлює вдячність українській компанії TVIS (<http://www.tvvis.com.ua/>) за надання стереопари WorldView-2.

Література

1. *Онъков, И.В.* Исследование геометрической точности ортоснимков WorldView-2, созданных с использованием цифровой модели рельефа Земли SRTM / И.В. Онъков // Геоматика. – 2011. – № 4. – С. 56-63.

2. *Онъков, И.В.* Сравнительная оценка геометрической точности ортоснимков WorldView-2 / И.В. Онъков // Геопрфи. – 2013. – № 1. – С. 19-22.

3. *Основні положення створення та оновлення топографічних карт масштабів 1:10 000, 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000, 1:200 000, 1:500 000, 1:1 000 000.* – К.: Укргеодезкартографія, 1999. – 18 с.

4. *Grodecki, J.* Block Adjustment of High-Resolution Satellite Images Described by Rational Polynomials / J. Grodecki, G. Dial // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. – 2003. – Vol. 69. – P. 59-68.

5. *Li, R.* Integration of Ikonos and QuickBird Imagery for Geopositioning Accuracy Analysis / Rongxing Li, Feng Zhou, Xutong Niu, Kaichang Di // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. – 2007. – Vol. 73. – P. 1067-1074.

6. *Maglione, P.* Using WorldView-2 satellite imagery to support geoscience studies on Phlegraean area / P. Maglione, C. Parente, A. Vallario // American Journal of Geosciences. – 2013. – Vol. 3. – P. 1-12.

Інтернет-джерела

7. *National spatial data infrastructure. Geospatial Positioning Accuracy Standards. Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy / Subcommittee for Base Cartographic Data Federal Geographic Data Committee.* – Реж. доступу: <http://www.fgdc.gov/standards/projects/FGDC-standards-projects/accuracy/part3/chapter3>

8. *Poli, D.* Radiometric and geometric analysis of WorldView-2 stereo scenes / D. Poli, E. Angiuli, F. Remondino. – Реж. доступу: http://www.isprs.org/proceedings/xxxviii/part1/03/03_04_Paper_188.pdf

9. *Whitepaper.* The benefits of the 8 Spectral Bands of WorldView-2 / DigitalGlobe Inc. – Реж. доступу: http://www.digitalglobe.com/sites/default/files/DG-8SPECTRAL-WP_0.pdf

10. *WorldView-2.* Geolocation accuracy / DigitalGlobe Inc. – Реж. доступу: http://www.digitalglobe.com/sites/default/files/WorldView_Geolocation_Accuracy.pdf

Надійшла 26.05. 14

* * *

УДК 528.854.4:528.88

І. Д. Семко

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИДІЛЕННЯ ОКРЕМИХ ДЕРЕВ У ЛІСОВОМУ МАСИВІ ЗА ДАНИМИ ЛІДАРНОГО ЗНІМАННЯ

Рассматривается актуальная проблема автоматизированного выделения деревьев в лесном массиве по данным дистанционного зондирования. Обосновываются методы и алгоритмы автоматизированного выделения отдельного дерева в лесном массиве по данным лидарной съемки. Приведены результаты расчетов морфоструктурных параметров древостоя, а именно количества деревьев на единицу площади, средних значений высоты деревьев, площадей проективного покрытия с помощью известных автоматических методов. Произведена оценка точности этих методов.

A topical problem of automated detection of single tree within forestry using remote sensing data is considered. The brief review of methods for detection of single tree using airborne LiDAR data is represented. Results of calculations of morphologic parameters with help of some automated methods namely the number of trees per unit area, the mean values of tree height, the projective cover are described. The accuracy of these methods has been validated.

Вступ. Для отримання точної та оперативної інформації про ліси фахівці з лісового господарства все

частіше звертаються до методів і технологій дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) [1-5 та ін.]. Спостереження за лісовими масивами на основі матеріалів ДЗЗ дозволяє створювати різноманітні тематичні

© І. Д. Семко, 2014