

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗМІН ПАРАМЕТРІВ РЕМ-ЗНІМАННЯ НА ВЕЛИЧИНИ ТА ХАРАКТЕР ГЕОМЕТРИЧНИХ СПОТВОРЕНЬ РЕМ-ЗОБРАЖЕНЬ, ОТРИМАНИХ НА РЕМ "HITACHI" S-800

©Іванчук О., 2003

В статті представлені результати численних досліджень величин і характеру геометричних спотворень РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ "Hitachi" S-800 при зміні параметрів РЕМ-знімання: збільшенні (масштабу) від $500\times$ до $50000\times$, кута нахилу гоніометричного столика від 0° до 10° і зміні його установки вздовж осі Z від $Z=14.0$ мм до $Z=16.0$ мм з інтервалом 0.5 мм. Установлено, що на краях РЕМ-знімки вони можуть досягати $1.5-2.0$ мм, а в центральній частині в радіусі 10 мм порівняно незначительні – $0.1-0.2$ мм. Спотворення мають систематичний характер (приблизно 90% її складової), вони симетричні відносно осей знімки і залишаються практично незмінними при значущих змінах параметрів РЕМ-знімання, що дозволяє їх легко апроксимувати поліномом загального виду 3-ї степені.

In the article the results of numerous researches of values and nature of geometrical distortions of the SEM-images obtained on SEM "Hitachi" S-800 when changes of parameters of SEM-surveying are presented: increases (scale) from $500\times$ up to $50000\times$, angles of tilt of the goniometric table from 0° up to 10° and changes of its positioning lengthwise axis Z from $Z = 14.0$ mm up to $Z = 16.0$ mm with an interval of 0.5 mm. It is established, that on edges of SEM-images they can reach $1.5-2.0$ mm, and on its central part in radius of 10 mm - $0.1-0.2$ mm that are rather minute. The distortions have systematic character (approximately 90% of its component), they are symmetric concerning image axes and remain practically invariable when considerable changes of parameters of SEM-surveying that allows to approximate them easily by a polynomial of a general view of the 3-rd degree.

Розробкою теорії та практики застосування стереофотограмметричних методів в растровій електронній мікроскопії (РЕМ), а також дослідженнями величин та характеру геометричних спотворень РЕМ-зображень, можливість їх врахування з метою підвищення точності отримання кількісних параметрів мікроповерхонь досліджуваних за допомогою РЕМ об'єктів займались в минулому цілий ряд вчених, зокрема за кордоном – А.Бойд, Браун, Р.Буркгард, С.Гош, Х.Нагарая та інші, колишні радянські, а нині російські вчені І.С.Гарелік, П.П.Гончаров, Є.І.Калантаров, М.Ж.Сагиндікова, В.М.Соколов та ін., а в Україні В.М.Мельник, В.Я.Фінковський, А.Я.Красовський, В.А.Степаненко, А.В.Шостак та інші. Проте серед них найбільш вагомий вклад в розробку теорії та практики РЕМ-стереофотограмметрії вніс відомий український вчений професор Мельник В.М. [7]. Актуальність і важливість досліджень в галузі РЕМ-стереофотограмметрії в наш час обумовлена підвищенням вимог до якості сучасних матеріалів, насамперед, в комп'ютерній та теле- і радіокомунікаційній індустрії, потребою їх подальшої мініатюризації та підвищення функціональних можливостей. А отримувати кількісні характеристики мікроповерхонь цих матеріалів на різних етапах технологічного процесу їх виготовлення можна лише за допомогою растрових електронних мікроскопів. Незамінимі РЕМ і при сучасних наукових дослідженнях в медицині, біології, геології, кристалографії та інших галузях наук.

Дійсні значення збільшень (масштаб) РЕМ-зображень можна визначити лише за допомогою спеціальних тест-сіток [1]. Проте, знаючи лише дійсні величини збільшень РЕМ вздовж координатних осей x, y РЕМ-знімка M_x і M_y , ми тим самим можемо врахувати лише його масштабні спотворення. Але врахувавши лише масштабну складову геометричних спотворень РЕМ-фотознімка, необхідно визначити і врахувати залишкову дисторсійну його складову, причиною якої є неоднорідність лінійного відображення геометрії поверхні сканування в різних її ділянках, похибки котушок розгортки при формуванні зображення на екрані електронно-променевої трубки РЕМ, кривизна поверхні самого екрану, дисторсія оптики фотоапарату, яким з екрану перефотографовують РЕМ-зображення та деформація самої фотоплівки. А оскільки ми в Україні поки що ведемо кількісну обробку зображень мікроповерхні об'єктів за їх РЕМ-фотознімками (цифрових РЕМ за

нашою інформацією в Україні ще немає), то нас цікавить саме кінцеве сумарне їх геометричне спотворення, зафіксоване на фотоплівці. Дослідження величин дисторсійної складової геометричних спотворень РЕМ-зображень можна виконати лише за вимірами РЕМ-знімків еталонних тест-сіток. Величини спотворень Δx , Δy визначаємо рівномірно по всьому полю РЕМ-знімка шляхом порівняння вимірених спотворених координат точок-перехресть ліній тест-сітки $x_{\text{вим}}, y_{\text{вим}}$ з їх істинними значеннями $x_{\text{іст}}, y_{\text{іст}}$:

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= x_{\text{вим}} - x_{\text{іст}}, \\ \Delta y &= y_{\text{вим}} - y_{\text{іст}}, \\ x_{\text{іст}} &= k_{x_i} \cdot a \cdot M_x, \\ y_{\text{іст}} &= k_{y_i} \cdot a \cdot M_y, \\ a &= \frac{1}{r}. \end{aligned} \right\} (1)$$

Тут a – розмір елементарної клітинки тест-сітки, мм;

r – роздільна здатність тест-сітки, лін/мм;

M_x, M_y – збільшення (масштаби) РЕМ-знімків вздовж координатних осей x, y , крат;

k_x, k_y – кількість елементарних клітинок до i -тової точки вимірювання (перехрестя ліній тест-сітки) відносно початкової (центральної) точки РЕМ-знімка, відповідно, вздовж його координатних осей x, y .

Проте важливо дослідити не лише абсолютні значення та характер величин геометричних спотворень РЕМ-знімків, отриманих на тому чи іншому мікроскопі, але й динаміку цих змін в залежності від:

а) зміни масштабу (збільшення) РЕМ-знімка;

б) зміни кута нахилу гоніометричного столика при одній і тій же величині збільшення ($M = \text{Const}$);

в) зміни висоти (робочої відстані) гоніометричного столика вздовж осі Z приладу при $M = \text{Const}$.

1. Дослідження впливу зміни параметрів РЕМ-знімання на величини та характер геометричних спотворень РЕМ-зображень.

1.1. Дослідження впливу змін масштабу (збільшення) РЕМ-знімка на його геометричні спотворення.

Для отримання відповіді на це питання були отримані РЕМ-знімки тест-сіток в діапазоні збільшень від $500\times$ до $50000\times$ на РЕМ "Hitachi" S-800.

Вимірювання РЕМ-знімків виконувалось на стереокомпараторі Steko 1818. Точність вимірювання координат точок перехресть ліній тест-сіток складала $m_{x,y} = 0.02 \pm 0.05$ мм в залежності від масштабу (збільшення) РЕМ-зображення – чим крупніший масштаб знімка, тим нижча точність його вимірювання внаслідок погіршення метричних характеристик зображення. За визначеними величинами геометричних спотворень $\Delta x, \Delta y$ у 70-100 точках на кожному з РЕМ-знімків тест-сіток будувались векторні діаграми спотворень, які за браком місця в цій статті не приводяться.

Числовий і візуальний аналіз малюнків векторних діаграм геометричних спотворень РЕМ-знімків дозволяє нам зробити наступні висновки:

1). величини геометричних спотворень РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ "Hitachi" S-800, нелінійно зростають пропорційно відстані від центру знімка, зокрема в радіусі 10-15 мм від центру вони незначні, в межах 0.1 ± 0.2 мм, а ближче до країв знімка досягають значень від 1.0 до 2.0 мм, неврахування яких приводить до значного погіршення точності вимірів і тому є недопустимим;

2). геометричні спотворення мають, як правило, подушкоподібну форму і містять складові лінійної, радіальної та спіральної частини дисторсії;

3). величини геометричних спотворень РЕМ-зображень даного типу РЕМ мають систематичний характер, суттєво не залежать від масштабу (збільшення), є стабільними впродовж тривалого часу (місяць) і тому можуть бути легко враховані.

1.2. Дослідження впливу зміни кута нахилу гоніометричного столика РЕМ на величини та характер геометричних спотворень РЕМ-знімків.

Для даного дослідження нами було отримано на РЕМ "Hitachi" S-800 5 знімків тест-сітки з роздільною здатністю 200 лін/мм при кутах позовжнього нахилу гоніометричного столика $\alpha = 0^\circ, 4^\circ, 6^\circ, 8^\circ, 10^\circ$ та постійних збільшеннях $M_1 = 1000\times$ та $M_2 = 3000\times$.

Вимірювання координат точок (перехресть) тест-сітки (по 99 точок на кожному РЕМ-знімку) велись на стереокомпараторі Steko 1818 з точністю $m_{x,y} \approx 0.02 \div 0.03$ мм. За визначеними величинами геометричних спотворень Δx , Δy будувались векторні діаграми, які внаслідок обмежень об'єму статті тут не приводяться. Внаслідок ортогонального сканування поверхні тест-сітки при послідовних нахилах столика на кути α відстані між лініями тест-сітки вздовж осі x (абсциси) знімка зменшуються пропорційно величині кута нахилу, а ординати при цьому залишаються незмінними, тобто

$$\left. \begin{aligned} x_i &= x_i^0 \cdot \cos \alpha, \\ y_i &= y_i^0. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

де x_i , y_i – координати точок на нахиленому знімку,

x_i^0 , y_i^0 – координати цих же точок на горизонтальному знімку при $\alpha=0^\circ$

α – кут нахилу гоніометричного столика.

Візуальне порівняння рисунків векторних діаграм геометричних спотворень РЕМ-знімків та їх числових значень наглядно виявило їх подібність між собою, як за формою так і за величинами, що дало нам можливість зробити висновок про те, що вони суттєво не залежать від зміни кута нахилу гоніометричного столика в межах від 0° до 10° . Таким чином, при кількісній обробці вимірів РЕМ-стереопар геометричні спотворення знімків достатньо враховувати лише за вимірами РЕМ-знімка тест-сітки при $\alpha=0^\circ$.

1.3. Дослідження впливу зміни положення (висоти) гоніометричного столика вздовж осі Z РЕМ на величини та характер геометричних спотворень РЕМ-знімків.

Дані дослідження виконані не випадково. Оскільки тест-сітки за формою плоскі, то виникає питання - чи можна характер і величини геометричних спотворень РЕМ-зображень, визначених за знімками плоских тест-сіток, вважати приблизно такими ж, як і спотворення РЕМ-знімків об'ємних поверхонь дослідних об'єктів. Якщо це так, то й відповідно їх враховувати і отримувати просторові кількісні параметри мікроповерхонь з високою точністю мінімально спотвореними та наближеними до дійсних величин. Бо лише дійсна кількісна інформація дає можливість правильно інтерпретувати технологічні процеси обробки поверхонь, виявляти причини деформацій, ерозій і т.п., а отже вдосконалювати технології, підвищувати ефективність науки та виробництва.

Для того, щоб ствердно відповісти на поставлене запитання, насамперед, необхідно, щоби РЕМ-знімки тест-сітки і об'єкта дослідження були отримані при однакових умовах РЕМ-знімання, і щоби їхні поверхні були приблизно на одному горизонтальному рівні в межах $\pm 1 \div 2$ мм.

Для підтвердження вищесказаного нами були отримані 5 РЕМ-знімків тест-сітки з роздільною здатністю 200 лін/мм при постійному збільшенні $M=1000\times$, але при різних положеннях (робочих відстанях) гоніометричного столика вздовж осі Z від $Z=14.0$ мм до $Z=16.0$ мм з інтервалом $\Delta Z=0.5$ мм. Такий перепад висот вибраний не випадково, оскільки поверхонь об'єктів з більшим ніж у 2 мм перепадом висот мікрорельєфу в межах ділянки сканування просто не може бути. Для прикладу, досліджена нами поверхня лесового ґрунту при $M=1000\times$ мала максимальний перепад висот $\Delta h \approx 25 \mu\text{м}$ (0.025 мм) в межах ділянки сканування $0.1 \times 0.1 \text{ мм}$.

РЕМ-знімки вимірювались на СК Steko 1818, потім обчислювались величини геометричних спотворень $\Delta x, \Delta y$ за формулами (1) і за їх значеннями будувались векторні діаграми спотворень, які тут не приводяться.

Аналіз числових значень величин геометричних спотворень, а також візуальне порівняння характеру і величин векторних діаграм дало нам право зробити висновок, що величини і характер геометричних спотворень РЕМ-знімків тест-сітки, отриманих при різних положеннях (висотах) гоніометричного столика вздовж осі Z приладу в межах $\Delta Z=2$ мм при $M=\text{const}$ суттєво не змінюються, мають систематичний характер і тому їх можна використовувати для врахування спотворень при кількісній обробці РЕМ-знімків дослідних зразків.

Підсумовуючи дослідження геометричних спотворень РЕМ-знімків можна зробити наступні узагальнені висновки:

1) величини та характер геометричних спотворень РЕМ-знімків залежать, насамперед, від технічних параметрів роботи усіх систем формування зображення в растровому електронному мікроскопі, і вони є виключно індивідуальними для кожного з них та можуть змінюватися в процесі експлуатації РЕМ;

2) геометричні спотворення РЕМ-знімків, отриманих на переважній більшості РЕМ за умови добре відюстованих систем отримання зображення, розподіляються наступним чином: в центральній частині знімка в радіусі 10-15 мм від центру спотворення незначні, в межах 0.1÷0.2 мм, а далі вони нелінійно зростають, досягаючи величин 0.5÷2.5 мм на краях знімка;

3) величини і характер спотворень поля РЕМ-знімка для кожного типу РЕМ індивідуальні, проте мають, як правило, систематичний характер і суттєво не залежать від зміни величини збільшення (масштабу), кута нахилу столика гоніометра та положення (робочої відстані) столика вздовж осі Z при РЕМ-зніманні, а тому легко можуть бути враховані;

4) РЕМ можна розглядати як стабільно працюючі системи, проте в процесі експлуатації їх необхідно періодично, не рідше 1 разу в місяць перевіряти за допомогою різноманітних еталонних тест-об'єктів;

5) метричні та фотографічні властивості РЕМ-знімків поступаються знімкам, отриманим оптичними фотокамерами, проте дозволяють виконувати вимірювання координат точок з точністю 0,02÷0,1мм в залежності від типу РЕМ та параметрів РЕМ-знімання в широкому діапазоні збільшень від 50^x до 150000^x.

2. Апроксимація геометричних спотворень РЕМ-знімків поліномами.

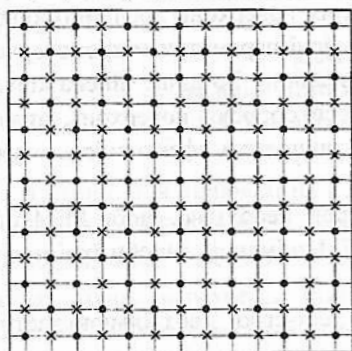
Для врахування геометричних спотворень РЕМ-знімків нами досліджувались ряд функцій поліноміального виду:

$$\Delta_{x,y} = F(x,y) = \sum_{k=0}^n \sum_{l=0}^{n-k} a_{kl} \cdot x^k \cdot y^l, \quad (3)$$

де Δ_x, Δ_y - поправки у виміряні координати точок x, y ,

n - порядок апроксимуючого поліному,

a_{kl} - коефіцієнти, що визначаються в процесі калібрування за вимірами точок - перехресть ліній тест-сітки.



- - "точки розв'язку";
- × - "контрольні точки"

Рис. 1. Схема розміщення точок вимірювання тест-сітки.

Знаходження функції розподілу поправок $F(x,y)$ у виміряні координати точок x, y проводиться у два етапа. На першому етапі, за відомими значеннями $\Delta_{x_{іст}}, \Delta_{y_{іст}}$ у N - точках ("точки розв'язку", див. рис.2.12), розміщених рівномірно (в шаховому порядку) у вузлах перехресть тест-сітки, знаходимо коефіцієнти a_{kl} функції поправок $F(x,y)$.

На другому етапі, за відомими значеннями коефіцієнтів полінома a_{kl} знаходимо поправки Δ_x, Δ_y у виміряні координати x, y контрольних точок, істинні координати яких нам відомі. Ефективність апроксимації геометричних спотворень поліномом визначається величинами залишкових похибок δ_x, δ_y на контрольних точках тест-сітки:

$$\left. \begin{aligned} \delta_x &= (x_{вим} + \Delta_x) - x_{іст}, \\ \delta_y &= (y_{вим} + \Delta_y) - y_{іст}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Система рівнянь для визначення невідомих коефіцієнтів полінома a_{kl}, b_{kl} у вигляді векторів $U_{x,y}$ в матричній формі має вигляд:

$$\left. \begin{aligned} [\Delta_x] &= [A_x] \cdot [U_x], \\ [\Delta_y] &= [A_y] \cdot [U_y]. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

де для полінома загального виду:

$$\left. \begin{aligned} [A_x] = [A_y] &= \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1 y_1 & x_1^2 & y_1^2 & x_1^3 & x_1^2 y_1 & x_1 y_1^2 & y_1^3 & \dots & y_1^n \\ 1 & x_2 & y_2 & x_2 y_2 & x_2^2 & y_2^2 & x_2^3 & x_2^2 y_2 & x_2 y_2^2 & y_2^3 & \dots & y_2^n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_N & y_N & x_N y_N & x_N^2 & y_N^2 & x_N^3 & x_N^2 y_N & x_N y_N^2 & y_N^3 & \dots & y_N^n \end{bmatrix}, \\ [U_x^T] &= [a_0 \ a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4 \ a_5 \ a_6 \ a_7 \ a_8 \ a_9 \ \dots \ a_k], \\ [U_y^T] &= [b_0 \ b_1 \ b_2 \ b_3 \ b_4 \ b_5 \ b_6 \ b_7 \ b_8 \ b_9 \ \dots \ b_k]. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

У формулах (6)

N - кількість точок розв'язку,

n - степінь апроксимуючого поліному,

k - кількість членів апроксимуючого поліному.

З розв'язку системи рівнянь (5) маємо:

$$\left. \begin{aligned} [U_x] &= [A_x \cdot A_x^T]^{-1} \cdot [\Delta x] \cdot A_x^T, \\ [U_y] &= [A_y \cdot A_y^T]^{-1} \cdot [\Delta y] \cdot A_y^T. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Відомо [3], що число опорних точок, за якими визначаються невідомі коефіцієнти апроксимуючого поліному степені n , повинно бути не менше, ніж

$$t = C_{n+2}^n = \frac{1}{2} (n+1) \cdot (n+2) \quad (8)$$

У випадку, коли $N > t$ задача знаходження невідомих коефіцієнтів розв'язується за способом найменших квадратів. Експериментально доведено [2, 3, 5], що для ефективної апроксимації геометричних спотворень РЕМ-знімків необхідно вимірювати 40-60 точок перехресть тест-сіток рівномірно по всьому полю РЕМ-знімка. Збільшення ж кількості вимірних точок не приводить до збільшення точності апроксимації.

Окрім полінома загального виду (6) нами досліджувались і інші. Так в ряді робіт [3, 4], пропонувалось враховувати спотворення РЕМ-знімків поліномами (9), у яких за основу взяті поліноми, запропоновані Brown з додаванням до них членів з коефіцієнтами s_k , які за думкою [7] мали б враховувати анізотропну (спіральну) дисторсію. В матричній формі поліноми Brown'a мають вигляд:

$$\left. \begin{aligned} [A] &= \begin{bmatrix} xr^2 & xr^4 & xr^6 & (r^2 + 2x^2) & 2xy & yr & yr^2 & yr^3 & yr^4 & yr^5 & yr^6 \\ yr^2 & yr^4 & yr^6 & (r^2 + 2y^2) & 2xy & xr & xr^2 & xr^3 & xr^4 & xr^5 & xr^6 \end{bmatrix}, \\ [U^T] &= [k_1 \quad k_2 \quad k_3 \quad p_1 \quad p_2 \quad s_1 \quad s_2 \quad s_3 \quad s_4 \quad s_5 \quad s_6], \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

а в явній формі:

$$\begin{aligned} \Delta x &= x(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + [p_1(r^2 + 2x^2) + 2p_2 xy] + y(s_1 r + s_2 r^2 + s_3 r^3 + s_4 r^4 + s_5 r^5 + s_6 r^6) \\ \Delta y &= y(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + [p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2 xy] + x(s_1 r + s_2 r^2 + s_3 r^3 + s_4 r^4 + s_5 r^5 + s_6 r^6) \end{aligned}$$

де
$$r = \sqrt{x^2 + y^2}.$$

Для досліджень був також взятий поліном з 4-х членів, а саме частина поліному загального виду, його $6^{\text{й}} + 10^{\text{й}}$ члени, які для апроксимації спіральної дисторсії запропонував Ghosh S. [9]:

- в матричній формі:

$$\left. \begin{aligned} [A] &= \begin{bmatrix} x^3 & 0 & x^2 y & 0 & xy^2 & 0 & y^3 & 0 \\ 0 & x^3 & 0 & x^2 y & 0 & xy^2 & 0 & y^3 \end{bmatrix}, \\ [U^T] &= [a_1 \quad b_1 \quad a_2 \quad b_2 \quad a_3 \quad b_3 \quad a_4 \quad b_4]. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

- в явній формі:

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= a_1 x^3 + a_2 x^2 y + a_3 xy^2 + a_4 y^3, \\ \Delta y &= b_1 x^3 + b_2 x^2 y + b_3 xy^2 + b_4 y^3. \end{aligned} \right\} \quad (10a)$$

При великих збільшеннях, внаслідок обмеженого фіксованого значення роздільної здатності тест-сітки, може виявитись на знімку лише незначна кількість еталонних ліній і відповідно точок, за якими ми калібруємо геометричні спотворення РЕМ-знімка (для прикладу лише 10-20 точок, замість 40-60). В такому випадку необхідно використовувати поліноми з мінімально можливою кількістю членів, проте щоб і вони були ефективними для апроксимації спотворень знімка. Нами був проведений експеримент по встановленню тих членів полінома загального виду, які найбільш суттєво зменшують залишкові похибки РЕМ-знімка після апроксимації. Виявилось, що таких членів 6:

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 xy + a_4 x^2 + a_5 x^2 y, \\ \Delta y &= b_0 + b_1 x + b_2 y + b_3 xy + b_4 x^2 + b_5 x^2 y. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Цей поліном отримав назву скороченого або в умовних символах - DS.

Дані дослідження проводились на РЕМ-знімках, отриманих на РЕМ "Hitachi" S 800. Можливо, для інших марок РЕМ поліном (11) може мати дещо інший вигляд.

Відповідно до викладеної теорії апроксимації геометричних спотворень РЕМ-знімків поліномами, проф.В.М.Мельником розроблений алгоритм розв'язання цієї задачі, реалізований у програмі "DISTOR" доц., к.т.н. Тумською О. В. Автором в алгоритм і програму було внесено ряд змін і доповнень, а також виконано її відлагодження.

2.1. Аналіз результатів апроксимації поліномами геометричних спотворень РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ "Hitachi" S-800 (Японія).

Даний РЕМ знаходиться у МДУ ім.М.Ломоносова (Москва, Росія). За сприяння проф.Соколова В.М. нам вдалось отримати і дослідити РЕМ- зображення тест-сіток з різними роздільними здатностями в широкому діапазоні параметрів РЕМ-знімання. Так, зокрема, були отримані РЕМ-знімки при змінах збільшень на шкалі РЕМ від $500\times$ до $50000\times$, змінах кута нахилу гоніометричного столика від 0° до 10° з інтервалом 2° та змінах робочих відстаней гоніометра відносно апертурної лінзи (вздовж осі Z) від 14.0 мм до 16.0 мм з інтервалом 0.5 мм. Мета цих досліджень і параметри вимірювань РЕМ-знімків на стереокомпараторі більш детально нами описані у п.1.1-1.3, де приведені висновки щодо їх характеру, величин і залежності від тих чи інших параметрів РЕМ-знімання. Численні результати вимірювань РЕМ-зображень на СК оброблялись нами за програмою "Distor" на різних типах ЕОМ та ПК впродовж більш як 10 років. Основні найбільш характерні результати апроксимації поліномами 4-х типів геометричних спотворень РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ "Hitachi" S-800 при різних параметрах РЕМ-знімання приведені нами в табл.1. Аналіз цих результатів дозволяє нам зробити наступні висновки:

- 1) середні квадратичні величини геометричних спотворень РЕМ-зображень значні - від ~ 300 до ~ 800 мкм; абсолютні їх значення на краях РЕМ-знімка можуть досягати до 2 мм;
- 2) підтверджена ефективність апроксимації спотворень поліномами загального виду 3-ї степені (10 членів) та його скороченим різновидом, який складається з 6-ти членів. Залишкові середні квадратичні похибки на контрольних точках після апроксимації цими поліномами на порядок менші - в межах $30\div 70$ мкм, причому ефективність апроксимації більш коротким поліном ($n=6$) приблизно така ж, як і повним 3-ї степені ($n=10$), що робить його використання незамінним при обмеженій кількості контрольних точок на РЕМ-зображеннях тест-сіток при великих збільшеннях ($M>25000\times$);
- 3) поліном, запропонований Brown для апроксимації геометричних спотворень досліджених типів РЕМ менш ефективний, ніж поліном загального виду, проте і він апроксимує спотворення до залишкових середніх квадратичних величин порядку $100\div 250$ мкм;
- 4) кубічні члени полінома загального виду, запропоновані Ghosh [9] для апроксимації спіральної складової дисторсійних спотворень, підтвердили ефективність їх використання. Як бачимо із результатів, приведених у табл.1, даний тип спотворень притаманний РЕМ "Hitachi" і вони досягають середніх квадратичних величин $350\div 600$ мкм (в абсолютних значеннях до 1500 мкм), що становить 50-70% сумарних спотворень;
- 5) розподіл спотворень за величинами до їх апроксимації переважно рівномірний і симетричний за знаком (в абсолютних значеннях від -1.5 мм до $+1.5$ мм) з перевагою кількості спотворень з відносно незначними величинами (0.1-0.2 мм) в центральній частині РЕМ-знімка в радіусі $r=15$ мм від його центру. Величини спотворень після апроксимації в межах від -0.3 мм до $+0.3$ мм і вони підпорядковані нормальному закону розподілу;
- 6) спотворення мають систематичний характер, і їх форма та величини суттєво не залежать від параметрів РЕМ-знімання, а лише від роботи всіх систем РЕМ, які формують зображення. Спостерігається відносно незначне збільшення середніх квадратичних величин спотворень (у 1.2-1.5 раза) при збільшенні масштабу зображення від $5000\times$ до $50000\times$. Випадкова складова спотворень, зумовлена змінами режимів РЕМ-знімання та плином часу не переважає $\pm 10\%$ від їх абсолютних значень;
- 7). РЕМ "Hitachi" S-800 можна розглядати як стабільно працюючу систему впродовж значного відрізка часу (до одного місяця) за умови збереження технологічних режимів його експлуатації.

Таблиця 1

Результати апроксимації геометричних спотворень РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ "Hitachi" S-800, поліномами різних видів при різних параметрах РЕМ-знімання

№п/п	Висота столі-ка Zмм	Кут нахилу α°, M^*	Дійсні Збільшення РЕМ-знімків		Ср.кв.спотвор. на контр.точ. до апроксим.		Ср.кв.спотворення після їх апроксимації поліномами									
			M_x , крат	M_y , крат	$m_{дк}$, МКМ	$m_{фв}$, МКМ	Загальн. виду $n=10$		Brown'a $n=11$		Ghosh'a $n=4$		Скороченим $n=6$			
							$m_{\delta x}$, МКМ	$m_{\delta y}$, МКМ	$m_{\delta x}$, МКМ	$m_{\delta y}$, МКМ	$m_{\delta x}$, МКМ	$m_{\delta y}$, МКМ	$m_{\delta x}$, МКМ	$m_{\delta y}$, МКМ		
1	14.0	597.5	608.5	493.7	642.3	39.8	45.5	110.2	109.8	92.9	127.3	61.4	48.9			
2	14.5	603.8	611.7	541.9	632.1	78.0	32.0	147.0	116.9	113.5	168.6	69.2	36.5			
3	15.0	611.7	621.6	791.0	843.1	72.5	32.9	108.4	128.8	162.1	244.5	76.9	32.9			
4	15.5	612.6	619.4	809.8	818.2	50.7	35.1	118.2	123.9	183.8	229.9	58.1	33.8			
5	16.0	608.6	620.8	742.5	793.5	48.9	27.4	116.4	124.5	141.2	231.4	52.7	29.1			
1	$\alpha=0^\circ$	610.4	617.5	490.4	713.7	41.3	64.0	120.6	126.7	136.7	192.6	40.8	57.0			
2	$\alpha=4^\circ$	606.3	615.2	512.7	695.2	47.4	57.5	115.4	117.5	143.5	201.4	47.5	59.1			
3	$\alpha=6^\circ$	607.8	618.4	648.5	748.4	51.2	44.3	112.7	124.8	156.8	220.6	54.4	52.9			
4	$\alpha=8^\circ$	605.1	616.7	715.4	815.2	54.9	55.4	109.9	118.4	148.7	187.9	56.6	58.7			
5	$\alpha=10^\circ$	604.7	619.1	573.5	721.8	43.7	60.6	113.3	121.7	171.3	196.1	45.2	62.3			
1	3000*	1720.0	1750.2	519.6	394.0	70.6	64.5	111.6	303.0	83.1	134.4	80.9	57.7			
2	5000*	2883.5	2929.2	460.3	398.8	34.2	25.1	111.5	146.1	77.3	116.9	55.2	27.9			
3	10000*	5697.4	5859.8	559.6	319.9	55.1	63.9	130.1	127.4	108.1	191.8	79.8	64.8			
4	20000*	11400.0	11650.0	583.4	465.2	115.3	88.5	157.4	213.6	243.7	236.3	132.8	88.6			
5	25000*	14300.0	14446.0	487.8	458.6	115.0	107.1	251.6	241.7	293.6	255.8	138.6	94.3			

Література

1. Іванчук О.М. Методи оперативного фотограмметричного опрацювання знімків, отриманих на растрових електронних мікроскопах: Автореф. дис...канд. техн. наук.-Львів.-2000.- 18 с.
2. Мельник В.Н., Любимов И.Н. Метрические свойства растровых электронномикроскопических снимков // Заводская лаборатория.-1977.-№3.-С.288-291.
3. Мельник В.Н., Соколов В.Н., Иванчук О.М., Тумская О.В., Шебастинов М.П. Калибровка геометрических искажений РЭМ-снимков // Рук. деп. в ВИНТИ.-1984.-№528.-С.18.
4. Мельник В.Н., Соколов В.Н., Шебастинов М.П., Иванчук О.М. Анализ погрешностей стереоизмерений в растровой электронной микроскопии // Изв. АН СССР. Сер. физическая.-1987.-№3.-С.468-474.
5. Мельник В.Н., Иванчук О.М., Максимюк Ю.Й. Калибровка геометрических искажений РЭМ-снимков // Геодезия и фотограмметрия.-Ростов н/Д : Рост.инж.-строит.ин-т.-1990.-С.37-44.
6. Мельник В.Н., Соколов В.Н. Фрактальная и стереометрическая оценки РЭМ-изображений // Изв. РАН. Сер.физическая.-1993.-№8.-С.99-105.
7. Мельник В.М. Теорія і практика фотограмметричних методів в електронно-мікроскопічних дослідженнях: Автореф. дис...докт. техн. наук.-Львів.-1995.- 51 с.
8. Finkovski V.J., Melnik V.N. Investigation of the raster electronic microstereophotogrammetric survey accuracy // Proc. XIII the Congres of the Internat. Soc. Photogrammetry. Helsinki.-1976.-P.1-10.
9. Ghosh S. K., Nagaraja H. Scanning Electron Micrography and Phtogrammetry // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing.- 1976.-Vol.42.-№5.-P.649-657.