

УДК 528.721.287:537.533.35

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ ПРОСТОРОВИХ КООРДИНАТ ТОЧОК МІКРОПОВЕРХНІ ДОСЛІДНОГО ОБ'ЄКТА З ВІДПОВІДНИМИ ЇХ КООРДИНАТАМИ НА РЕМ-СТЕРЕОЗОБРАЖЕННЯХ

О. Іванчук

Національний університет "Львівська політехніка"

Ключові слова: растровий електронний мікроскоп (РЕМ), математична модель РЕМ-стереофотограмметрії, РЕМ-стереозображення, просторові координати точок мікроповерхонь об'єктів.

Постановка проблеми і аналіз останніх досліджень та публікацій, що стосуються вирішення цієї проблеми

Питаннями математичного моделювання у РЕМ-фотограмметрії щодо встановлення зв'язку просторових координат мікроповерхонь дослідних об'єктів з відповідними координатами на РЕМ-стереознімках займалися майже всі вчені, які намагалися отримати їхні кількісні параметри за допомогою математичного опрацювання РЕМ-стереопар. На практиці більшість з них для отримання просторових координат X, Y мікроповерхонь об'єктів використовували формули зв'язку для нормально-конвергентного випадку РЕМ-знімання (див. вирази для X, Y у формулах (1.4)), а для отримання висот і перевишень точок мікрорельєфу $Z(h)$ – формулу для рівномірно-відхиленого випадку знімання (див. вираз для $Z(h)$ у формулах (1.3)). Для інших випадків РЕМ-знімання ці формули дають неточний результат і не повинні застосовуватися. Серед закордонних вчених, які зробили вагомий внесок у розвиток теорії РЕМ-фотограмметрії, необхідно виділити Бойда, Буркгардта, Гоша, Мауне, Нагарая, Нанківелла, Ошіму, Росса, Хелмеке, Ховела, Хубені, Б. Васічева, І. Гареліка, П. Гончарова, С. Калантарова, В. Соколова, Ж. Сагіндикову та багато інших [1–15, 24]. Першим в Україні виконав важливі теоретичні та практичні роботи в сфері РЕМ-фотограмметрії та сьогодні успішно їх здійснює професор В. М. Мельник, а також учні його школи О. М. Іванчук, А. В. Шостак, В. У. Волошин, Ю. В. Мельник [8, 12, 16–23, 25–30] та ін.

Невирішені частини загальної проблеми

У теоретичних роботах вищеперелічених авторів формули прямої фотограмметричної засічки РЕМ-стереознімання наводяться, як правило, у загальному матричному вигляді, що важко застосувати для практичного використання. А у явному вигляді подано лише формули для рівномірно-відхиленого випадку знімання та для випадку знімання методом поворотів, які на практиці застосовують дуже рідко [18, 21, 22, 26].

Раніше ми вже отримали формули взаємозв'язку просторових координат точок мікроповерхні дослідних об'єктів з відповідними їх координатами на РЕМ-стереозображеннях у явному вигляді за допомогою геометричних побудов [16]. Але строгого математичного виведення формул на підставі теорії перспективно-афінного відображення ще не здійснено.

Постановка завдання

Використовуючи математичний апарат перспективно-афінного відображення для РЕМ-стереознімання, вивести формули взаємозв'язку просторових координат точок мікроповерхні дослідних об'єктів з відповідними їхніми координатами на РЕМ-стереозображеннях у явному вигляді для усіх трьох основних способів РЕМ-стереознімання, а також виконати апріорну та апостеріорну оцінку точності отриманих формул.

Виклад основного матеріалу та результати досліджень

1. Теоретичні положення

У разі збільшення зображення в РЕМ понад 100^{\times} (крат) проекцію, яка формує РЕМ-зображення, можна вважати паралельною, тобто перспективно-афінною. Для цієї проекції можна записати співвідношення між координатами точок РЕМ-зображення x, y мікроповерхні дослідного об'єкта та їх просторовими координатами $X, Y, Z(h)$ в загальному у вигляді:

$$\begin{pmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ 0 \end{pmatrix} = M \cdot A \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix}, \quad (1.1)$$

де M – збільшення (масштаб) РЕМ-зображення; A – матриця напрямних косинусів, яка визначає взаємне положення між системами координат РЕМ-знімка і об'єкта.

$$A = A_{\alpha} \cdot A_{\omega} \cdot A_{\kappa} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{pmatrix} \times \\ \times \begin{pmatrix} \cos \kappa & \sin \kappa & 0 \\ -\sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix}.$$

У практичній РЕМ-фотограмметрії початок систем координат РЕМ-знімка й об'єкта суміщають і ним, як правило, є геометричний центр РЕМ-знімка та відповідна точка на поверхні об'єкта, що відобразилась на знімку. Для отримання стереопар використовують переважно лише поздовжні нахили гоніометричного столика на кут α , а кути $\omega = \kappa = 0^{\circ}$. Тоді формула (1.1) набуде вигляду:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 0 \end{pmatrix} = M \cdot A_{\alpha} \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = M \cdot \begin{pmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}. \quad (1.2)$$

З рівняння (1.2) отримаємо формули зв'язку просторових координат точок мікроповерхні з відповідними їх

координатами на цифрових РЕМ-знімках стереопари для усіх трьох випадків РЕМ-знімання.

Для **рівномірно-нахиленого** випадку РЕМ-знімання, коли лівий знімок стереопари отримують, нахиливши гоніометричний столик на кут $-\alpha_n$, а правий – на такий самий за величиною кут $+\alpha_n$, формули (1.2) після нескладних перетворень набудуть такого вигляду:

$$\left. \begin{aligned} X &= \frac{x_l^o + \Delta p_x^o / 2}{M_x \cdot \cos \alpha} \cdot 10^3; \\ Y &= \frac{y_l^o}{M_y} \cdot 10^3; \\ Z(h) &= \frac{\Delta p_x^o}{2M_x \cdot \sin \alpha} \cdot 10^3. \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

Відповідно для **нормально-конвергентного** випадку РЕМ-знімання ($\alpha_n = 0^\circ$, $\alpha_n \neq 0^\circ$) формули матимуть вигляд:

$$\left. \begin{aligned} X &= \frac{x_l^o \cdot 10^3}{M_x}; \\ Y &= \frac{y_l^o \cdot 10^3}{M_y}; \\ Z(h) &= \frac{x_l^o \cdot (1 - \cos \alpha_n) + \Delta p_x^o}{M_x \cdot \sin \alpha_n} \cdot 10^3. \end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

А для **конвергентного** ($\alpha_l \neq \alpha_n \neq 0^\circ$):

$$\left. \begin{aligned} X &= \frac{(x_l^o / M_x) \cdot 10^3 - h \cdot \sin \alpha_l}{\cos \alpha_n}; \\ Y &= \frac{y_l^o}{M_y} \cdot 10^3; \\ Z(h) &= \frac{(x_l^o + \Delta p_x^o) \cdot \cos \alpha_n - x_l^o \cdot \cos \alpha_l}{M_x \cdot \sin(\alpha_n - \alpha_l)} \cdot 10^3. \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

У формулах (1.3)–(1.5):

$$\left. \begin{aligned} x_l^o &= x_{l_{\text{вим}}} - \Delta x_l, & \Delta p_{x_i}^o &= p_{x_i}^o - p_o, \\ y_l^o &= y_{l_{\text{вим}}} - \Delta y_l, & p_{x_i}^o &= x_{i_n}^o - x_{i_l}^o. \end{aligned} \right\} \quad (1.6)$$

За наявності калібрувальних тест-сіток можна визначити параметри дійсних збільшень РЕМ-знімка M_x, M_y , а також величини геометричних спотворень його координат $\Delta x, \Delta y$, які найоптимальніше описати поліномом загального вигляду третього степеня:

$$\left. \begin{aligned} \Delta x_l &= a_0 + a_1 x_l + a_2 y_l + a_3 x_l y_l + a_4 x_l^2 + a_5 y_l^2 + \\ &+ a_6 x_l^3 + a_7 x_l^2 y_l + a_8 x_l y_l^2 + a_9 y_l^3; \\ \Delta y_l &= b_0 + b_1 x_l + b_2 y_l + b_3 x_l y_l + b_4 x_l^2 + b_5 y_l^2 + \\ &+ b_6 x_l^3 + b_7 x_l^2 y_l + b_8 x_l y_l^2 + b_9 y_l^3. \end{aligned} \right\} \quad (1.7)$$

У формулах (1.3)–(1.7): $X, Y, Z(h)$ – просторові координати точок мікроповерхні, мкм; $x_{l_{\text{вим}}}, y_{l_{\text{вим}}}$ – виміряні на цифровій станції координати точок на лівому РЕМ-знімку, мм; x_l^o, y_l^o – виправлені за геометричні спотворення $\Delta x, \Delta y$ координати точок на лівому РЕМ-знімку, мм; a_i, b_i – коефіцієнти полінома

загального вигляду ($i = 0, 1, 2, \dots, 9$); Δp_x^o – різниця паралаксів i -ї точки p_i^o і початкової (центральної) точки РЕМ-знімка p_o , мм; M_x, M_y – збільшення (крат) або масштаб РЕМ-знімка у взаємно перпендикулярних напрямках x, y (вздовж осей x, y); α_l, α_n – кути нахилу гоніометричного столика навколо осі Y столика (вздовж осі X) під час отримання лівого та правого РЕМ-знімків стереопари.

2. Оцінка точності

Для отримання РЕМ-стереопар на практиці переважно застосовується нормально-конвергентний випадок знімання, за якого лівий знімок отримують за горизонтального положення гоніометричного столика ($\alpha_n = 0^\circ$), а правий – за його нахилу на кут від 4° до 12° залежно від збільшення РЕМ-зображення та мікро-рельєфу поверхні дослідного об'єкта.

Отримані у цифровому форматі РЕМ-знімки мають різні розгортки і різні лінійні розміри в разі їх опрацювання у програмному пакеті “Dimicros” [18] залежно від типу РЕМ.

У сучасних японських РЕМ, які найчастіше використовують у наукових лабораторіях держав Східної Європи (JSM 7100F, JSM-5000 фірми JEOL та ін.), розгортка РЕМ-зображення становить переважно 1280×1024 піксела. Масштаб цифрового РЕМ-зображення, як правило, відповідає встановленому збільшенню у РЕМ у випадку, коли його розміри 120×96 мм. Розмір піксела при цьому становить $0,09375$ мм, тобто приблизно $0,1$ мм.

У такий спосіб можна встановити теоретичну точність отримання просторових координат X, Y, Z мікроповерхонь об'єктів за одержаними формулами. Якщо продиференціювати, для прикладу, формули (1.4) нормально-конвергентного випадку РЕМ-знімання, який переважно застосовується на практиці, і перейти до середньоквадратичних похибок, то можна отримати наближені вирази, за умови $M = \text{Const}, \alpha = \text{const}$:

$$\left. \begin{aligned} m_{X(Y)} &= m_{x(y)} / M, \\ m_{Z(h)} &= m_{\Delta p(x)} / 2M \cdot \sin \alpha. \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

Безумовно, точність визначення масштабів РЕМ-знімків M і кутів його нахилів α істотно впливає на точність вимірів і, відповідно, на точність отримання просторових координат точок X, Y, Z . Однак у сучасних РЕМ, за наявності калібрувальних тест-сіток з високою розрізнявальною здатністю (від 200 до 3500 лін/мм), є можливість встановлювати дійсний масштаб цифрових РЕМ-зображень з точністю $\pm 1\%$. Гоніометричні столики сучасних РЕМ дають можливість встановлювати фіксовані значення кутів нахилів з точністю, не меншою, ніж $0,1^\circ$ (як правило, $1-3^\circ$). Тому впливом цих параметрів за таких умов можна знехтувати.

Отже, точність отримання координат X, Y, Z залежить, насамперед, від точності вимірювання координат точок і паралаксів за РЕМ-знімками, а також від їх збільшення (масштабу). Наявність калібрувальних тест-сіток дає змогу суттєво апроксимувати (враховувати) дисторсійні спотворення РЕМ-зображень, які навіть у сучасних РЕМ можуть досягати на краях знімків до $1,5-3$ мм.

Велика кількість наших попередніх експериментальних робіт [19–23] дала змогу встановити залишкові середньоквадратичні похибки цифрових вимірів РЕМ-зображень залежно від їх масштабу (збільшення). Початок системи координат РЕМ-знімка доцільно встановлювати у його геометричному центрі, відносно якого вимірюються координати x , y і паралакси p точок.

Тоді точність вимірів буде такою:

$$m_{x(y, \Delta p)} = m_{\delta x(\delta y)} \sqrt{2}, \quad (2.2)$$

де $m_{\delta x(\delta y)}$ – середньоквадратичні похибки вимірів координат точок після їх апроксимації поліномом загального виду третього степеня.

Наведемо значення теоретичної точності методу для різних збільшень (табл. 1).

Таблиця 1

Теоретична точність визначення просторових координат точок мікроповерхні дослідних об'єктів

| | 750 ^x | 2000 ^x | 5000 ^x | 10000 ^x | 25000 ^x |
|---------------------------|------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| $m_{x(y, \Delta p)}$, мм | 0,1 | 0,12 | 0,16 | 0,20 | 0,30 |
| $m_{x(y)}$, мкм | 0,190 | 0,085 | 0,045 | 0,028 | 0,017 |
| $m_{z(h)}$, мкм | 0,94 | 0,42 | 0,23 | 0,14 | 0,09 |

Для підтвердження теоретичної точності методу ми провели експеримент.

На РЕМ JSM 7100F (JEOL, Японія) відзняли тест-сітку з розрізнявальною здатністю 1425 лін/мм та мікроповерхню хромованої сталі за збільшення РЕМ $M = 750^x$ і кутів нахилу гоніометричного столика $\alpha = 0^\circ, 4^\circ, 6^\circ, 8^\circ$ (рис. 1, 2).

Опрацювання цифрових РЕМ-зображень здійснено за допомогою комплексу програм “Dimicros”. Спочатку визначали величини геометричних спотворень РЕМ-зображень за програмою “Test-Measuring”. Середня квадратична похибка геометричних спотворень за вимірами 111 контрольних точок становила $m_{\Delta x} = 85,4$ мкм, $m_{\Delta y} = 95,2$ мкм (приблизно 1 піксел) за максимальних $\Delta x = 280,4$ мкм, $\Delta y = 179,1$ мкм. За програмою “Polycalc” виконано їх апроксимацію поліномом загального виду третього степеня (1.7). Середня квадратична похибка залишкових спотворень дорівнює $m_{\delta x} = 41,2$ мкм, $m_{\delta y} = 42,0$ мкм, а максимальні значення $\delta x_{max} = 102,4$ мкм, $\delta y_{max} = 106,7$ мкм, тобто приблизно 1 піксел (93,7 мкм). Векторні діаграми спотворень до і після апроксимації наведені на рис. 1, б, в.

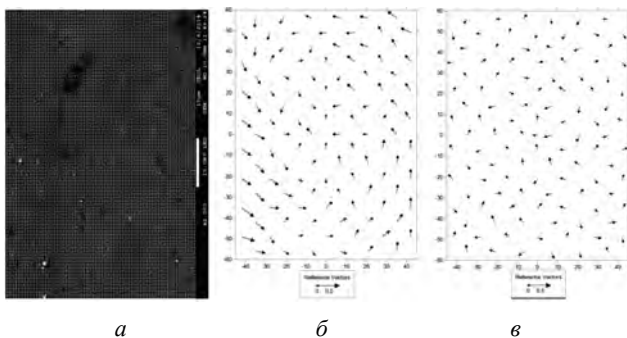
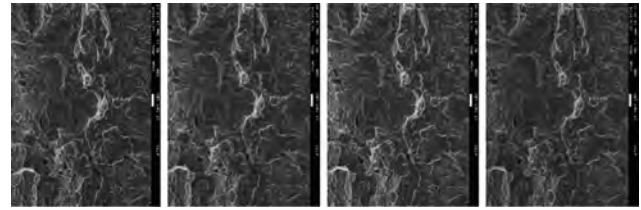


Рис. 1. Цифровий РЕМ-знімок тест-сітки (а); вектори геометричних спотворень РЕМ-знімка до і після апроксимації поліномом (б, в)



а – 0° б – 4° в – 6° з – 8°

Рис. 2. Цифрові РЕМ-знімки мікроповерхні хромованої сталі, отримані за $M = 750^x$ і кутів нахилу гоніометричного столика $0^\circ, 4^\circ, 6^\circ, 8^\circ$

Для встановлення реальної точності вимірів просторових координат точок мікроповерхні хромованої сталі ми сформували три стереопари ($0^\circ-4^\circ, 0^\circ-6^\circ, 0^\circ-8^\circ$) і на кожній із них за програмою “StereoSEM” було виміряно ті самі характерні точки (51) та визначено їхні просторові координати X, Y, Z . Контрольні точки рівномірно розміщались по всьому полю РЕМ-знімка.

Оцінку точності виконували так. Спочатку були знайдені середні значення координат точок, потім величини відхилень від середніх значень, середні квадратичні похибки на кожній з виміряних точок і середні їх значення за всіма контрольними точками. Остаточо отримано такі середні квадратичні похибки за трьома стереопарами загалом:

$$m_x = 0,10 \text{ мкм}, m_y = 0,12 \text{ мкм}, m_{z(h)} = 0,74 \text{ мкм}.$$

За результатами досліджень можна зробити певні висновки.

Висновки

1. Виконані теоретичні дослідження на підставі перспективно-афінного відображення дали змогу отримати строгі формули зв'язку просторових координат точок мікроповерхні з відповідними їхніми координатами на цифрових РЕМ-знімках стереопари для трьох основних випадків РЕМ-знімання: рівномірно-відхиленого, нормально-конвергентного та конвергентного.

2. Підтверджено доцільність і ефективність запропонованої технології опрацювання РЕМ-стереопар з попереднім встановленням і врахуванням геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень.

3. Експериментальні дослідження підтвердили коректність виведених формул та доцільність їх практичного використання для встановлення кількісних параметрів мікроповерхонь дослідних об'єктів з необхідною точністю.

4. Встановлення дійсних масштабів цифрових РЕМ-зображень, величин геометричних спотворень знімків з подальшим їх урахуванням, а також отримання просторових координат точок мікроповерхонь дослідних об'єктів доцільно виконувати з використанням калібрувальних тест-сіток, ЦФС “Дельта” та спеціального пакета програм “Dimicros”.

Література

1. Boyde A. Photogrammetry and Scanning electron microscopy / Boyde A., Ross H. F. // Photogrammetric Record. – 1975. – Vol. 8. – № 46. – P. 408–457.

2. Burkhardt R. Dreidimensionale Auswertung von nach Blodern und Lange aufgenommenen elektronen mikroskopischen Stereobildern // *Optik*. – 1978. – 50. – № 4. – S. 279–296.
3. Ghosh S. K. Scanning Electron Micrography and Phtogrammetry / Ghosh S. K., Nagaraja H. // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. – 1976. – Vol. 42. – № 5. – P. 649–657.
4. Helmeke I. G. Qualitative Elektron Mikroskopy / Helmeke I. G., Klein W., Burkhardt R. // *Photogrammetric Engineering*. – 1975. – 31,7. – P. 796–806.
5. Howel P. G. Comparison of Various Methods for Reducing Measurements from Stereo-pair Scanning Electron Micrographs to Real 3-D data / Howel P. G., Boyde A. // *Scanning Electron Microscopy*. – 1972. – Symposium, Chicago. – III. – Part 1–2. – P. 233–240.
6. Hubeny K. Probleme der Stereophotogrammetrie in der Mikroskopie und Elektronenmikroskopie // *Invited Paper V. Int. K. für Photogrammetrie*. – London, 1960. – S. 118–130.
7. Maune D. F. Photogrammetric Self-Calibration of a Scanning Electron Microscope: Ph.D. dissertation, The Ohio State University, Columbus, Ohio.–1973.
8. Melnik V. Some problems of stereofractografical processing of SEM-Pictures / Melnik V., Sokolov V. // *Bul. Academy Scienes USSR. Phisical Seriea*. – 1992. – 56(3). – P. 215–219.
9. Nagaraja H. N. Application Studies of Scanning Electron Microscope Photographs for Micro-Measurments and Three Dimensional Mapping: Ph.D. dissertation, The Ohio State University, Columbus, Ohio. – 1974.
10. Nankivell I. F. The theory of electron Stereomicroscopy // *Optik*. – 1963. – 20. – № 4. – P. 171–198.
11. Oshima T. Stereomicrography with a scanning electron microscope / Oshima T., Kimoto S., Suganumma T. // *Photogrammetric Engineering*. – 1970. – T. 36, № 8. – P. 874–79
12. 3D recon-struction of surface and Subsurface structures of Solids by SEM stereo images / Sokolov V., Yurkovets D., Melnik V., Boyde A., Howell P. // *Inst. Phys. Conf. Dundee, 2001*. – № 168. – Section 4. – P. 119–122.
13. Васичев Б. Н. Стереовидение в растровой электронной микроскопии / Васичев Б. Н., Абрамов Г. Л. // *Оптико-механ. промышленность*. – 1979. – № 8. – С. 5–8.
14. Гарелик И. В. Стереофотограмметрическая съемка в электронной микроскопии: автореф. дис. канд. техн. наук / И. В. Гарелик. – М., 1967. – 18 с.
15. Гончаров П. П. Стереофотограмметрический метод определения микроструктур при износе шлифовальных материалов и пластической деформации металлов: автореф. дис. канд. техн. наук / П. П. Гончаров. – М., 1974. – 22 с.
16. Иванчук О. М. Методи оперативного фотограмметричного опрацювання знімків, отриманих на растрових електронних мікроскопах: автореф. дис. на здоб. наук. ст. канд. техн. наук / О. М. Иванчук. – Львів, 2000. – 18 с.
17. Иванчук О. М. Дослідження точності побудови цифрових моделей мікрорельєфу різними математичними методами за вимірами РЕМ-стереопар поверхні лесового ґрунту // *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. – 2008. – Вип. II(16). – С. 111–116.
18. Иванчук О. Структура та функції програмного комплексу “Dimicros” для опрацювання РЕМ-зображень на цифровій фотограмметричній станції / Иванчук О., Хрулін І. // *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. – 2012. – Вип. I (23). – С. 193–197.
19. Дослідження величин геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ DSM-960A (Carl Zeiss, Німеччина) та точності їх врахування / Иванчук О., Барфельс Т., Геер Я., Герер // *Геодезія, картографія і аерознімання*. – 2013. – Вип. 78. – С. 120–126.
20. Иванчук О. Дослідження геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ JCM-5000 (NeoScore), та їх апроксимація // *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: гірничо-геологічна*. – Донецьк, 2013. – Вип. I (18). – С. 91–97.
21. Иванчук О. Дослідження геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ-106 I (Суми, Україна) // *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. – 2014. – Вип. II (28). – С. 74–77.
22. Иванчук О. Особливості калібрування геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень, отриманих на різних РЕМ // *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. – 2015. – Вип. I (29). – С. 168–173.
23. Иванчук О. Дослідження геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ JSM-7100F (JEOL, Японія), та точність їх апроксимації // *Геодезія, картографія і аерознімання*. – 2015. – Вип. 81. – С. 101–109.
24. Калантаров Е. И. Фотограмметрическая обработка электронно-микроскопических снимков / Калантаров Е. И., Сагындыкова М. Ж. // *Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка*. – 1982. – № 2. – С. 82–85.
25. Мельник В. Н. Метод фотограмметрии в РЭМ: теория, возможности, ограничения / Мельник В. Н., Соколов В. Н., Иванчук О. М. – М., 1987. – С. 523–524.
26. Мельник В. М. Теорія і практика фотограмметричних методів в електронно-мікроскопічних дослідженнях: автореф. дис. на здоб. наук. ст. д-ра. техн. наук / В.М. Мельник. – Львів, 1995. – 51 с.
27. Мельник В. М. Растрово-електронна стереомікрофрактографія: монографія / Мельник В. М., Шостак А. В. – Луцьк: Вежа, 2009. – 469 с.
28. Мельник В. М. Кількісна стереомікрофрактографія: монографія / Мельник В. М., Шостак А. В. – Луцьк: ПВД “Твердиня”, 2010. – 460 с.
29. Мельник Ю. А. Визначення структури та мікротопографії характеристичних поверхонь матеріалів методом 3D реконструкції: автореф. дис. канд. техн. наук / Ю. А. Мельник. – Луцьк, 2013. – 20 с.

30. Шостак А. В. Методи і моделі мікрофотограмметрії у прикладних наукових дослідженнях: автореф. дис... д-ра техн. наук : 05.24.01 / Шостак Анна Володимирівна; Луцький нац. техн. університет. – Київ, 2012. – 28 с.

Математична модель взаємозв'язку просторових координат точок мікроповерхні дослідного об'єкта з відповідними їх координатами на РЕМ-стереозображеннях

О. Іванчук

На підставі перспективно-афінного відображення отримано формули зв'язку просторових координат точок мікроповерхні з відповідними їх координатами на цифрових РЕМ-знімках стереопари для трьох основних випадків РЕМ-знімання: рівномірно-відхиленого, нормально-конвергентного та конвергентного. Виконано експериментальне дослідження точності отримання координат X , Y , Z мікроповерхні хромированої сталі за допомогою запропонованих формул на підставі вимірів стереопар, які одержані на РЕМ JSM 7100F зі збільшенням $M = 750^x$ і кутами нахилу гоніометричного столика в діапазоні від 0° до 8° . Підтверджена коректність наведених формул і доцільність їх використання у РЕМ-фотограмметрії для отримання кількісних параметрів мікроповерхонь дослідних об'єктів з необхідною точністю.

Математическая модель взаимосвязи пространственных координат точек микроповерхности исследуемого объекта с соответствующими их координатами на РЭМ-стереозображениях

О. Иванчук

На основании перспективно-аффинного отображения получены формулы связи пространственных

координат точек микроповерхности с соответствующими их координатами на цифровых РЭМ-снимках стереопары для трех основных случаев РЭМ-съемки: равномерно-отклоненного, нормально-конвергентного и конвергентного. Выполнено экспериментальное исследование точности получения координат X , Y , Z микроповерхности хромированной стали с помощью предложенных формул на основании измерений стереопар, полученных на РЭМ JSM 7100F при увеличении $M = 750^x$ и углах наклона гониометрического столика в диапазоне от 0° до 8° . Подтверждена корректность приведенных формул и целесообразность их использования в РЭМ-фотограмметрии для получения количественных параметров микроповерхностей исследуемых объектов с необходимой точностью.

Mathematical model of relationship of the spatial coordinates of points microsurface of the object with the corresponding coordinates on their SEM-stereoisomages

O. Ivanchuk

Based on the perspective-affine mapping connection formulas obtained spatial coordinates of points microsurface with their corresponding coordinates on the digital SEM images of a stereo pair of three main cases SEM shooting: uniformly rejected, normally convergent and convergent. An experimental study of the accuracy of the coordinates X , Y , Z microsurface chromed steel using the proposed formula based on the stereo measurements obtained on SEM JSM 7100F with increasing $M = 750 h$ and goniometric table angles from 0° to 8° . It confirmed the correctness of these formulas and their appropriateness for use in SEM photogrammetry to obtain quantitative parameters microsurface of the objects with the required accuracy.

Чергова 21-ша Міжнародна науково-технічна конференція



«ГЕОФОРУМ – 2016»

Присвячена професійному святу працівників
геології, геодезії і картографії України
Відбудеться у Львові та його околицях

13–15 квітня 2016 р.

www.zgt.com.ua