

На відміну від класичного представлення тут масштабний коефіцієнт дорівнює одиниці, оскільки базис знімання відомий.

**Задача 5.** Визначення взаємного положення обох камер та бази.

Згідно з поставленим завданням необхідно знайти 12 елементів зовнішнього орієнтування для обох камер. Для цього доцільно застосувати подвійну обернену фотограмметричну засічку з використанням формул наземної фотограмметрії. Для отримання шуканих параметрів необхідно мати тестовий полігон з оптимальною кількістю опорних точок. Мінімум це 3, проте для надійного розв'язку та об'єктивної оцінки точності треба 15–20 опорних точок, які б рівномірно покривали всю площину зображення.

**Висновки.** Як витікає з наведених і описаних математичних моделей спареного цифрового стереознімання, вибір систем координат та розв'язання основних фотограмметричних задач має свої специфічні можливості, які необхідно врахувати при аналітичному опрацюванні зображень. Результати практичних досліджень будуть описані в подальших публікаціях.

1. Ганьшин В. Н, Коськов Б.И., Зимин К.И. и др. *Геодезические работы в строительстве*. – М.: Стройиздат, 1975. – 406 с. 2. Дорожнинський О.Л., Тукай Р. *Фотограмметрія: Підручник*. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, 2008. – 332 с. 3. Дорожнинський О.Л. *Основи фотограмметрії: Підручник*. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, 2003. – 214 с. 4. Исследование и анализ отклонений главной точки снимка при фокусировании объектива камеры // *Геодезия и аэрофотосъемка*. – 1991. – С.89–95.

УДК 528.721.287:537.533.35

**О. Іванчук**

Національний університет “Львівська політехніка”

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ДІЙСНИХ ВЕЛИЧИН ЗБІЛЬШЕННЯ (МАСШТАБУ) ЦИФРОВИХ РЕМ-ЗОБРАЖЕНЬ, ОТРИМАНИХ НА РЕМ JCM-5000 (NEOSCOPE) ФІРМИ JEOL**

© Іванчук О., 2012

*С помощью измерений цифровых РЭМ-изображений специального тест-объекта с разрешением  $r=1425$  лин/мм, полученных на РЭМ JCM-5000 (NeoScope), определены их истинные увеличения (масштаб) вдоль осей  $x$  и  $y$  РЭМ-снимков в диапазоне увеличений РЭМ от  $1000x$  до  $40000x$  (крат). Установлено, что масштабные искажения цифровых РЭМ-изображений, полученных на этом типе РЭМ, не превышают  $\pm 1$  % независимо от величины увеличения и осей снимка.*

*Using measurements of digital SEM image of a special test object with a resolution of  $r = 1425$  lin/mm, obtained by SEM JCM-5000 (NeoScope), determined their actual increase (scale) along the axes  $x$  and  $y$ -SEM images in the range SEM increases from  $1000^x$  to  $40000^x$ . Found that large-scale distortion of digital SEM images obtained on this type of SEM does not exceed  $\pm 1$  %, regardless of size increase and make the picture.*

**Постановка проблеми.** В останні роки у наукових лабораторіях України появились сучасні растрові електронні мікроскопи (РЕМ), зокрема і відомої на світовому ринку РЕМ фірми JEOL (Японія). Наукові дослідження мікроповерхонь різноманітних дослідних об'єктів у високотехно-

логічних галузях виробництва (машинобудування, нанотехнології, мікроелектроніка тощо) потребують отримання кількісних параметрів цих поверхонь з високою точністю на мікронному і субмікронному рівнях. Тому важливою є проблема досліджень величин і характеру масштабних і геометричних спотворень, притаманних цифровим РЕМ-зображенням. Досліджень метричних характеристик цифрових РЕМ-зображень, отриманих на сучасному РЕМ JCM-5000 (NeoScope) фірми JEOL (Японія) в Україні ще не було. Отже, автор поставив перед собою завдання вирішити цю проблему і дати відповідні рекомендації дослідникам, які використовують цей мікроскоп.

**Зв'язок із важливими науковими і практичними завданнями.** Кафедра фотограмметрії та геоінформатики Інституту геодезії Національного університету “Львівська політехніка”, де автор працює, має значні наукові досягнення з розробки теорії та практики застосування сучасних цифрових методів стереофотограмметрії, зокрема і в дослідженнях об'єктів за допомогою растрових електронних мікроскопів. Одним із важливих напрямів наукової тематики кафедри є і розробка теорії та практики цифрової РЕМ-фотограмметрії.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій, присвячених розв'язанню цієї проблеми.** Технологія отримання кількісних параметрів мікроповерхонь будь-яких дослідних об'єктів за вимірами їх стереозображень, отриманих на РЕМ, передбачає обов'язкове дослідження метричних характеристик цих знімків. А саме – встановлення величин та характеру їх масштабних і геометричних спотворень, а також методів їх подальшого врахування. Найпростішими і водночас найефективнішими з них є методи апроксимації геометричних спотворень поліномами, зокрема поліномом загального виду третього ступеня [9].

Розв'язанням такого роду задач займалися і займаються науковці як за кордоном, так і в Україні. Зокрема, A. Boyde, R. Burkhardt, S.K. Ghosh, P. Howell, D.F. Maune, S. Murguy, H. Nagaraja, H.F. Ross [1, 2, 3, 4, 5], в Росії – Є.І. Калантаров, М.Ж. Сагиндікова, В.М. Соколов, М.П. Шебатінов [8, 9], в Україні – В.М. Мельник, В.Я. Фінковський, А.В. Шостак [9, 10, 11, 12] та інші.

**Невирішені частини загальної проблеми.** Такого роду сучасні растрові електронні мікроскопи з цифровим записом, як РЕМ JCM-5000 (NeoScope) фірми JEOL (Японія) ще ніколи до цього часу в Україні метрично не досліджувались. Передбачається подальше поширення такого типу мікроскопів в Україні, тому важливо знати метричні характеристики РЕМ-зображень, отриманих на них. Від цього, значною мірою, залежить точність встановлення кількісних характеристик дослідних мікроповерхонь у багатьох сучасних високотехнологічних галузях науки і виробництва, а отже, надійність і ефективність створюваних деталей, вузлів, механізмів, плат тощо.


**Постановка завдання.** Отримати цифрові РЕМ-зображення еталонного тест-об'єкта з роздільною здатністю  $\tau=1425$  лін/мм на РЕМ JCM-5000 (NeoScope) в діапазоні збільшень від  $1000^{\times}$  до  $40000^{\times}$  (крат). Встановити характер та величини масштабних і геометричних спотворень цих зображень за їх вимірами на цифровій фотограмметричній станції (ЦФС) з використанням пакета програм “Dimicros” [6].

## **Виклад основного матеріалу та результати досліджень**

### **1. Основні технічні характеристики РЕМ JCM-5000 (NeoScope)**

JCM-5000 – сучасний настільний растровий електронний мікроскоп, який дуже поширений у наукових лабораторіях та на виробництві в багатьох країнах світу, а тепер і в Україні. РЕМ має високу роздільну здатність, велику глибину фокусування, простий в користуванні, має невеликі габарити, вагу і порівняно невисоку вартість. Основні характеристики приладу наведені у табл. 1.

### Характеристики приладу

 <p>Рис. 1. PEM JCM-5000 (NeoScope)</p>	<b>Режими роботи</b>	високовакуумний режим, низьковакуумний режим
	<b>Прискорююча напруга</b>	5, 10 або 15 кВ
	<b>Діапазон збільшень</b>	від $10^x$ до $40\,000^x$ (крат)
	<b>Максимальний розмір зразка</b>	діаметр – до 70 мм, висота – до 50 мм
	<b>Катод</b>	W (вольфрам), касетного типу
	<b>Система відкачування повітря</b>	турбомолекулярний насос + ротаційний насос
	<b>Програмне забезпечення</b>	для MS Windows Vista
	<b>Формат запису файлів</b>	TIFF або JPEG
	<b>Вага приладу</b>	близько 85 кг
	<b>Розміри</b>	492 мм x 458 мм x 434 мм
	<b>Енергоспоживання</b>	не більше 1,1 кВА

### 2. Коротка характеристика тест-об'єкта

Для встановлення дійсних значень збільшень РЕМ-зображень був використаний тест-об'єкт, який являє собою так звану “голографічну ґратку” – рівномірно розміщеного на скляній пластині шару “напівпровідник-метал” у вигляді кулеподібних напівсфер (рис. 2). Технологія отримання матеріалу “напівпровідник-метал” була вперше запропонована у Київському інституті напівпровідників НАНУ в лабораторії проф. М.Т. Костишина і канд. техн. наук П.Ф. Романенка і використовувалась для записування голограм просторових об'єктів [7]. Було запропоновано ідею створення цього тест-об'єкта на цьому технологічному матеріалі, оскільки він дає змогу записувати зображення з високою роздільною здатністю – до 5000 елементів на мм. Так і було отримано цей тест-об'єкт під дією пучків лазерного випромінювання у вигляді регулярної матриці – сплаву срібла з напівпровідником – арсеном сірки ( $Ag-As_2S$ ) з різними роздільними здатностями, зокрема, 1370 лін/мм, 1425 лін/мм, 3530 лін/мм. Один з цих голографічних тест-об'єктів з розділенням 1425 лін/мм і був використаний для експерименту (див. рис. 2).

### 3. РЕМ-знімання

На РЕМ JCM-5000 (NeoScope) було отримано 12 знімків тест-об'єкта у цифровому форматі JPEG з фіксованими значеннями збільшень, встановлених на шкалі приладу:  $1000^x$ ,  $2000^x$ ,  $5000^x$ ,  $8000^x$ ,  $10000^x$ ,  $15000^x$ ,  $20000^x$ ,  $24000^x$ ,  $27000^x$ ,  $30000^x$ ,  $34000^x$ ,  $40000^x$ . Розміри РЕМ-зображень 117,76 мм x 99,36 мм (1280 x 1080 пікселів). Розмір піксела – 0,092 мм.

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

Вимірювання РЕМ-зображень тест-об'єкта виконувалось на цифровій фотограмметричній станції (ЦФС) в програмному середовищі “Dimicros” за програмою “Test-Measuring”. Вимірювання величин дійсних збільшень РЕМ-зображень тест-об'єкта виконувались тричі вздовж осей  $x$  і  $y$  знімка за схемою, наведеною у роботах [6]. Так були отримані середні значення збільшень і їх відхилення від встановлених на шкалі РЕМ. Результати експерименту наведені в табл. 1, 2.

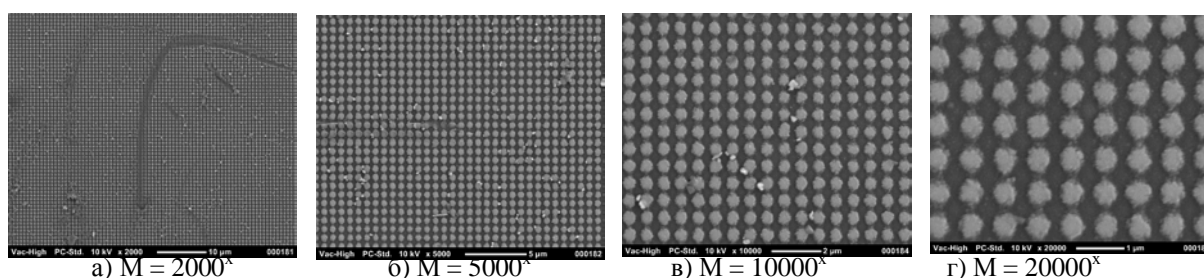


Рис. 2. Цифрові РЕМ-знімки тест-об'єкта з роздільною здатністю  $r = 1425$  лін/мм за різних збільшень  $M$

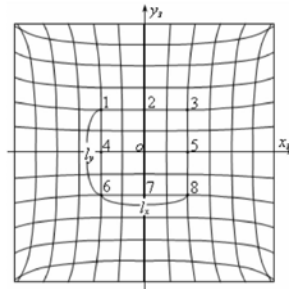


Рис. 3. Схема розташування точок під час калібрування збільшень РЕМ-зображень

Таблиця 1

**Виміряні збільшення вздовж осі x РЕМ-знімка та їх відхилення від встановлених на шкалі РЕМ**

№ з/п	$M_{x\text{ РЕМ}}$	$M_{x1}$	$M_{x2}$	$M_{x3}$	$M_{x\text{ ср}}$	$\Delta M_{x\text{ ср}}, \%$	$\Delta M_{x\text{ min}}, \%$	$\Delta M_{x\text{ max}}, \%$
1	1000 <sup>x</sup>	1007,88	1005,16	1002,44	1005,16	+0,52	+0,24	+0,79
2	2000 <sup>x</sup>	1994,02	1994,02	1999,45	1995,83	-0,21	-0,03	-0,30
3	5000 <sup>x</sup>	4966,03	4989,94	4966,03	4974,00	-0,52	-0,20	-0,68
4	8000 <sup>x</sup>	7921,74	7954,34	7954,34	7943,47	-0,71	-0,57	-0,98
5	10000 <sup>x</sup>	10019,00	10019,00	9953,80	9997,27	-0,03	+0,19	-0,46
6	15000 <sup>x</sup>	14908,96	14952,43	14887,23	14916,21	-0,56	-0,32	-0,75
7	20000 <sup>x</sup>	19885,86	19842,39	19820,66	19849,64	-0,75	-0,57	-0,90
8	24000 <sup>x</sup>	23863,03	23906,50	23841,30	23870,28	-0,54	-0,40	-0,66
9	27000 <sup>x</sup>	26949,14	26818,74	26949,14	26905,67	-0,35	-0,19	-0,67
10	30000 <sup>x</sup>	29904,85	29861,39	29883,12	29883,12	-0,39	-0,32	-0,46
11	34000 <sup>x</sup>	34142,82	34012,43	34142,82	34099,36	+0,29	+0,04	+0,42
12	40000 <sup>x</sup>	39902,12	40075,98	39989,05	39989,05	-0,03	-0,03	-0,25
Середнє відхилення середніх значень $\Delta M_{x\text{ ср}}$ від $M_{\text{РЕМ}}, \%$						<b> 0,41 </b>	<b> 0,26 </b>	<b> 0,61 </b>

Таблиця 2

**Виміряні збільшення вздовж осі y РЕМ-знімка та їх відхилення від встановлених на шкалі РЕМ**

№ з/п	$M_{y\text{ РЕМ}}$	$M_{y1}$	$M_{y2}$	$M_{y3}$	$M_{y\text{ ср}}$	$\Delta M_{y\text{ ср}}, \%$	$\Delta M_{y\text{ min}}, \%$	$\Delta M_{y\text{ max}}, \%$
1	1000 <sup>x</sup>	1007,88	1005,16	1007,88	1006,97	+0,70	+0,52	+0,79
2	2000 <sup>x</sup>	2004,89	2010,32	2004,89	2006,70	+0,34	+0,24	+0,52
3	5000 <sup>x</sup>	5020,36	5022,77	5020,36	5021,16	+0,42	+0,41	+0,46
4	8000 <sup>x</sup>	7997,81	7997,81	7997,81	7997,81	-0,03	-0,03	-0,03
5	10000 <sup>x</sup>	10062,46	10062,46	10040,73	10055,22	+0,55	+0,41	+0,62
6	15000 <sup>x</sup>	14974,16	15061,09	14974,16	15003,14	+0,02	+0,12	-0,41
7	20000 <sup>x</sup>	19907,59	19885,86	19907,59	19900,35	-0,50	-0,46	-0,57
8	24000 <sup>x</sup>	23754,37	23841,30	23797,83	23797,83	-0,84	-0,66	-1,02
9	27000 <sup>x</sup>	26797,01	26970,88	26905,68	26891,19	-0,40	-0,11	-0,75
10	30000 <sup>x</sup>	29904,85	29839,66	29839,66	29861,39	-0,46	-0,32	-0,54
11	34000 <sup>x</sup>	34099,36	33903,76	34034,16	34012,43	+0,04	+0,10	+0,29
12	40000 <sup>x</sup>	39945,58	39858,65	39858,65	39887,67	-0,28	-0,14	-0,35
Середнє відхилення середніх значень $\Delta M_{y\text{ ср}}$ від $M_{\text{РЕМ}}, \%$						<b> 0,38 </b>	<b> 0,29 </b>	<b> 0,53 </b>

**Висновки**

1. Дійсні величини збільшень (масштабу) РЕМ зображень, отриманих на РЕМ JCM-5000 (NeoScore), відхиляються від встановлених на шкалі РЕМ не більше ніж на  $\pm 1\%$  вздовж обох осей знімка, тобто в межах точності їх визначення за тест-об'єктом в усьому робочому діапазоні збільшень мікроскопа від  $1000^{\times}$  до  $40000^{\times}$  (крат).

2. РЕМ JCM-5000 (NeoScore) можна вважати надійним в метричному відношенні приладом, який не потребує постійного калібрування збільшень перед РЕМ-зніманням дослідних зразків.

3. Масштабні спотворення РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ JCM-5000 (NeoScore) не перевищують  $\pm 1\%$  від встановлених на шкалі РЕМ, незалежно від величини збільшення та осей знімка.

1. Boyde A., Ross H.F. *Photogrammetry and Scanning electron microscopy* // *Photogrammetric Record*. – 1975. – Vol.8. – №46. – P.408–457. 2. Burkhardt R. *Untersuchungen zur kalibrierung eines Elektronen mikroskopes* // *Mitt. geod. Inst. Techn. Univ. Graz*. – 1980. – № 35. 3. Ghosh S. K. *Photogrammetric calibration of a scanning electron microscope* // *Photogrammetria*. – 1975. – V.31. – №31. – P.91–114. 4. Ghosh S. K., Nagaraja H. *Scanning Electron Micrography and Phtogrammetry* // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. – 1976. – Vol.42. – № 5. – P.649–657. 5. Howell P. *A practical method for the correction of distortions in SEM photogrammetry* // *Proc. Of the Annual Scanning Electron Microscope Symposium. Chicago, Illinois*. – 1975. – P.199–206. 6. Іванчук О., Хрунін І. *Структура та функції програмного комплексу “Dimicros” для опрацювання РЕМ-зображень на цифровій фотограмметричній станції* // *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. – Львів, 2008. Вип. I(23). – С.193–197. 7. Костышин М.Т., Мустафин К.С. *Квантовая электроника*. – 1982. – Вып.23. – С.29–33. 8. Калантаров Е.И., Сагындыкова М.Ж. *Фотограмметрическая калибровка электронных микроскопов* // *Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка*. – 1983. – №4. – С.76–80. 9. Мельник В.Н., Соколов В.Н., Иванчук О.М., Тумская О.В., Шебатинов М.П. *Калибровка геометрических искажений РЭМ-снимков* // *Рук. деп. в ВИНТИ*. – 1984. – №528. – С. 18. 10. Мельник В.М. *Растрово-електронна стереомікрофрактографія: Монографія / Мельник В.М., Шостак А.В.* – Луцьк: Вежа, 2009. – 469 с. 11. Финковский В.Я., Мельник В.Н., Иванчук О.М. *К теории фотограмметрической обработки РЭМ-снимков* // *Геодезия и картография*. – 1984. – №2. – С.29–33. 12. Шостак А.В. *Методи і моделі мікрофотограмметрії у прикладних наукових дослідженнях: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук.* – К., 2012. – 28 с.