

УДК 528.721.287:537.533.35

## ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ СПОТВОРЕНЬ ЦИФРОВИХ РЕМ-ЗОБРАЖЕНЬ, ОТРИМАНИХ НА РЕМ-106 I (СУМИ, УКРАЇНА)

О. Іванчук

Національний університет "Львівська політехніка"

**Ключові слова:** цифрові РЕМ-зображення, тест-об'єкт, дисторсія, апроксимація.

### Постановка проблеми

Цифровим зображенням, отриманим растровими електронними мікроскопами (РЕМ), притаманні значні геометричні спотворення. Їх неврахування істотно знижує точність кількісних просторових характеристик мікроповерхонь досліджуваних об'єктів, які можна одержати методами цифрової РЕМ-стереофотограмметрії. Тому кількісні параметри різноманітних поверхонь необхідно отримувати з якомога більшою точністю, щоб забезпечити високу якість і ефективність різноманітної продукції у багатьох галузях виробництва: машинобудуванні, мікроелектроніці, літакобудуванні, під час створення космічної та військової техніки тощо.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій, у яких вирішується ця проблема

Цією проблематикою займаються вчені з часу створення перших РЕМ як у нашій країні, так і за кордоном. Найважливіші публікації з цієї проблематики наведено у переліку літературних джерел [1–16]. У попередній публікації [8] автор навів результати досліджень лінійної (масштабної) складової геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень, отриманих на вітчизняному РЕМ-106I. А в цій статті подано результати досліджень величин нелінійної складової геометричних спотворень цифрових зображень (дисторсії).

### Невирішені частини загальної проблеми

Цифрові РЕМ-зображення, отримані на РЕМ-106I, створеному на Сумському підприємстві "SELMI", досліджувались вперше. Важливо дослідити не лише величини і характер дисторсійних спотворень зображень, але й можливість їх ефективного врахування.

### Постановка завдання

Дослідити величини і характер нелінійних геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень на підставі вимірювань зображень спеціального еталонного тест-об'єкта з роздільною здатністю  $r=1425$  лін/мм, отриманих на РЕМ-106I у діапазоні збільшень від  $1000^x$  до  $30000^x$ .

Встановити точність врахування геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень шляхом їх апроксимації поліномом загального виду третього степеня.

### Виклад основного матеріалу та результати досліджень

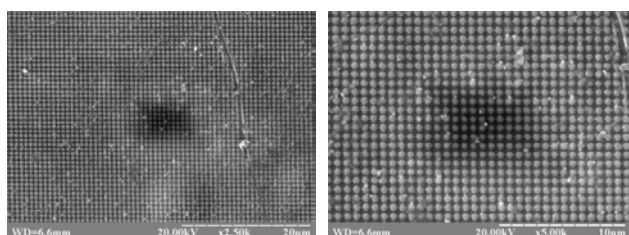
#### 1. РЕМ-знімання.

Під час РЕМ-знімання отримано дев'ять знімків еталонного тест-об'єкта (сітки) з роздільною здатністю  $r=1425$  лін/мм з фіксованими значеннями збільшення:  $1000^x$ ,  $2500^x$ ,  $5000^x$ ,  $8000^x$ ,  $10000^x$ ,  $15000^x$ ,  $20000^x$ ,  $25000^x$ ,  $30000^x$ . Знімки записано у цифровому форматі BMP (рис. 1). Розгортка цифрових РЕМ-зображень на екрані монітора РЕМ становить  $1280 \times 960$  пікселів. Особливістю цих зображень є те, що їх реальний масштаб (збільшення) лише тоді приблизно відповідає встановленому значенню на шкалі РЕМ, коли їх розмір на екрані монітора  $120 \times 90$  мм. Фізичний розмір пікселя у цьому випадку становить **0,09375** мм. Однак у разі фотограмметричного опрацювання цифрових РЕМ-зображень за допомогою спеціального програмного пакета "Dimicros" їх реальний (умовний) розмір на екрані монітора значно більший і становить  $338,56 \times 253,92$  мм за розміру пікселя **0,2645** мм. Отже, коефіцієнт переходу для визначення реального масштабу цифрового знімка для кожного його фіксованого значення – приблизно  $k=2,8213$ .

#### 2. Вимірювання РЕМ-зображень тест-об'єкта.

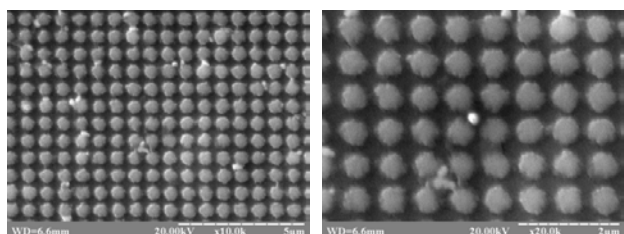
Для фотограмметричного опрацювання цифрових РЕМ-зображень магістр з геоінформатики І.В. Хрупін за алгоритмом автора створив комплекс програм під загальною назвою "Dimicros" [4]. Програма "Test-Measuring" дозволяє вимірювати цифрові РЕМ-зображення спеціального тест-об'єкта, результатом яких є встановлення їх дійсних значень збільшень вздовж осей  $x$  і  $y$  знімка, а також величин геометричних спотворень рівномірно по всьому полю знімка. Наступна програма "Polycalc" за результатами обчислень, виконаних програмою "Test-Measuring" і з використанням полінома загального виду 3-го степеня, обчислює поправки у виміряні координати точок (перехресть) тест-об'єкта (сітки), а також середньоквадратичні похибки величин залишкових спотворень, тобто встановлює точність апроксимації геометричних спотворень поліномом (табл. 1).

На кожному знімку вимірювалась (рівномірно по всьому полю знімка) різна кількість точок: від 35 точок (для  $M=30000^x$ ) до близько 200 точок (для  $M$  від  $1000^x$  до  $10000^x$  крат). На рис. 2. і рис. 3 наведені векторні діаграми геометричних спотворень РЕМ – знімків до і після їх апроксимації.



а)  $M = 2500^x$

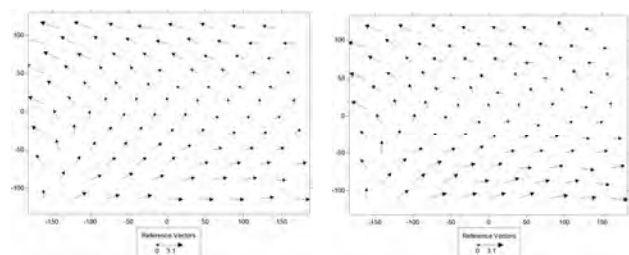
б)  $M = 5000^x$



в)  $M = 10000^x$

г)  $M = 20000^x$

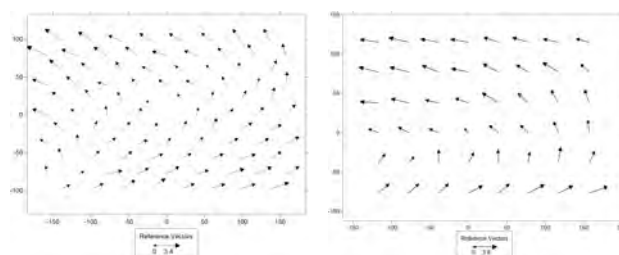
Рис. 1. Цифрові РЕМ-знімки тест-об'єкта з роздільною здатністю  $r = 1425$  ліній/мм за різних збільшень  $M$



а)  $M = 2500^x$

б)  $M = 5000^x$

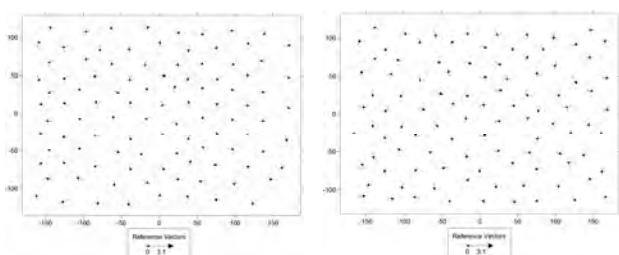
Рис. 2. Векторні діаграми геометричних спотворень цифрових РЕМ-знімків тест-об'єкта за різних збільшень  $M^x$  до апроксимації



в)  $M = 10000^x$

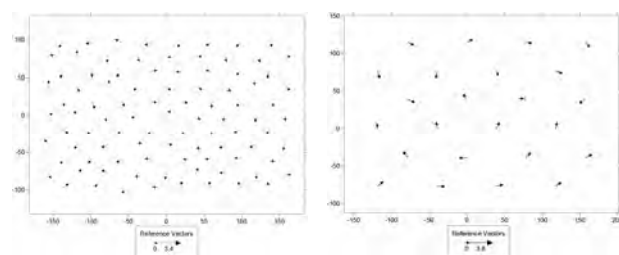
г)  $M = 20000^x$

Рис. 2. (Продовження.) Векторні діаграми геометричних спотворень цифрових РЕМ-знімків тест-об'єкта за різних збільшень  $M^x$  до апроксимації



а)  $M = 2500^x$

б)  $M = 5000^x$



в)  $M = 10000^x$

г)  $M = 20000^x$

Рис. 3. Векторні діаграми геометричних спотворень цифрових РЕМ-знімків тест-об'єкта за різних збільшень  $M^x$  після апроксимації

Таблиця 1

Результати апроксимації геометричних спотворень РЕМ-зображень тест-сітки з  $r=1425$  ліній/мм

№ з/п	$M_{РЕМ}$	Дійсні знач. збільшень		$\Delta M_x, \%$	$\Delta M_y, \%$	До апроксимації		Після апроксим.	
		$M_x$	$M_y$			$m_{\Delta x}, мм$	$m_{\Delta y}, мм$	$m_{\delta x}, мм$	$m_{\delta y}, мм$
1	$1000^x$	1014,50	1005,58	+1,45	+0,56	1,254	0,525	0,134	0,122
2	$2500^x$	2544,65	2517,18	+1,79	+0,69	1,085	0,534	0,155	0,127
3	$5000^x$	5079,73	5024,04	+1,60	+0,48	1,186	0,586	0,257	0,239
4	$8000^x$	7927,84	7875,68	-0,90	-1,55	1,274	0,222	0,173	0,159
5	$10000^x$	9932,99	9832,54	-0,67	-1,67	1,289	0,906	0,211	0,219
6	$15000^x$	14862,42	14650,90	-0,92	-2,33	1,306	0,482	0,309	0,219
7	$20000^x$	19871,75	19491,75	-0,64	-2,54	2,179	1,260	0,347	0,307
8	$25000^x$	24943,48	24318,29	-0,23	-2,73	1,424	1,069	0,301	0,261

Таблиця 2

Точність вимірювання просторових координат точок мікроповерхонь для різних збільшень  $M^x$

	$1000^x$	$2500^x$	$5000^x$	$8000^x$	$10000^x$	$15000^x$	$20000^x$	$25000^x$
$3m_x^0 = 3m_y^0, мм$	0,280	0,280	0,280	0,280	0,280	0,280	0,280	0,280
$M_x = M_y, мкм$	0,280	0,112	0,056	0,035	0,028	0,019	0,014	0,011

Аналізуючи результати досліджень величин геометричних спотворень за вимірами цифрових знімків спеціальних тест-об'єктів (рис. 1), які наведені в табл. 1 у вигляді їх середньоквадратичних величин  $m_{dx}(мм)$ ,  $m_{dy}(мм)$ , можемо зауважити, що: абсолютні значення геометричних спотворень цифрових зображень в умовному масштабі їх вимірювання за програмою "Test-Measuring" достатньо великі, досягають максимальних величин до  $\pm 4$  мм відносно центральної точки знімка, якщо його розміри 338,56×253,92 мм. Характер цих спотворень наочно відображають *векторні діаграми* (рис. 2), що мають *спіралеподібний* вигляд, який суттєво не змінюється незалежно від зміни величини збільшення (масштабу) знімка у діапазоні від  $1000^x$  до  $25000^x$ .

Якщо звести ці знімки до розміру 120×90 мм, за якого масштаб знімків відповідає встановленому збільшенню на шкалі РЕМ, максимальні величини спотворень все ж сягають значень до  $\pm 1,5$  мм (до **15 пікселів**). Очевидно, що необхідно враховувати ці спотворення. Наші дослідження за допомогою програми "Polycalc" ще раз підтвердили ефективність апроксимації спотворень поліномом загального виду третього степеня. Результати досліджень наведено в табл. 1 в колонках значень середньоквадратичних похибок  $m_{dx}(мм)$ ,  $m_{dy}(мм)$  після їх апроксимації поліномом. Бачимо, що ці величини приблизно на порядок менші від початкових значень спотворень. Візуально залишкові величини геометричних спотворень ми також показали у вигляді векторних діаграм (див. рис. 3). Для знімків розміром 120×90 мм максимальні їхні значення не перевищують  $\pm 0,3$  мм, тобто трьох пікселів. Отже, поліноміальна апроксимація спотворень дає можливість приблизно на порядок підвищити точність визначення просторових координат точок досліджуваних різноманітних мікроповерхонь твердих тіл. У табл. 2 наведені абсолютні значення максимально можливих похибок в отриманні координат

$M_x = M_y = = 3m_{dx}^0/M_x^x = 3m_{dy}^0/M_y^x$  (мкм) : залежно від збільшення (масштабу) знімка їхні значення від **0,28 мкм**, якщо  $M=1000^x$  до **0,01 мкм**, якщо  $M=25000^x$ . Це дає можливість отримувати кількісні параметри мікроповерхонь твердих тіл на мікронному і субмікронному рівнях з високою точністю, що так важливо для сучасних нанотехнологій у виробництві.

На підставі виконаних досліджень можна зробити такі висновки.

### Висновки

1. Геометричні спотворення цифрових зображень, отриманих на РЕМ 106І вітчизняного виробництва (ВАТ "SELMІ" м. Суми), в діапазоні збільшень від  $1000^x$  до  $30000^x$  достатньо істотні й досягають максимальних значень від **1 до 1,5 мм** (приблизно від 10 до 15 пікселів). Візуально ці спотворення мають спіралеподібний характер, практично незалежно від величини збільшення, їхні значення зростають пропорційно до віддалі від центра знімка до його країв.

2. Підтверджена ефективність апроксимації геометричних спотворень РЕМ-зображень поліномом загального вигляду третього степеня, який дає змогу їх зменшувати у 5–10 разів.

3. РЕМ 106І можна вважати високотехнологічним растровим електронним мікроскопом, який дозволяє отримувати високоякісні цифрові зображення мікроповерхонь твердих тіл з порівняно незначними спотвореннями: лінійними (масштабними) в межах  $\pm 1-3\%$  і нелінійними (дисторсійними) – максимально до  $\pm 1,5$  мм за розмірів зображення 120×90 мм.

4. За допомогою гоніометричного столика в РЕМ можна отримувати стереопари дослідних мікроповерхонь твердих тіл, опрацювання яких на цифровій стереофотограмметричній станції (ЦФС) дає змогу отримувати їх просторові кількісні параметри з високою точністю:

від  $m_x = m_y = 0,1-0,2$  мкм,  $m_{h(z)} = 1-1,5$  мкм, якщо  $M=1000^x$ ;

до  $m_x=m_y=0,005-0,01$  мкм,  $m_{h(z)}=0,1-0,2$  мкм, якщо  $M=25000^x$ .

### Література

- Іванчук О.М. Методи оперативного фотограмметричного опрацювання знімків, отриманих на растрових електронних мікроскопах: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Львів, 2000. – 18 с.
- Іванчук О.М. Дослідження точності встановлення параметра "збільшення" РЕМ-зображень на растрових електронних мікроскопах // Сучасні досягнення геодезичної науки і виробництва. – Львів, Ліга Прес. – 2003. – С. 246–251.
- Іванчук О.М. Дослідження впливу змін параметрів РЕМ-знімання на величини та характер геометричних спотворень РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ "Hitachi S-800" // Геодезія, картографія і аерофотознімання: міжв. наук.-техн. зб. – Львів. – 2003. – № 63. – С. 145–152.
- Іванчук О. Структура та функції програмного комплексу "Dimicros" для РЕМ-зображень на цифровій фотограмметричній станції / Іванчук О., Хрупін І. // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів. – 2012. – Вип. І (23). – С. 193–197.
- Іванчук О. Дослідження точності визначення дійсних величин збільшення (масштабу) цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ JCM-5000 (NeoScope) фірми JEOL // Геодезія, картографія і аерознімання. – Львів. – 2013. – Вип. 76. – С. 80–84.
- Іванчук О. Дослідження величин геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ DSM-960A (Carl Zeiss, Німеччина) та точності їх врахування / Іванчук О., Барфельс Т., Геєр Я., Гегер В. // Геодезія, картографія і аерознімання. – Львів. – 2013. Вип. 78. – С. 120–126.
- Іванчук О.М. Дослідження геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ JCM-5000 (NeoScope), та їх апроксимація // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: гірничо-геологічна. – Донецьк, 2013. – Вип. 78. – С. 91–97.
- Іванчук О. Дослідження величин похибок збільшення (масштабу) цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ-106І (Суми, Україна), та точності їх визначення за допомогою спеціальних тест-об'єктів /

Иванчук О., Чекайло М. // Геодезія, картографія і аерознімання. – Львів. – 2014. – Вип. 79.

9. Калантаров Е.И. Фотограмметрическая калибровка электронных микроскопов / Калантаров Е.И., Сагындыкова М.Ж. // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотоизмерения. – 1983. – № 4. – С.76–80.

10. Мельник В.Н. Калибровка геометрических искажений РЭМ-снимков / Мельник В.Н., Соколов В.Н., Иванчук О.М., Тумская О.В., Шебашинов М.П. // Рук. деп. в ВИНТИ. – 1984. – № 528. – С.18.

11. Мельник В.М. Растрово-электронна стереомікрофракторафія: монографія / Мельник В.М., Шостак А.В. – Луцьк: Вежа, 2009. – 469 с.

12. Шостак А.В. Методи і моделі мікрофотограмметрії у прикладних наукових дослідженнях: автореф. дис... доктора. техн. наук. – Київ, 2012. – 28 с.

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

14. Burkhardt R. Untersuchungen zur kalibrirung eines Elektronen mikroskopes // Mitt. geod. Inst. Techn. Univ. Graz. – 1980. – №35.

15. Ghosh S. K. Photogrammetric calibration of a scanning electron microscope // Photogrammetria. – 1975. – V.31. – № 31. – P. 91–114.

16. Ghosh S. K., Nagaraja H. Scanning Electron Micrography and Phtogrammetry // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. – 1976.– Vol. 42. – № 5.– P.649–657.

#### Дослідження геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ-106 І (Суми, Україна)

О. Иванчук

Наведено результати досліджень геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ-106І в діапазоні збільшень від  $M=1000^x$  до  $M=25000^x$ . Після врахування порівняно незначних лінійних (масштабних) спотворень ( $\Delta M = \pm 3\%$ ) залишкові нелінійні спотворення геометрії залишаються ще суттєвими – до  $\pm 1,5$  мм ( $\pm 15$  пікселів) для зображень розміром  $120 \times 90$  мм. Методом поліноміальної апроксимації геометричні спотворення враховують, після чого їх залишкові величини не перевищують  $\pm 0,3$  мм ( $\pm 3$  піксели). Це дає змогу отримувати просторові кількісні параметри мікроповерхонь дослідних об'єктів з високою

точністю, зокрема, у разі збільшення (масштабу) зображень  $M=1000^x$ :  $m_x = m_y = 0,1-0,2$  мкм,  $m_{h(z)} = 1-1,5$  мкм, а при  $M=25000^x$  –  $m_x=m_y=0,005-0,01$  мкм,  $m_{h(z)}=0,1-0,2$  мкм.

#### Исследование геометрических искажений цифровых РЭМ-изображений, полученных на РЭМ-106 И (Сумы, Украина)

О. Иванчук

Приведены результаты исследований геометрических искажений цифровых РЭМ-изображений, полученных на РЕМ-106И в диапазоне увеличений от  $M=1000^x$  до  $M=25000^x$ . После учета относительно незначительных линейных (масштабных) искажений ( $\Delta M = \pm 3\%$ ) нелінійные искажения геометрии остаются еще существенными – до  $\pm 1,5$  мм ( $\pm 15$  пикселей) при размере зображений  $120 \times 90$  мм. Методом полиномиальной аппроксимации геометрические искажения учитывают, после чего их остаточные значения не превышают  $\pm 0,3$  мм ( $\pm 3$  пиксела). Это позволяет получать пространственные количественные параметры микроповерхностей исследовательских объектов с высокой точностью, в частности, при увеличении (масштабе) изображений  $M=1000^x$ :  $m_x = m_y = 0,1-0,2$  мкм,  $m_{h(z)} = 1-1,5$  мкм, а при  $M=25000^x$  –  $m_x=m_y=0,005-0,01$  мкм,  $m_{h(z)}=0,1-0,2$  мкм.

#### The study of geometric distortion of digital SEM images obtained at SEM-106 I (Sumy, Ukraine)

O. Ivanchuk

The results of these studies, geometric distortion of digital SEM images obtained are in SEM-106I increases ranging from  $M=1000$  h to  $M=25000$  h. After taking into account the relatively small linear (large-scale) distortions ( $\Delta M = \pm 3\%$ ), the residual nonlinear distortion geometry are still substantial – up to  $\pm 1,5$  mm ( $\pm 15$  pixels) for images of size  $120 \times 90$  mm. The method of polynomial approximation of geometric distortion into account, then their residual values do not exceed  $\pm 0,3$  mm ( $\pm 3$  pixels). It enables spatial parameters mikrosurface quantitative research objects with high accuracy, in particular by increasing the (scale) image of  $M=1000$  h :  $m_x = m_y = 0,1-0,2$  mkm,  $m_{h(z)} = 1-1,5$  mkm, and when  $M=25000$  h –  $m_x=m_y=0,005-0,01$  mkm,  $m_{h(z)}=0,1-0,2$  mkm.

## JURSE 2015

Joint Urban Remote Sensing Event  
30 March - 1 April 2015, Lausanne, Switzerland

[www.jurse2015.org](http://www.jurse2015.org)



**imagine**  
OPPORTUNITIES EVERYWHERE  
Geographic Information Expertise: Made in Europe

## 2<sup>nd</sup> EUROGI imaGIne Conference 2014

Geographic Information Expertise: Made in Europe

8 & 9 October 2014, Berlin, Germany

[www.imagine2014.eu/about-imagine-2014](http://www.imagine2014.eu/about-imagine-2014)