

УДК 332.3:528.4:528.9

ДОСЛІДЖЕННЯ ЦИФРОВОГО АЕРОЗНІМАННЯ ТА ФОТОТРИАНГУЛЯЦІЇ ДЛЯ КАРТОГРАФУВАННЯ ЗАЛІЗНИЦІ

Л. Дичко

Національний університет "Львівська політехніка"

Ключові слова: цифрове аерознімання, фототриангуляція, піксел, GSD, роздільна здатність, опорна точка, залізничний транспорт, ЦМР, ЦМПТ.

Постановка проблеми

Реформування залізничної галузі в Україні надалі залишається однією зі стратегічних проблем загальнодержавного значення. Очевидним є той факт, що складова частина цього напрямку – реконструкція інфраструктури загалом та інженерних споруд зокрема – передбачає створення актуальних картографічних матеріалів. Зважаючи на величезні обсяги залізничного господарства України, раціональним є шлях використання матеріалів дистанційного зондування, зокрема матеріалів цифрового аерознімання. Тому актуальним питанням є обґрунтований вибір параметрів таких робіт, які забезпечують водночас точність створених картографічних матеріалів і економічність застосованих методик.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, які стосуються вирішення цієї проблеми

Досвід багатьох країн Європи та Азії вказує на те, що найживанішим картографічним матеріалом, придатним для реалізації реформаторських дій, є план у масштабі 1:500. Про це свідчать публікації [1–3] та інші. Такі матеріали повинні відповідати вимогам до державного земельного кадастру [4–7]. Технології створення великомасштабних планів базуються на використанні цифрових аерознімків та повітряного лазерного сканування [8, 9]. При цьому широко вживаними характеристиками для вхідного матеріалу є роздільна здатність знімальної системи [10]. Тобто цифрове аерознімання може стати основним методом для картографування земель та об'єктів залізничного транспорту.

Постановка завдання проблеми

Мета цього дослідження – створити математичну модель розрахунку основного параметра аерознімання – його масштабу, керуючись вимогами до точності відображення об'єктів залізничного транспорту на планах у масштабі 1:500, а також перевірити в реальних умовах точність створення опорної фототриангуляційної мережі.

Виклад основного матеріалу проблеми

Міжнародний досвід із картографування земель та об'єктів залізничного транспорту вказує на те, що технологічна реалізація матеріалів аерознімання супроводжується вивченням та використанням архівних, описових та графічних даних, до яких належать:

– топографічна карта, з актуальним відображенням ситуації, рідше рельєфу;

- дані з результатами оновлення карти;
- перелік і дані натурних вимірювань;
- дані про доповнення і зміни, що стосувались геодезичної основи на об'єкті картографування;
- проектна документація реконструкції залізниці (за наявності);
- карта у векторній (цифровій) формі (за наявності);
- кадастрова карта (план) у цифровій формі з межами, будинками тощо;
- опис геодезичної мережі;
- інші документи.

Всі ці матеріали використовують для отримання та інформаційного уточнення таких основних нових продуктів фотограмметричного опрацювання:

- цифрова модель об'єкта та її складові;
- цифрова модель рельєфу (ЦМР),
- цифрова модель покриття території (ЦМПТ);
- ортофотокарта в цифровій формі;
- карта (план) з відображеними ситуацією та рельєфом;
- профілі поздовжні по осі залізниці;
- профілі поперечні у вибраних місцях (для проектних робіт).

Оскільки вхідним матеріалом для всіх зазначених видів продукції є цифровий аерознімок, то важливим питанням є обґрунтування вибору масштабу такого знімання.

На підставі дослідних робіт встановлено [11], що точність відтворення положення контуру (точки) на землі залежить від багатьох факторів, і пов'язана з просторовим розміром піксела P так:

$$m_{x,y} = k \cdot P, \quad (1)$$

де k – деякий коефіцієнт, що змінюється у межах $0,5 \div 0,9$.

Своєю чергою, розмір просторового піксела P пов'язаний з просторовою роздільною здатністю знімальної системи R з урахуванням коефіцієнта Келл'а [9]:

$$2P \leq R \leq 2\sqrt{2}P. \quad (2)$$

Величина R , якщо смуга пропускання частот обмежена лише частотою Найквіста, визначається так [10]:

$$R = 2 \cdot \Delta \cdot m, \quad (3)$$

де Δ – лінійний розмір піксела сенсора знімальної системи; m – знаменник масштабу знімання.

Прийmemo, що точність відображення об'єктів на кадастровому плані (масштаб 1:М) становить 0,2 мм, що в натуральному вигляді матиме розмір:

$$\delta = 0,2 \text{ мм} \cdot M. \quad (4)$$

Тоді коефіцієнт C , що описує співвідношення масштаб аерознімання/масштаб плану, є таким:

$$C = \frac{\delta}{m_{x,y}} = \frac{0,2 \text{ мм} \cdot M}{k \cdot P}. \quad (5)$$

Оскільки з (2) отримаємо два граничні значення просторового піксела:

$$P_1 = \frac{1}{2} R, \quad (6)$$

або

$$P_1 = \frac{1}{2\sqrt{2}} R, \quad (7)$$

то необхідно обчислити два граничних значення коефіцієнта C :

$$C_1 = \frac{0,2 \text{ мм} \cdot M}{k \cdot \frac{1}{2} R} = \frac{0,2 \text{ мм} \cdot M}{k \cdot \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot \Delta \cdot m} = \frac{0,2 \text{ мм}}{k \cdot \Delta \cdot C_1}, \quad (8)$$

$$C_1 = \left(\frac{0,2 \text{ мм}}{k \cdot \Delta} \right)^{1/2}. \quad (9)$$

Аналогічно друге граничне значення є таким:

$$C_2 = \left(\frac{0,28 \text{ мм}}{k \cdot \Delta} \right)^{1/2}. \quad (10)$$

Отже, за рівняннями (9) і (10) можна обчислити граничні значення співвідношення знаменників масштабів знімок/план при загальних параметрах: граничній точності 0,2 мм, емпіричного коефіцієнта k та розміру піксела в ПЗЗ – Δ .

У табл. 1 наведено розраховані величини цих співвідношень для реальних ситуацій.

Таблиця 1

Граничні співвідношення масштабів знімок/план для різних варіантів цифрового аерознімка

| Співвідношення C | Розмір піксела, мм | Емпіричний коефіцієнт якості | | | | |
|--------------------|--------------------|------------------------------|-----|-----|-----|-----|
| | | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 |
| C_1 | 0,007 | 7,5 | 6,9 | 6,4 | 6,0 | 5,6 |
| C_2 | | 8,9 | 8,2 | 7,5 | 7,1 | 6,6 |
| C_1 | 0,010 | 6,3 | 5,8 | 5,3 | 5,0 | 4,7 |
| C_2 | | 7,5 | 6,8 | 6,3 | 5,9 | 5,6 |
| C_1 | 0,015 | 5,2 | 4,7 | 4,4 | 4,1 | 3,8 |
| C_2 | | 6,1 | 5,6 | 5,2 | 4,8 | 4,5 |
| C_1 | 0,020 | 4,5 | 4,1 | 3,8 | 3,5 | 3,3 |
| C_2 | | 5,3 | 4,8 | 4,5 | 4,2 | 3,9 |

Деякі теоретичні та практичні роботи показують, що реальний розмір піксела може бути іншим, аніж вказано в (2). Тоді за такої розмір приймають віддалі між сусідніми пікселами, який в літературі (наприклад, [9]) позначають як GSD (Ground Sampling Distance). Якщо частота прийому сигналів (променів) лінійного ПЗЗ є такою, що перекриває розмір піксела, то піксел накладається на сусідній, і тому просторова роздільна здатність збільшується. Можлива й інша ситуація – розрив між пікселами – і тоді роздільна здатність зменшується. Практика показала, що здебільшого GSD є в 2 рази кращою від величини P . Тому

$$C_1 = \left(\frac{2 \cdot 0,2 \text{ мм}}{k \cdot \Delta} \right)^{1/2}, \quad (11)$$

$$C_2 = \left(\frac{2 \cdot 0,28 \text{ мм}}{k \cdot \Delta} \right)^{1/2} \quad (12)$$

З урахуванням викладеного підраховано співвідношення знаменників масштабів знімок/план і наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Граничні співвідношення масштабів знімок/план з урахуванням GSD

| Співвідношення C | Розмір піксела, мм | Емпіричний коефіцієнт якості | | | | |
|--------------------|--------------------|------------------------------|------|------|------|-----|
| | | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 |
| C_1 | 0,007 | 10,8 | 9,9 | 9,2 | 8,6 | 8,1 |
| C_2 | | 12,8 | 11,8 | 10,8 | 10,2 | 9,5 |
| C_1 | 0,010 | 9,1 | 8,3 | 7,6 | 7,2 | 6,8 |
| C_2 | | 10,8 | 9,8 | 9,1 | 8,5 | 8,1 |
| C_1 | 0,015 | 7,5 | 6,8 | 6,3 | 5,9 | 5,5 |
| C_2 | | 8,8 | 8,1 | 7,5 | 6,9 | 6,5 |
| C_1 | 0,020 | 6,5 | 5,9 | 5,5 | 5,0 | 4,7 |
| C_2 | | 7,6 | 6,9 | 6,5 | 6,0 | 5,6 |

Аналіз практичних робіт з великомасштабного картографування територій показує, що для уникнення ризиків, пов'язаних з впливом непередбачуваних умов знімання, коефіцієнт C вибирають у межах 6÷7.

Тому за масштабу плану 1:500 аерознімання проводиться в масштабі 1:3000÷1:3500. Розмір просторового піксела становитиме (якщо величина $\Delta = 0,015$ мм) від 4,5 до 5,2 см. Це повністю задовольняє вимоги до картографування об'єктів залізничного транспорту. Як приклад на рис. 1 показано аерознімок території (масштаб 1:3000) залізничної колії, на якій виконано серію експериментальних робіт зі створення цифрового ортофотоплану.

Певним технологічним фактором, який ставить суттєві вимоги до одномаршрутного аерознімання, є ширина смуги картографування. В межах цієї смуги необхідно створити ЦМР, яку можна використати для аналізу впливу модернізації залізниці на довкілля, аналізу поширення шумових ефектів, забруднення з приводу експлуатації залізниці тощо.



Рис. 1. Фрагмент цифрового аерозображення у масштабі 1:3000

У деяких проектах достатньою шириною смуги є 500 м. Використовуючи формулу [12]:

$$dy = m \cdot f \cdot \operatorname{tg} \beta, \quad (13)$$

де m – знаменник масштабу знімання; f – фокусна відстань камери; β – кут поля зору, можна визначити величину m :

$$m = \frac{dy}{f \cdot \operatorname{tg} \beta}. \quad (14)$$

Для цифрової камери ADS40 ($\alpha = 62,5^\circ$; $\beta = 64^\circ$), $dy = 500$ м отримаємо $m = 5300$. Тоді просторовий піксель матиме розмір $\Delta = 0,007$ мм $\cdot m = 3,7$ см.

Доречно порівняти можливість використання аерофотокамери, наприклад RC-30 (розміри кадра 230×230 мм, $f = 150$ мм). Беручи до уваги, що краї знімка мають гіршу якість, зменшимо величину 230 мм (край знімка) до 200 мм. Тоді отримаємо:

$$m = \frac{dy}{200 \text{ мм}}. \quad (15)$$

При $dy = 500$ м маємо $m = 2500$.

Скануючи аерофільм з розміром пікселя 0,015 мм, отримаємо значення просторового пікселя $\Delta = 0,015$ мм $\cdot m = 3,75$ см.

У такий спосіб можна забезпечити проектні вимоги до створення плану в масштабі 1:500.

Відомо, що процес фотограмметричного опрацювання передбачає згущення опорної мережі (фототріангуляцію) [8]. При одномаршрутному аерозніманні залізничної колії можливі два варіанти: суцільна прив'язка знімків або розріджена. В другому варіанті у разі прив'язки маршруту чотирма опорними точками (класична схема) очікувану точність згущення підраховують за формулами [8]:

$$m_x = 0,3 \cdot m \cdot m_q \sqrt{n^3}, \quad m_y = 0,15 \cdot m \cdot m_q \sqrt{n^3},$$

$$m_z = 0,2 \cdot \frac{f}{b} \cdot m \cdot m_q \sqrt{n^3}. \quad (16)$$

У випадку застосування аерокамери RC-30 при $m_q = 0,015$ мм, $m = 2500$, $f = 150$ мм, $b = 92$ мм, $n = 3$ отримаємо $m_x = 34$ мм, $m_y = 17$ мм, $m_z = 36$ мм.

Оскільки базис в натурі при 60 % поздовжньому перекритті дорівнює 230 м, то прив'язку слід проводити через 700 м.

Для експериментальних робіт з апробації загальної технологічної схеми використано матеріали цифрового аерознімання камерою UltraCam залізничної колії та дані

польової прив'язки (опорні та контрольні точки). Ми виконали опрацювання цифрових знімків на цифровій фотограмметричній станції та побудували мережу фототріангуляції, що покриває залізничну колію завдовжки 21 км. Схему траси показано на рис. 2.

Оцінку точності проведено з використанням 26 контрольних точок, координати яких визначено з польових робіт з точністю до 2 см із застосуванням примусового (жорсткого) центрування геодезичних приладів. Під час фотограмметричних вимірювань на кожну опорну точку проведено кількаразове візування (щонайменше 3 рази), а за кінцеві значення координат взято середнє арифметичне.

Обчислені значення різниць фотограмметричних та геодезичних координат подано в табл. 3.

Таблиця 3

Дані з оцінки точності фототріангуляційних побудов для залізничної колії

| № секції | № точки | Абсолютні значення похибок на контрольних точках, см | | |
|----------|---------|--|------------|------------|
| | | δ_x | δ_y | δ_z |
| 1 | 1 | 5,0 | 6,0 | 2,0 |
| | 2 | 4,0 | 5,0 | 4,0 |
| | 3 | 5,0 | 5,0 | 6,0 |
| | 4 | 3,0 | 6,0 | 6,0 |
| | 5 | 4,0 | 1,0 | 4,0 |
| | 6 | 5,0 | 2,0 | 5,0 |
| 2 | 7 | 6,0 | 4,0 | 5,0 |
| | 8 | 4,0 | 4,0 | 4,0 |
| | 9 | 1,0 | 5,0 | 6,0 |
| | 10 | 5,0 | 5,0 | 2,0 |
| | 11 | 5,0 | 6,0 | 6,0 |
| | 12 | 4,0 | 1,0 | 6,0 |
| 3 | 13 | 3,0 | 4,0 | 6,0 |
| | 14 | 6,0 | 3,0 | 4,0 |
| | 15 | 2,0 | 4,0 | 5,0 |
| | 16 | 5,0 | 3,0 | 5,0 |
| | 17 | 5,0 | 5,0 | 3,0 |
| | 18 | 4,0 | 6,0 | 5,0 |
| 4 | 19 | 6,0 | 4,0 | 4,0 |
| | 20 | 6,0 | 5,0 | 6,0 |
| | 21 | 1,0 | 5,0 | 6,0 |
| | 22 | 4,0 | 4,0 | 3,0 |
| | 23 | 3,0 | 4,0 | 6,0 |
| | 24 | 5,0 | 6,0 | 5,0 |
| | 25 | 5,0 | 2,0 | 4,0 |
| | 26 | 4,0 | 4,0 | 6,0 |

$$m_x = 4,4 \text{ см}, \quad m_y = 4,4 \text{ см}, \quad m_z = 5,0 \text{ см}$$

$$\delta_x = 0,9 \text{ см}, \quad \delta_y = 0,9 \text{ см}, \quad \delta_z = 1,0 \text{ см}$$

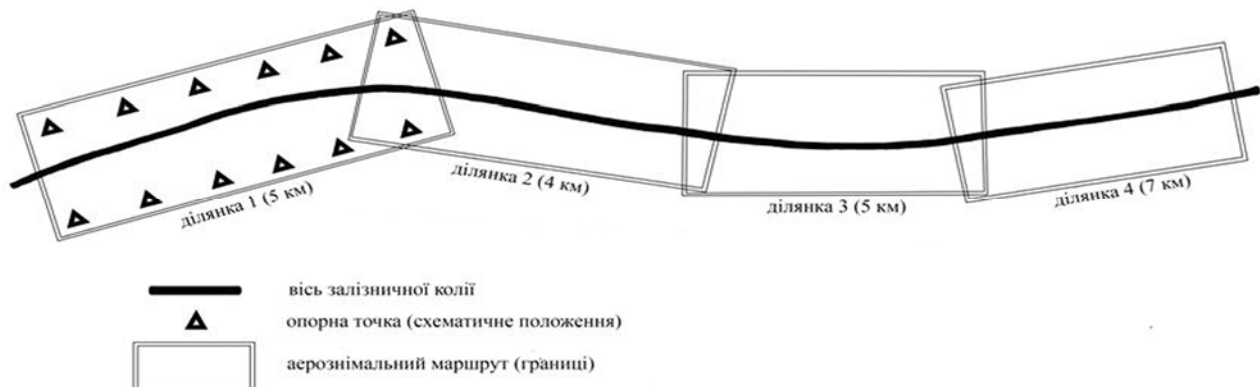


Рис. 2. Схема залізничної траси

Отримано середні квадратичні похибки m_x , m_y , m_z просторових координат та обчислено довірчі величини δ_x , δ_y , δ_z . Це дає підставу стверджувати про правильність технологічних рішень з використання фотограмметричної методики створення картматеріалу для залізниці.

Висновки

Запропоновано та обґрунтовано формули для проектування аерознімальних робіт при картографуванні об'єктів залізничного транспорту вказують на шляхи ефективного використання високотехнологічного обладнання, яким є сучасна цифрова аерознімальна апаратура. Співвідношення масштабів знімок/план може досягати навіть 12 разів. Проте практика вказує на зменшення цієї величини до 6 разів (для уникнення ризиків). Навіть за такого підходу реалізується технологія створення плану в масштабі 1:500 з просторовим пікселем 4,5 см. Проведені роботи зі згущення опорної мережі підтвердили високу точність фотограмметричного згущення мережі (з точністю 4–5 см). Надалі такі матеріали дали змогу створити ортофотоплани та інші кінцеві продукти для проектування і планування реконструкції залізниці.

Література

1. Stefan Balcer / Geodezyjne zagadnienia terenow zamiejskich. PKP. www.geodezja-szczecin.org.pl.
2. GIS Pro (www.gispro.pl).
3. Барладін О. Картографічне забезпечення ГС кадастру для управління земельно-майновим комплексом залізничного транспорту України / О. Барладін, Л. Миколенко, О. Сclar // Сучасні досягнення геодезичної науки і виробництва. – 2012. – Вип. I (23). – С. 177–183.
4. Барладін О.В. Використання АФЗ в інформаційних системах земельного кадастру / О.В. Барладін, С.М. Городецький, Л.І. Миколенко // Картографія та вища школа: збірник наукових праць. – К.: Інститут передових технологій, 2008. – Вип. 13.
5. Топографо-геодезична та картографічна діяльність: законодавчі та нормативні акти. – Укргеодезкартографія, 2000.
6. Матвеев С.И. Геоинформационные системы и технологии в железнодорожном транспорте: учебн. пособие для вузов ж.-д. транспорта / С.И. Матвеев, В.А. Коугия, В.Я. Цветков / под ред. С.И. Матвеева. – М.: У УМК МПС России, 2000. – 288 с.
7. Дичко Л. Комплексний підхід до інвентаризації земель та об'єктів залізничного транспорту дистанційним методом / Л. Дичко // Сучасні досягнення геодезичної науки і виробництва. – Вип. I (23), 2012. – С. 276–279.
8. Дорожинський О.Л. Фотограмметрія / О.Л. Дорожинський, Р. Тукай. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, 2008. – 332 с.
9. Kurczynski Z. Lotnicze i satelitarne obrazowanie Ziemi. Warszawa. – Oficyna Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej. 2. Warszawa. – 2006. – S. 321–582.
10. Бурштинська Х.В. Аерокосмічні знімальні системи: навч. посіб. // Х.В. Бурштинська, С.А. Станкевич. – Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2010. – 288 с.
11. Дорожинський О. Критерії оцінки аерокосмічних зображень для кадастрових робіт / О. Дорожинський, С. Почкін // Український міжвідомчий науково-технічний збірник. – Львів, 2007. – Вип. 68. – С. 172–176.
12. Дичко Л. Обґрунтування параметрів цифрового аерознімання для інвентаризації земель та модернізації об'єктів залізничного транспорту / Л. Дичко // Сучасні досягнення геодезичної науки і виробництва. – 2012. – Вип. II (24). – С. 159–162.

Дослідження цифрового аерознімання та фототріангуляції для картографування залізниці Л. Дичко

На підставі дослідних робіт доведено, що граничні співвідношення масштабів цифровий знімок /план лежать у межах 3–9. З урахуванням параметра GSD (Ground Sampling Distance) просторова роздільна здатність на практиці збільшується в 2 рази, а згадане вище співвідношення становить 4–10. Проведено серію експериментальних робіт з побудови опорної мережі методом фототріангуляції для залізничної колії з використанням знімків у масштабі 1:3000. Досягнута точність координування на контрольних точках 4–5 см дає змогу рекомендувати використання таких матеріалів для великомасштабного картографування об'єктів залізничного транспорту.

Исследование цифровой аэросъемки и фототриангуляции для картографирования железной дороги Л. Дычко

На основании опытных работ установлено, что граничные соотношения масштабов цифровой аэроснимок/план лежат в границах 3–9. С учетом параметра GSD (Ground Sampling Distance) пространственное разрешение увеличивается в 2 раза, а упомянутое соотношение составляет от 4 до 10. Проведена серия экспериментальных работ по построению сети фототриангуляции с использованием цифровых аэроснимков масштаба 1:3000. Полученная точность координирования на контрольных точках 4–5 см подтверждает возможность использования таких материалов для крупномасштабного картографирования объектов железнодорожного транспорта.

The research of digital aerophotography and phototriangulation for railway cartography L. Dychko

According to the researches, it was proved that limiting ratios of digital image/ plan scales lie in between 3–9. Taking into account the GSD (Ground Sampling Distance) parameter, in practice the spatial resolution is increased by two times, and the ratio, that was mentioned above changes to 4–10. The series of experimental work on building reference network with the help of phototriangulation method for railway with using images in the scale to be 1:3000 has been carried through. The achieved accuracy of coordination on checkpoints 4-5 cm enables to recommend the usage of such materials for large-scale cartography of railway objects.