

Визначення точності виміру висот об'єктів при автоматичній обробці стереознімків

Дубина О. Ф.¹, Андреев О. В.², Нікітчук Т. М.², Свінцицька О. М.²

Державний університет “Житомирська політехніка”

E-mail: Fedorovich_daf@ukr.net

На даний час інформація про просторовий опис об'єктів застосовується у багатьох сферах діяльності людства. Одним із таких видів інформації є координати об'єктів. Такі дані використовуються у картографії, при побудові цифрових карт та 3D моделей, для роботи навігаційних засобів і т.д. При автоматизованому створенні цифрових моделей рельєфу земної поверхні одним із основних якісних показників є точність визначення висоти об'єктів. Основний вплив на цей показник здійснює помилка виміру паралакса при обробці стереознімків. Для отримання формули розрахунку точності виміру висоти об'єктів використовувалося розкладання функції в ряд Тейлора. Використовуючи формулу Крамера-Рао для потенційної точності виміру координат зображення об'єкта на знімку, перетворення Фур'є і рівність Парсеваля, отримано формулу потенційної точності суміщення стереознімків (виміру паралакса). Проведений аналіз отриманих формул показує, що точність суміщення зображень погіршується зі збільшенням спектральної щільності потужності шумів на першому і другому знімках та зменшенням схожості одного зображення з другим, а також зі зменшенням величини ефективної ширини взаємного просторового спектру стереозображень. Зі збільшенням значення базису стереознімання помилка виміру висот об'єктів спочатку покращується, а потім – погіршується. Це погіршення викликано тим, що знімки стереопари отримуються із різних просторових точок і при цьому на зображеннях виникають перспективні викривлення та викривлення за рельєф. Відповідно, при збільшенні базису знімання ці викривлення будуть збільшуватися. Даний підхід можливо застосовувати при плануванні режиму проведення стереозйомки та апаратури знімання земної поверхні для картографування, отримання 3D моделей і т.д.

Ключові слова: фотограметрія; висота об'єктів; точність отримання координат об'єктів; стереознімки; паралакс; кореляційно-екстремальний метод

DOI: [10.20535/RADAP.2020.82.67-73](https://doi.org/10.20535/RADAP.2020.82.67-73)

Вступ

На теперішній час координатна інформація про об'єкти, що розташовані на земній поверхні, необхідна для побудови цифрових моделей місцевості (ЦММ) і рельєфу (ЦМР), реалізації геоінформаційних проектів, а також при геореференцюванні даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Одним із основних джерел такої інформації є стереознімки, отримані з різних літальних апаратів (космічних апаратів (КА), літаків, гелікоптерів, безпілотних літальних апаратів (БПЛА)) [1].

Одним із основних показників, що впливають на якість отриманих ЦМР є точність отримання координат об'єктів.

Існує багато програмних продуктів для побудови та аналізу ЦМР. Це такі ГІС-пакети і модулі, як Spatial Analyst, 3D Analyst, пакети ArcGIS, програми MapInfo (MapInfo Corp.), Autodesk Map 3D системи AutoCAD (Autodesk Inc.) та інші. Спільним для них є автоматизація побудови ЦМР, у тому чи-

слі суміщення знімків стереопари, що необхідно для виміру висот об'єктів [2, 3].

При створенні ЦМР земної поверхні одним із основних якісних показників є точність визначення висоти об'єктів [4]. Саме цей показник впливає на якість цифрової карти і, як наслідок, на ймовірність вирішення завдань за допомогою ЦМР.

Джерелами інформації для побудови ЦМР і ЦММ служать топографічні карти, стереопари аеро- і космічних знімків, дані радіолокаційної зйомки і т. п.

При автоматичному [5] вилученні координатної інформації про місцевість і розташовані на ній об'єкти зі стереознімків необхідно мати методики, які б надавали змогу оцінити точність визначення координат об'єктів. Ці методики повинні враховувати усі фактори, що впливають на точність визначення координат. Особливу увагу необхідно придати точності визначення висоти об'єктів, оскільки вона завжди гірша за точність визначення інших координат унаслідок застосування не одного, а двох

знімків. При цьому значний вплив на помилку виміру висоти об'єктів при автоматичному суміщенні стереознімків є точність визначення паралакса [4].

1 Отримання аналітичного виразу для точності визначення висоти об'єкту

Основна трудність при отриманні аналітичного виразу для точності визначення висоти є помилка виміру паралакса, тобто, різниці координат однойменної точки на першому і другому знімках стереопари. Так як суміщення стереознімків проводиться автоматично за допомогою відповідних програмних продуктів [6], про які говорилося вище, при оцінці точності виміру паралакса необхідно враховувати коефіцієнт кореляції зображень на першому і другому знімках. Для цього у дослідженнях використовується формула Крамера-Рао для потенційної точності виміру координат на знімку, а також пряме та зворотне перетворення Фур'є.

Формула розрахунку висоти об'єктів по стереознімках, у загальному вигляді, має вигляд [4]:

$$h = \frac{H^2}{Bf} p, \quad (1)$$

де H , B , f , p – висота польоту літального апарата, базис стереознімання, фокусна відстань та паралакс відповідно.

Прийmemo у першому наближенні адитивну модель впливу помилок визначення змінних, що входять до цієї формули. Після розкладення цієї функції у ряд Тейлора по відповідним змінним отримаємо дисперсію помилки визначення висоти:

$$\sigma_h^2 = \left(\frac{dh}{d\delta_p} \right)^2 \sigma_p^2 + \left(\frac{dh}{d\delta_B} \right)^2 \sigma_B^2 + \left(\frac{dh}{d\delta_H} \right)^2 \sigma_H^2 + \left(\frac{dh}{d\delta_f} \right)^2 \sigma_f^2, \quad (2)$$

де σ_p , σ_H , σ_B , σ_f – середньоквадратичні відхилення (СКВ) помилок виміру паралакса, висоти польоту літального апарата, базису стереознімання та фокусної відстані відповідно. На теперішній час СКВ помилок виміру висоти польоту літального апарата, базису стереознімання та фокусної відстані, як правило, відомі з досить високою точністю.

Основний вплив на точність визначення висоти об'єктів при автоматичній обробці знімків є точність визначення паралакса. При вимірі паралакса задача зводиться до пошуку і виявлення зображення об'єкта на другому знімку по зображенню цього об'єкта на першому знімку і виміру його положення на фоні зображень інших об'єктів та шумів [3].

Слід враховувати, що при отриманні знімків на останніх виникають перспективні викривлення [4].

Після усунення цього роду викривлень на зображеннях будуть залишатися викривлення за рахунок рельєфу, усунення яких можливо тільки в тому випадку, коли вже відома ЦМР. Таким чином, при обробці слід враховувати в зображеннях на двох суміжних знімках взаємні викривлення, що виникають за рахунок дії шумів та викривлень за рельєф.

Точність визначення паралакса при автоматичній обробці стереознімків буде визначатися точністю суміщення зображень оточення точки на першому та другому знімках. Ця обробка проводиться на фоні шумів, які вносяться оптичним приймачем, процесом дискретизації і т. д. [7]. Задача ускладнюється тим, що шуми присутні як на першому, так і на другому знімку [8]. Еталонне зображення (оточення обраної точки), яке шукається на другому знімку, викривлено шумами.

Суміщення знімків стереопари можливо здійснювати декількома методами. Знімки відносяться до одних із найскладніших сигналів. Найбільш загальним методом, що може застосовуватися практично для будь-яких сигналів, це екстремально-кореляційний [9]. При цьому методі рішення приймається по абсолютному максимуму взаємокореляційної функції на виході вирішуючого пристрою. Разом з цим, велике значення має відношення сигнал-шум на зображеннях.

На вхід корелятора при наявності зображень об'єкта поступають сигнали

$$K_1(x, y) = C_1(x, y) + n_1(x, y),$$

$$K_2(x, y) = C_2(x, y) + n_2(x, y),$$

де $C_1(x, y)$, $C_2(x, y)$ – зворотні перетворення Фур'є від розділених опорного та шуканого об'єктів відповідно.

При відсутності зображень об'єкту на входах корелятора буде присутній тільки шум. Кореляційний інтеграл в одновірному випадку буде мати вигляд:

$$z(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} K_1(x) K_2(x - \xi) dx.$$

Щоб записати відповідні умовні щільності ймовірності $p_n(z)$ і $p_{cn}(z)$ достатньо у випадках присутності та відсутності сигналів розрахувати перший та другий моменти величини z , тобто два математичні очікування:

$$M\{z(\xi)\} = \int_{-\infty}^{\infty} M\{K_1(x) K_2(x - \xi)\} dx,$$

$$M\{z(\xi)^2\} = M\left\{\left(\int_{-\infty}^{\infty} K_1(x) K_2(x - \xi) dx\right)^2\right\}.$$

Маємо:

$$M\{z(\xi)\} = M \left\{ \left(\int_{-\infty}^{\infty} C_1(x) C_2(x-\xi) dx + \int_{-\infty}^{\infty} C_1(x) n_2(x) dx + \int_{-\infty}^{\infty} C_2(x-\xi) n_1(x) dx + \int_{-\infty}^{\infty} n_1(x, y) n_1(x) dx \right) \right\} =$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} C_1(x) C_2(x-\xi) dx.$$

$$M\{z(\xi)^2\} = \left(\int_{-\infty}^{\infty} C_1(x) C_2(x-\xi) dx \right)^2 + \left(\int_{-\infty}^{\infty} C_1(x) n_2(x) dx \right)^2 + \left(\int_{-\infty}^{\infty} C_2(x-\xi) n_1(x) dx \right)^2 + \left(\int_{-\infty}^{\infty} n_1(x, y) n_1(x) dx \right)^2 =$$

$$= \left(\int_{-\infty}^{\infty} C_1(x) C_2(x-\xi) dx \right)^2 + \frac{E_1 N_2}{2} + \frac{E_2 N_1}{2} + \frac{N_1 N_2}{4},$$

де E_1, E_2, N_1, N_2 – відповідно енергії зображень об'єкту на першому і другому знімку та спектральні щільності потужності шумів на них. Тоді

$$v^2 = \frac{E_1 N_2}{2} + \frac{E_2 N_1}{2} + \frac{N_1 N_2}{4}.$$

Відповідні умовні щільності ймовірності будуть мати вигляд:

$$p_n(z(\xi)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi v}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{z(\xi)}{v}\right)^2\right),$$

$$p_{cn}(z(\xi)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi v}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{z(\xi)}{v} - q\right)^2\right),$$

де $q = \frac{M\{z(\xi)\}}{v}$ – відношення сигнал-шум.

Тоді

По величині цих моментів в кожному випадку можна знайти дисперсію v^2 величини інтегралу z

$$v^2 = M\{z(\xi)^2\} - (M\{z(\xi)\})^2.$$

У зв'язку з тим, що кореляційна функція білого шуму визначається як

$$M\{n_1(x') n_1(x'')\} = \frac{N_1}{2} \delta(x' - x''),$$

то, використовуючи інтегральне представлення, отримаємо

$$M\{z(\xi)\} = M \left\{ \left(\int_{-\infty}^{\infty} C_1(x) C_2(x-\xi) dx + \int_{-\infty}^{\infty} C_1(x) n_2(x) dx + \int_{-\infty}^{\infty} C_2(x-\xi) n_1(x) dx + \int_{-\infty}^{\infty} n_1(x, y) n_1(x) dx \right) \right\} =$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} C_1(x) C_2(x-\xi) dx.$$

Відношення правдоподібності можна записати наступним чином:

$$\Lambda = \exp\left(\frac{1}{2}\left(\frac{z(\xi)}{v}\right)^2 - \frac{1}{2}\left(\frac{z(\xi)}{v} - q\right)^2\right).$$

Для спрощення обробки доцільно замість відношення правдоподібності формувати його логарифм:

$$\begin{aligned} \ln(\Lambda|\xi) &= \left(\frac{1}{2}\left(\frac{z(\xi)}{v}\right)^2 - \frac{1}{2}\left(\frac{z(\xi)}{v} - q\right)^2\right) = \\ &= \frac{1}{2}\left(\frac{2z(\xi)M\{z(\xi)\} - M\{z(\xi)\}^2}{v^2}\right). \end{aligned}$$

Знайдемо математичне очікування логарифму відношення правдоподібності.

$$M\{\ln(\Lambda|\xi)\} = \frac{1}{2}M\left\{\frac{2z(\xi)M\{z(\xi)\} - M\{z(\xi)\}^2}{v^2}\right\},$$

звідки отримуємо:

$$M\{\ln(\Lambda|\xi)\} = \frac{(M\{z(\xi)\})^2}{2v^2}.$$

Потенціальну точність виміру координат зображення об'єкта на другому знімку можна визначити згідно з формулою Крамера-Рао:

$$\sigma_\xi^2 = \frac{-1}{\frac{d^2}{d\xi^2} \left[\frac{(M\{z(\xi)\})^2}{2v^2} \right] |_{\xi=0}}.$$

Для розрахунку точності виміру координат зображення у відповідності до формули Крамера-Рао необхідно розрахувати величину

$$U = \frac{d^2}{d\xi^2} \left[\frac{(M\{z(\xi)\})^2}{2v^2} \right].$$

Диференціюючи $\ln(\Lambda|\xi)$ і приймаючи до уваги той факт, що дисперсія v не залежать від ξ , маємо

$$\begin{aligned} \frac{d^2}{d\xi^2} \ln(\Lambda|\xi) &= \left(\frac{d}{d\xi} \int_{-\infty}^{\infty} C_1(x) C_2(x-\xi) dx \right)^2 + \\ &+ \int_{-\infty}^{\infty} C_1(x) C_2(x-\xi) dx \frac{d^2}{d\xi^2} \int_{-\infty}^{\infty} C_1(x) C_2(x-\xi) dx. \end{aligned}$$

Для подальшого спрощення даного виразу введемо спектр зображення, який отримується за допомогою прямого перетворення Фур'є:

$$C_2(x-\xi) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F_2(j\omega) \exp(j\omega(x-\xi)) d\omega.$$

Диференціювання обох частин цього рівняння дає

$$\begin{aligned} \frac{dC_2(x-\xi)}{d\xi} &= \\ &= -\frac{j}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \omega F_2(j\omega) \exp(j\omega(x-\xi)) d\omega. \end{aligned}$$

Використовуючи це, представимо інтеграл у виді

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dC_2(x-\xi)}{d\xi} C_1(x) dx &= \\ &= -\frac{j}{4\pi^2} \iiint_{-\infty}^{\infty} \omega' F_1 \exp(-j\omega'\xi) F_2^*(j\omega') \times \\ &\quad \times \exp(-jx(\omega' - \omega''\xi)) dx d\omega' d\omega''. \end{aligned}$$

Далі, використовуючи інтегральне представлення дельта-функції

$$\delta(\omega) = \frac{j}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-j\omega x) dx,$$

отримуємо

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dC_2(x-\xi)}{d\xi} C_1(x) dx &= \\ &= -\frac{j}{2\pi} \iint_{-\infty}^{\infty} \omega' F_1(j\omega') F_2^*(j\omega') \delta(\omega' - \omega'') \times \\ &\quad \times \exp(-j\omega'\xi) d\omega' d\omega'' = \\ &= -\frac{j}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \omega F_1(j\omega) F_2^*(j\omega) \exp(-j\omega\xi) d\omega. \end{aligned}$$

Тому

$$\begin{aligned} \left(\int_{-\infty}^{\infty} \frac{dC_2(x-\xi)}{d\xi} C_1^*(x) dx \right)^2 &= \\ &= \frac{1}{4\pi^2} \left[\int_{-\infty}^{\infty} \omega F_1(j\omega) F_2^*(j\omega) \times \right. \\ &\quad \left. \times \exp(-j\omega'\xi) d\omega \right]^2. \end{aligned}$$

Остаточно запишемо:

$$\begin{aligned} \left(\int_{-\infty}^{\infty} \frac{dC_2(x-\xi)}{d\xi} C_1^*(x) dx \right)^2 &= \\ &= \frac{1}{4\pi^2} \left[\int_{-\infty}^{\infty} \omega F_1(j\omega) F_2^*(j\omega) d\omega \right]^2. \end{aligned}$$

Визначимо середнє значення частоти:

$$\bar{\omega} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \omega F_1(j\omega) F_2^*(j\omega) d\omega}{\int_{-\infty}^{\infty} F_1(j\omega) F_2^*(j\omega) d\omega}.$$

Аналогічно отримаємо

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d^2 C_2(x-\xi)}{d\xi^2} C_1(x) dx = \\ = -\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 F_1(j\omega) F_2^*(j\omega) d\omega. \end{aligned}$$

Визначимо другий момент взаємного просторового спектру зображень:

$$\bar{\omega}^2 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 F_1(j\omega) F_2^*(j\omega) d\omega}{\int_{-\infty}^{\infty} F_1(j\omega) F_2^*(j\omega) d\omega}.$$

Прийемо $F_{12}(\omega)$ – взаємний просторовий спектр зображень, E_{12} – енергія взаємного просторового спектру зображень

$$F_{12}(\omega) = F_1(\omega) F_2^*(\omega),$$

$$E_{12} = \int_{-\infty}^{\infty} F_{12}(\omega) d\omega,$$

і, враховуючи рівність Парсеваля

$$\begin{aligned} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F_2(j\omega) F_1^*(j\omega) d\omega = \\ = \int_{-\infty}^{\infty} C_2(x) C_1^*(x) dx = E, \end{aligned}$$

остаточно отримаємо формулу для розрахунку оцінки точності визначення суміщення зображень об'єкта на першому і другому знімках

$$\sigma_p^2 = \frac{(2E_1 N_2 + 2E_2 N_1 + N_1 N_2)}{4(E_{12})^2 (\bar{\omega}^2 - (\bar{\omega})^2)},$$

де $(\bar{\omega}^2 - (\bar{\omega})^2)$ – середній квадрат ширини взаємного просторового спектру зображень.

Розділимо чисельник і знаменник отриманої формули на $E_1 E_2$ і виберемо початок координат таким чином, щоб $(\bar{\omega})^2 = 0$. Тоді остаточно отримаємо

$$\sigma_p^2 = \frac{\left(\frac{2}{q_1} + \frac{2}{q_2} + \frac{1}{q_1 q_2}\right)}{4k_{12}^2 \omega^2} = \frac{2q_1 + 2q_2 + 1}{4k_{12}^2 q_1 q_2 \omega^2}, \quad (3)$$

де q_1, q_2 – відношення сигнал-шум на першому та другому знімках відповідно, k_{12} – коефіцієнт кореляції спектрів зображень об'єкта на першому і другому знімках [10], що визначається як

$$k_{12} = \frac{E_{12}}{\sqrt{E_1 E_2}}.$$

2 Аналіз отриманих результатів

Аналіз формули (3) показує, що точність суміщення зображень погіршується зі збільшенням спектральної щільності потужності шумів на першому і другому знімках та зменшенням схожості одного зображення з другим, а також зі зменшенням величини $\bar{\omega}^2$, яка характеризує ефективну ширину взаємного просторового спектру зображень.

Для проведення аналізу впливу відповідних параметрів на помилку визначення висот об'єктів в якості початкових даних були взяті типові дані [7], які відповідають параметрам і характеристикам сучасних космічних апаратів дистанційного зондування Землі: режим зйомки – панхроматичний, роздільна здатність – 2,5 м, оптичний приймач – стрічково-кадровий ПЗЗ з розміром пікселя 5х5 мкм. (рис. 1).

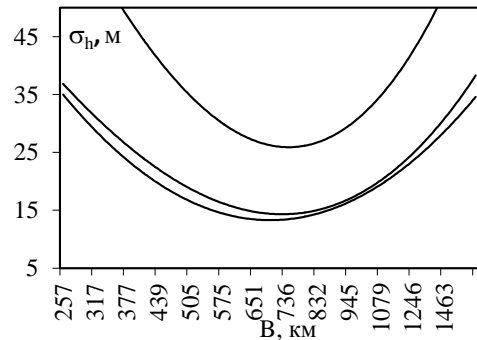


Рис. 1. Графік залежності помилки визначення висот об'єктів від значення базису стереознімання

Графіки залежностей помилки визначення висот об'єктів від значення базису стереознімання представлені на рис. 1. Аналіз графіків показав, що зі збільшенням значення базису помилка виміру висот об'єктів спочатку покращується, а потім погіршується. Це погіршення викликано тим, що знімки стереопари отримуються із різних просторових точок і при цьому на зображеннях виникають перспективні викривлення та викривлення за рельєф [4]. Відповідно, при збільшенні базису знімання ці викривлення будуть збільшуватися. За рахунок цього енергія взаємного просторового спектру зображень зменшується (рис. 2).

Зменшення енергії взаємного просторового спектру зображень приводить до погіршення помилки

визначення паралакса при автоматичному суміщенні стереозображень екстремально-кореляційним методом (рис. 3).

Це, у свою чергу, приводить до погіршення точності визначення висот об'єктів.

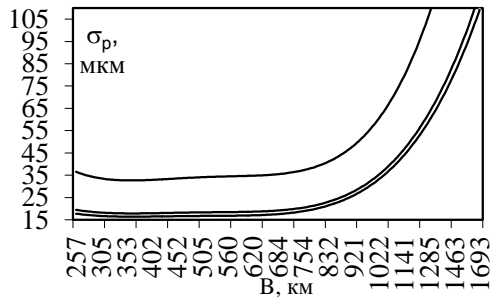


Рис. 2. Графік залежності енергії взаємного просторового спектру зображень від значення базису стереознімання

Перевагою даного підходу є застосування кінцевого аналітичного виразу. Він надає можливість розрахувати потенційну точність визначення висот об'єктів у випадках побудови ЦМР за допомогою сучасних прикладних програм.

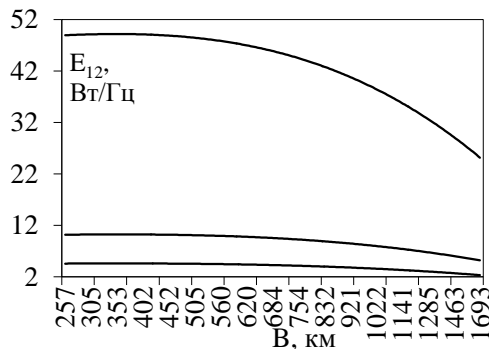


Рис. 3. Графік залежності помилки визначення паралакса від значення базису стереознімання

До недоліків можна віднести складності із розрахунком моментів взаємного просторового спектру стереозображень.

Висновки

Даний підхід можливо застосовувати при плануванні режиму проведення зйомки та апаратури знімання земної поверхні для картографування, отримання 3D моделей і т.д.

Перелік посилань

1. Vollmerhausen R. H. (2010) Analysis and evaluation of sampled imaging systems / R. H. Vollmerhausen, D Reago, Driggers R. G. // SPIE Press, 304 p.
2. Павленко Л. А. Геоінформаційні системи : навчальний посібник / Л. А. Павленко. - Х. : Вид. ХНЕУ, 2013. - 260 с.

3. Aelterman J. Suppression of Correlated Noise, Recent Advances in Signal Processing / J. Aelterman, B. Goossens, A. Pizurica and W. Philips. - Intech Computer and Information Science, 2009. - pp. 211-237.
4. Краснопевцев Б.В. Фотограмметрия / Б.В. Краснопевцев. - М. : УПП "Репрография"МИИГАиК, 2008. - 160 с.
5. Фисенко В.Т. Компьютерная обработка и распознавание изображений: учеб. пособие / В.Т. Фисенко, Т.Ю. Фисенко. - СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. - 192 с.
6. Serra J. Image Analysis and Mathematical morphology / J. Serra. - L. : Academic Press, 2010.
7. Горшенін О.Є. Методика оцінювання якості космічних знімків при їх використанні для дешифрування штучних об'єктів дистанційного зондування Землі / О.Є. Горшенін, В.В. Петрожалко, О.Ф. Дубина // Вісник ЖДТУ: зб. наук. праць. - 2011. - Вип.56. - С. 37-43.
8. Holub V. Designing Steganographic Distortion Using Directional Filters / V. Holub, J. Fridrich // Proc. of IEEE Workshop on Information Forensic and Security. - 2012.
9. Баклицкий В.К. Корреляционно-экстремальные методы навигации и наведения / В.К. Баклицкий. - Тверь : Книжный клуб, 2009. - 860 с.
10. He Q. Effects of multiscale noise tuning on stochastic resonance for weak signal detection / Q. He, J. Wang // Digital Signal Processing. - 2012. - Vol. 22, Iss. 4. - pp. 614-621.

References

- [1] Vollmerhausen R.H., Reago D.A. and Driggers R.G. (2010) *Analysis and Evaluation of Sampled Imaging Systems*, SPIE Press, 304 p. DOI: 10.1117/3.853462
- [2] Pavlenko L. A. (2013) *Geoinformatsiini systemy* [Geographic information systems], Kharkiv, KhNEU, 260 p.
- [3] Aelterman J., Goossens B., Pizurica A. and Philips W. (2009) Suppression of Correlated Noise. *Recent Advances in Signal Processing*, pp. 211-237. DOI: 10.5772/7446
- [4] Krasnopevtsev B.V. (2008) *Fotogrammetriya* [Photogrammetry], Moscow, Reprografiya MIIGAIK, 160 p.
- [5] Fisenko V.T. and Fisenko T.Yu. (2008) *Komp'yuternaya obrabotka i raspoznavanie izobrazhenii* [Computer processing and image recognition], SPb: SPbGU ITMO, 192 p.
- [6] Serra J. (1983) *Image Analysis and Mathematical morphology*, Academic Press.
- [7] Horshenin O.Ye., Petrozhalko V.V. and Dubyna O.F. (2011) Metodyka otsiniuvannya yakosti kosmichnykh znmkiv pry ikh vykorystanni dlia deshyfruvannya shtuchnykh ob'ektiv dystantsiinoho zonduvannya Zemli [Methods for assessing the quality of space images when used to decipher artificial objects of remote sensing of the Earth], *Visnyk ZhDTU*, Iss. 56, pp. 37-43.
- [8] Holub V. and Fridrich J. (2012) Designing steganographic distortion using directional filters. *2012 IEEE International Workshop on Information Forensics and Security (WIFS)*, . DOI: 10.1109/wifs.2012.6412655
- [9] Baklitskii V.K. (2009) *Korrelyatsionno-ekstremal'nye metody navigatsii i navedeniya* [Correlation-extreme methods of navigation and guidance], Tver', Knizhnyi klub, 860 p.

- [10] He Q. and Wang J. (2012) Effects of multiscale noise tuning on stochastic resonance for weak signal detection. *Digital Signal Processing*, Vol. 22, Iss. 4, pp. 614-621. DOI: 10.1016/j.dsp.2012.02.008

Определение точности измерения высот объектов при автоматической обработке стереоснимков

Дубина А. Ф., Андреев А. В., Никитчук Т. Н., Свинцицкая А. Н.

В настоящее время информация о пространственном описании объектов применяется во многих сферах деятельности человечества. Одним из таких видов информации есть координаты объектов. Такие данные используются в картографии, при построении цифровых карт и 3D моделей, для работы навигационных средств и т.д. При автоматизированном создании цифровых моделей рельефа земной поверхности одним из основных качественных показателей является точность определения высоты объектов. Основное влияние на этот показатель осуществляет ошибка измерения параллакса при обработке стереоснимков. Для получения формулы расчета точности измерения высоты объектов использовалось разложение функции в ряд Тейлора. Используя формулу Крамера-Рао для потенциальной точности измерения координат изображения объекта на снимке, преобразование Фурье и равенство Парсевала, получена формула потенциальной точности совмещения стереоснимков (измерения параллакса). Проведенный анализ полученных формул показывает, что точность совмещения изображений ухудшается с увеличением спектральной плотности мощности шумов на первом и втором снимках и уменьшением сходства одного изображения с другим, а также с уменьшением величины эффективной ширины взаимного пространственного спектра стереоизображения. С увеличением значения базиса стереосъемки ошибка измерения высот объектов сначала улучшается, а затем ухудшается. Это ухудшение вызвано тем, что снимки стереопары получают из разных пространственных точек и при этом на изображениях возникают перспективные искажения и искажения за рельеф. Соответственно, при увеличении базиса съемки эти искажения будут увеличиваться. Данный подход возможно применять при планировании режима проведения стереосъемки и аппаратуры съемки земной поверхности для картографирования, получения 3D моделей и т.д.

Ключевые слова: фотограмметрия; высота объектов; точность получения координат объектов; стереоснимки; параллакс; корреляционно-экстремальный метод

Determining the Accuracy of Measuring the Heights of Objects in the Automatic Processing of Stereo Images

Dubyna O. F., Andreev O. V., Nikitchuk T. N., Svintsytska O. M.

Introduction. Currently, information on the spatial description of objects is used in many areas of human

activity. One of these types of information are the coordinates of the objects. These data are used in cartography, the construction of digital maps and 3D models, for the operation of the navigation means, etc. There are many software for design and analysis of digital elevation models. These are modules and packages like Spatial Analyst, 3D Analyst, ArcGIS packages, program MapInfo (MapInfo Corp.), Autodesk Map 3D of AutoCAD (Autodesk Inc.) and others. Common to them is build automation of soprovich terrain models, including the combination of the images of the stereopair, what is necessary to measure heights of objects for automated creation of digital elevation models of the earth's surface one of the key quality indicators is the accuracy of determining the heights of objects. The main influence on this indicator provides measurement error of parallax when processing stereosystem.

Obtaining analytical expressions for the accuracy of the determination of the height of the object. To obtain the formula of calculating accuracy of measuring the height of objects used decomposition of the function into a Taylor series. Currently, the standard deviation of measurement errors of height of flight of the aircraft, the basis of stereozone and focal length, usually known with enough high accuracy. The main influence on the accuracy of determining the heights of objects during automatic processing of images is the accuracy of parallax. When measuring parallax, the problem is reduced to the search and discovery of images of the object in the second picture on the image of the object on the first image and measuring its position over images of other objects and noise. Using the formula of Kramer-Rao for the potential measurement accuracy of the image coordinates of the object in the picture, the Fourier transform and the parseval equality proof the identity, the formula obtained accuracy potential of combining stereochemical (measurement of parallax). We used the extreme-correlation combination method, as it can be applied for virtually any signals and systems of measurement.

Analysis of the obtained results. The analysis of the obtained formulas shows that the overlay accuracy of the images deteriorates with the increase of the power spectral density of the noise on the first and second images and reducing the similarity of one image with another and also with the decrease in the effective width of a mutual spectrum spatial stereo. Increasing the value of the basis stereozone error of measurement of heights of objects first improves and then deteriorates. This deterioration is caused by the fact that the images of a stereo pair are obtained from different spatial points and images arise of perspective distortion and the distortion due to relief. Accordingly, as the base of removal increases, these distortions will increase.

Conclusions. The advantage of this approach is the use of finite analytical expression. It provides the ability to calculate the potential accuracy of defining object heights when building a DMR with modern applications. The disadvantages include the complexity of calculating the moments of mutual spatial spectrum of stereo images. This approach can be applied when planning the shooting mode and the Earth surface imaging equipment for mapping, 3D models, etc.

Key words: photogrammetry; object height; object coordinate accuracy; stereo; parallax; correlation-extreme method