

МЕТОД КОМПЕНСАЦІЇ ПРОСТОРОВОЇ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ПРИ ВИМІРЮВАННІ У НАНОМЕТРОВОМУ ДІАПАЗОНІ

В статті проведено аналіз основних дестабілізуючих факторів, які є причиною виникнення дрейфу при проведенні вимірювань скануючим зондовим мікроскопом (СЗМ) у нанометровому діапазоні. Визначено, що тепловий дрейф є основною причиною просторової невизначеності в механічній системі СЗМ, оскільки внаслідок теплового розширення та стиснення може спостерігатися зміщення зонда СЗМ або зразка без застосування будь-якої рушійної напруги до п'єзоелектричного приводного механізму. Встановлено, що тепловий дрейф може мати значний вплив на достовірність отримання вимірювальних результатів у вигляді цифрового зображення, оскільки значно спотворює положення наноб'єкту протягом послідовного сканування. Розроблено методи для компенсації просторової невизначеності СЗМ та його п'єзоелектричного приводного механізму, а саме: гістерезису, повзучості і теплового дрейфу. Доведено, що гістерезис можливо зменшити, проводячи сканування в одному напрямку, а для усунення повзучості рекомендовано робити паузи у кілька хвилин після кожного великого руху сканування. Доведено, що дрейф у z-напрямку може розглядатися як некорельована величину до площини ху і можливо усунути перетворенням оригінальних цифрових зображень на градієнтні. Експерименти показали, що використання методу фазової кореляції для вимірювання зміщення двох градієнтних зображень є більш ефективним, ніж використання вихідних зображень. Крім того, у двох послідовних градієнтних зображень, топографічних змін немає, а використовуючи властивість зсуву перетворення Фур'є, метод фазової кореляції може перетворити зсув просторової області на різницю фаз у частотній області. Запропоновано методи розрахунку, які аналізують вплив теплового розширення приводу датчика на загальний дрейф системи. Результати показали, що хоча довжина розширення приводу датчика є найбільшою серед усіх основних компонентів системи, це може бути не основною причиною загального дрейфу системи.

Ключові слова: скануючий зондовий мікроскоп; автоматична наноманіпуляція; автоматизована послідовна обробка зображень; дрейф нановимірювань

Вступ. Скануючий зондовий мікроскоп (СЗМ) один з базових інструментів нанотехнології, оскільки здатний як вимірювати рельєф з атомарним дозволом, так і поатомно його модифікувати. Однак, існуючі на даний час методи СЗМ все ще недостатньо досконалі. Основною проблемою, яка вникає при роботі з СЗМ є позиціонування зонда, на роботу якого впливають численні дестабілізуючі фактори: зовнішні вібрації, шуми, термодрейфи, нелінійність, гістерезис, повзучість тощо. В результаті погіршується точність вимірювань, зменшується їх достовірність, знижується граничний дозвіл приладу. Спотворення ведуть до неправильної інтерпретації вимірювальної інформації та отримання недостовірного зображення рельєфу наноб'єкта. Тому, актуальною є задача розробки нових та удосконалення існуючих методів вимірювання наноб'єктів за допомогою СЗМ із врахуванням впливів зовнішніх дестабілізуючих факторів.

Постановка проблеми. Отримання результатів вимірювань за допомогою скануючого зондового мікроскопу у вигляді цифрового зображення є досить розповсюдженим методом при виробництві нових наноматеріалів, дослідженні фізичних властивостей наноб'єктів та дослідженні їх геометричних параметрів. Зважаючи на стрімкий розвиток нанотехнологій, для подальшого ефективного використання цього методу існує ряд задач, які вимагають якнайшвидшого вирішення. Однією з них є дрейф просторового положення наноб'єктів або зонда СЗМ у процесі вимірювання. Причиною цього дрейфу зазвичай виступають дестабілізуючі фактори навколишнього середовища.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Точність вимірювання рельєфу поверхні, фізичні розміри елементів якого лежать в діапазоні від декількох ангстрем до декількох

десятків нанометрів, багато в чому визначається величиною дрейфу скануючого зондового мікроскопа. Як правило, дрейф інструменту включає в себе дві основні компоненти: одна з них викликана теплової деформацією механічних вузлів приладу, інша - кріп використовуваних п'єзоманіпуляторів [1]. Питаннями розробки нових методів і способів компенсації дрейфу займалося багато вітчизняних та закордонних вчених. Авторами [1-5] було розроблено прості підходи компенсування дрейфу, в яких передбачалося, що швидкість дрейфу залишається постійною. Однак таке припущення не враховує той факт, що дрейф, як правило, не є лінійним. Інший підхід полягає в оцінці дрейфу методами фільтрації Калмана та розробці компенсатора [2, 6-7]. Цей метод є набагато ефективнішим, але не враховує вплив зовнішніх дестабілізуючих факторів на результати вимірювань [8].

Інші із запропонованих методів пов'язані з удосконаленням конструкції приладу. Компенсування дрейфу відбувається шляхом зустрічного включення п'єзоелементів сканера, із застосуванням матеріалів, що мають малий коефіцієнт теплового розширення, а також з введенням теплоізолюючих оболонок для досягнення термостабілізації пристрої [9, 10]. Але, ці підходи є пасивними і забезпечують зменшення тільки температурного дрейфу.

Ще одним методом є вбудовування в СЗМ лінійних високочутливих x-, y-, z-датчиків положення зонда, кожен з яких управляється за допомогою замкнутої слідкуючої системи. Завдання слідкуючої системи полягає в тому, щоб постійно компенсувати різницю, що виникає між заданим переміщенням зонда по поверхні нанооб'єкта і його фактичним положенням у просторі, що вимірюється за допомогою датчика положення. У цьому випадку, для усунення дрейфу не потрібна модернізація стандартного мікроскопа, а основні недоліки полягають в тому, що через вплив нелінійної складової не вдається повністю усунути викликані дрейфом спотворення на великих сканах, а через додаткові шуми, що вносяться датчиками замкнутих слідкуючих систем, усунення дрейфу при роботі мікроскопа поблизу або на межі свого дозволу є взагалі неможливим [1]. Іншими недоліками даного методу є істотне обмеження швидкості сканування, пов'язане з великими постійними часу інтегруючих ланок слідкуючої системи, а також велике спотворення лівого і правого країв скану через неузгодженість слідкуючої системи по координаті X в цих місцях при зміні напрямку переміщення зонда на протилежне.

Метою статті є розробка методу компенсації просторової невизначеності СЗМ та його п'єзоелектричного приводного механізму, а саме: гістерезису, повзучості і теплового дрейфу [7] є актуальною та вимагає подальшого дослідження.

Виклад основного матеріалу дослідження. Слід зазначити, що саме тепловий дрейф є основною причиною просторової невизначеності в механічній системі СЗМ, оскільки внаслідок теплового розширення та стиснення може спостерігатися зміщення зонда СЗМ або зразка без застосування будь-якої рушійної напруги до п'єзоелектричного приводного механізму. Такий дрейф може мати значний вплив на достовірність отримання вимірювальних результатів у вигляді цифрового зображення, оскільки значно спотворює положення нанооб'єкту протягом послідовного сканування СЗМ.

Поведінка дрейфу СЗМ як правило є випадковим процесом, оскільки частково пов'язана зі змінами стану навколишнього середовища, такими як температура, вологість, вібрація.

Тепловий дрейф - найбільш невизначений фактор вимірювання. Як правило, тепло, яке спричиняє зміну температури сканера, в основному надходить від компонентів, які містяться в системі СЗМ, коли температура навколишнього середовища суворо контролюється. У корпусі СЗМ під час процедури вимірювання є кілька ключових компонентів, тобто привід датчика, консольний наконечник (нітрид кремнію), зразок решітки (кремній) та платформа зразка (сталь), які можуть впливати на взаємне розташування між наконечником і зразками. У таблиці 1 наведено механічні зміни розміру компонентів внаслідок теплового розширення на 1,0°C зміни температури, припускаючи, що вихідні ділянки зразкової платформи та решітки є зоною сканування.

Таблиця 1

Порівняння розширення довжини компонентів вимірювального пристрою в умовах підвищення температури на 1°C

Компоненти та матеріали AFM	П'єзоактуатор (ПЗТ)	Консольний наконечник (нітрид кремнію)	Зразок решітки (кремній)	Зразок платформ (сталь)
Лінійний коефіцієнт теплового розширення (/ K)	$1 \sim 5 \times 10^{-6}$	3×10^{-6}	$2,6 \times 10^{-6}$	$1,2 \times 10^{-5}$
Довжина прямокутника (мкм)	40000	134	10	10
Коефіцієнт температурного розштрєння (нм / K)	40 ... 200	$8,4 \times 10^{-2}$	$1,82 \times 10^{-2}$	$28,2 \times 10^{-2}$

Дані табл. 1 вказують на те, що при зміні температури на 1,0 °C загальна довжина приводу датчика є найбільшою порівняно з іншими компонентами, а отже, може бути найбільш домінуючим фактором загального дрейфу системи.

Наприклад, на рис.1 (а) та (б) наведені цифрові зображення 10 × 10 мкм нанооб'єкту з нанофункціями за допомогою СЗМ у різний час T₁ і T₂.

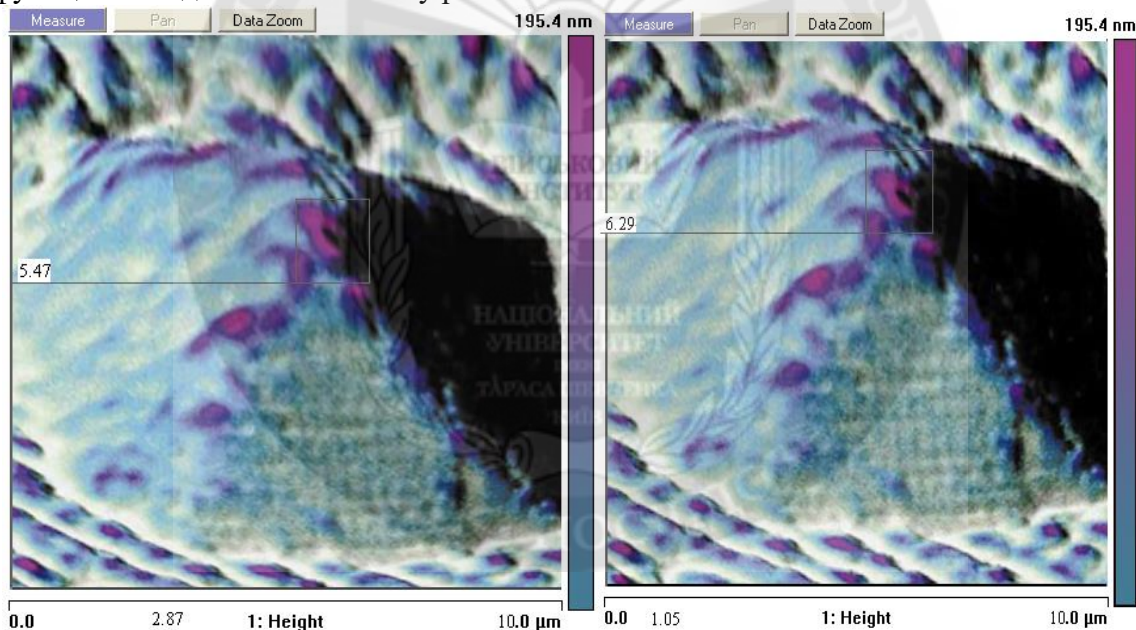


Рисунок 1 – Приклад впливу дрейфу в нановимірюваннях

(а) – перше вимірювання нанооб'єкту (б) повторне вимірювання нанооб'єкту з інтервалом у 5 годин.

Як правило, ці зсуви та невизначеності спричинені нанопозиціонуванням виконавчих механізмів, вироблених з п'єзоелектричних матеріалів (ПЗМ). Встановлено, що типовий тепловий коефіцієнт розширення ПЗМ дорівнює $(1 \dots 5) \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$. Це означає, що зміна температури на один градус спричинить переміщення приводу датчика в довжину приблизно на $(40 \dots 200)$ нм, припускаючи, що його початкова довжина становить 40 мм.

Відхилення від початкового положення датчика внаслідок впливу дестабілізуючих факторів розраховується за величиною похідної від функції $\omega(t)$ для останнього підінтервалу часу вимірювань

$$\frac{d\omega(t)}{dt} = -\omega_1 \gamma \alpha t^{\alpha-1} e^{-\gamma t \alpha},$$

де ω – шлях на останньому підінтервалі від початкового положення датчика. Додатковий час вимірювань наноб'єкту визначається наступним чином

$$\left. \begin{aligned} \omega(t_k) &= \omega_1 e^{-\gamma t_k^\alpha} \\ \omega(t_k + t_{\text{доп}})_{\text{доп}} &= \omega_1 e^{-\gamma(t_k + t_{\text{доп}})^\alpha} \end{aligned} \right\}$$

де $\omega(t_k)$ - параметр виявлення відхилень розташування датчика СЗМ в k -му підінтервалі часу вимірювань; $\omega(t_k + t_{\text{доп}})_{\text{доп}}$ - допустиме значення параметра відхилень від початкового розташування датчика, що забезпечує виконання вимоги $\Omega(t) \leq \omega_{\text{доп}}$. Розв'язком цих рівнянь буде значення додаткового часу:

$$t_{\text{доп}} = \sqrt[a]{t_k^\alpha - \left(\frac{1}{\gamma}\right) \ln \frac{\omega(t_k + t_{\text{доп}})_{\text{доп}}}{\omega(t_k)}} - t_k,$$

Слід зазначити [6 – 8], що збільшенням тривалості проведення вимірювань при сталому значенні параметра відхилень від початкового розташування датчика не задовольняє вимогу $\Omega(t) \leq \omega_{\text{доп}}$. Інтенсивність прояву зсуву датчика в позиції z дорівнюватиме

$$\lambda_z = \lambda_{z0} a_{z1} a_{z2} a_{z3}, \quad (1)$$

де λ_{z0} - початкова інтенсивність прояву відхилень від початкового розташування датчика в позиції z при початковому вимірюванні, a_{z1} - середня відносна інтенсивність прояву відхилень від початкового розташування датчика при підвищенні температури, a_{z2} - середня відносна інтенсивність прояву відхилень від початкового розташування датчика під впливом температурного розширення; a_{z3} - середня відносна інтенсивність прояву відхилень від початкового розташування датчика під впливом інших дестабілізуючих факторів. Сумарне значення параметра потоку прояву відхилень від початкового розташування датчика буде дорівнювати

$$\omega_j = \sum_{z=1}^{n_j} \lambda_{z0} a_{z1} a_{z2} a_{z3},$$

де n_j – кількість вимірювальних операцій для j -ї точки у відносній системі координат. Для початкового режиму вимірювань, вираз (1) можна записати наступним чином

$$\omega_j^{(1)}(t) = \sum_{z=1}^{n_j} \lambda_{z0} a_{z1}^{(1)} a_{z2}^{(1)} a_{z3}^{(1)}.$$

Значення параметра відхилень від початкового розташування датчика не повинно перевищувати допустиме значення:

$$\omega(t)_{\text{доп}} \geq \frac{1}{A} \omega(t),$$

де A – коефіцієнт додаткового виявлення відхилень від початкового розташування датчика; $\omega(t)_{\text{доп}}$ – допустиме значення параметра прояву відхилень від початкового розташування датчика під час проведення вимірювань в нанометровому діапазоні.

При більш інтенсивному впливі дестабілізуючих факторів, математична модель рухів датчика має бути дотримана рівність

$$e^{-\gamma t_{\text{інт}}^{a_{\text{інт}}}} = \frac{B}{Ae^{-\gamma t^a}},$$

де $B = \sum^{n\gamma} \lambda_{z_0} a_{z_1}^{(1)} a_{z_2}^{(1)} a_{z_3}^{(1)} / \sum^{n\gamma} \lambda_{z_0} a_{z_1}^{(2)} a_{z_2}^{(2)} a_{z_3}^{(2)}$ – коефіцієнт збільшення значення параметра потоку відхилень від початкового розташування датчика.

При більш інтенсивному впливі дестабілізуючих факторів час проведення випробувань визначається за формулою

$$t_{\text{інт}} = \frac{a_{\text{інт}}}{\gamma} \sqrt{t^a - \frac{1}{\gamma} \ln \frac{B}{A}},$$

де t – час проведення вимірювань в початкових умовах; $a_{\text{інт}}$ – коефіцієнт, що визначає інтенсивність впливу дестабілізуючих факторів в нових умовах.

Коефіцієнт $a_{\text{інт}}$ визначається при обробці даних про відхилення від початкового розташування датчика за умови підвищеної інтенсивності впливу зовнішніх дестабілізуючих факторів, отриманих в перших підінтервалах часу проведення вимірювань нанооб'єкту.

Зазвичай виробники СЗМ можуть запропонувати деякі методи для поліпшення нелінійності датчиків, такі як гістерезис та повзучість. Доведено, що гістерезис можна зменшити, проводячи сканування в одному напрямку, а для усунення повзучості рекомендовано робити паузи у кілька хвилин після кожного великого руху сканування [2].

Цифрові зображення реконструюються з топографічних даних, які представляють інформацію про висоту дискретних точок на поверхні зразка, тобто різні кольори у цифрових зображеннях мають різну висоту топографії зразка.

Викликані дрейфом спотворення описуються лінійними перетвореннями, які справедливі у випадку, коли швидкість дрейфу СЗМ змінюється досить повільно. В якості вихідних даних використовується одна або дві пари зустрічно сканованих зображень (ВСИ) рельєфу поверхні. Відповідно до запропонованого способу для виправлення викривлень необхідно в кожному ВСИ розпізнати одну і ту ж особливість поверхні і визначити її латеральні координати. Знаходячи коефіцієнти лінійних перетворень, роблять корекцію ВСИ в латеральній і вертикальній площинах.

Поснавши виправлені ВСИ, виконують усереднення рельєфу в області їх перекриття. Спосіб дозволяє оцінювати похибка виправлення дрейфу і отримувати виправлені зображення, похибка в яких не перевищує деякого наперед заданого значення.

Доведено, що дрейф у z -напрямку може розглядатися як некорельована величина до площини xy . Отже, вплив z -дрейфу може бути усунутий перетворенням оригінальних цифрових зображень на градієнтні [5].

Для компенсації впливу z -дрейфу запропоновано співставляти два цифрових зображення нанооб'єкту, зроблених у різний час

$$h_{k+1}(x, y) = h_k(x + \Delta x_k, y + \Delta y_k) + \Delta z_k, \quad (2)$$

де $\Delta x_k, \Delta y_k, \Delta z_k$ - дрейф у напрямках x, y та z відповідно між двома проміжками часу k та $k + 1$.

Градiєнт x -напрямку вимірювань може бути розрахований наступним чином

$$g_{kx}(x, y) = h_k(x, y) - h_k(x - 1, y). \quad (3)$$

Аналогічно градієнт у-напрямку може бути обчислений як

$$g_{ky}(x, y) = h_k(x, y) - h_k(x, y - 1). \quad (4)$$

Підставивши (2) у (3) та (4), ми можемо отримати

$$\begin{aligned} g_{kx+1}(x, y) &= h_{k+1}(x, y) - h_{k+1}(x - 1, y) = \\ &= h_k(x + \Delta x_k, y + \Delta y_k) + \Delta z_k - (h_k(x + \Delta x_k - 1, y + \Delta y_k) + \Delta z_k) = \\ &= g_{kx}(x + \Delta x_k, y + \Delta y_k), \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} g_{ky+1}(x, y) &= h_{k+1}(x, y) - h_{k+1}(x, y - 1) = \\ &= h_k(x + \Delta x_k, y + \Delta y_k) + \Delta z_k - (h_k(x + \Delta x_k, y + \Delta y_k - 1) + \Delta z_k) = \\ &= g_{ky}(x + \Delta x_k, y + \Delta y_k). \end{aligned} \quad (6)$$

Потім усувається зсув у напрямку z.

Наші експерименти показали, що використання методу фазової кореляції для вимірювання зміщення двох градієнтних зображень є більш ефективним, ніж використання вихідних зображень. Крім того, у двох послідовних градієнтних зображень, встановлено, що топографічних змін немає.

Використовуючи властивість зсуву перетворення Фур'є, метод фазової кореляції може перетворити зсув просторової області на різницю фаз у частотній області.

Ми можемо описати пару послідовних зображень s як $h_k(x, y)$ і $h_{k+1}(x, y)$, а їх градієнти - $g_k(x, y)$ і $g_{k+1}(x, y)$ відповідно.

Перетворення Фур'є для $h_k(x, y)$ і $h_{k+1}(x, y) \in H_k(f_x, f_y)$ і $H_{k+1}(f_x, f_y)$. Припускаючи, що є зсув переміщення $(\Delta x, \Delta y)$ між двома послідовними зображеннями, зв'язок між двома перетвореннями Фур'є зображень представляється як

$$H_{k+1}(f_x, f_y) = H_k(f_x, f_y) \exp[-j2\pi(\Delta x f_x + \Delta y f_y)]. \quad (7)$$

Перехресною кореляційною функцією двох кадрів, зроблених у різний час є

$$c_{k,k+1}(x, y) = \varepsilon^{-1} \left(H_k^*(f_x, f_y) H_{k+1}(f_x, f_y) \right) = \delta(x - \Delta x, y - \Delta y). \quad (8)$$

Оскільки для того, щоб усунути дрейф напрямку z, використовуються градієнтні зображення, тоді співвідношення (8) можна представити як

$$c_{k,k+1}(x, y) = \varepsilon^{-1} \left(G_k^*(f_x, f_y) G_{k+1}(f_x, f_y) \right) = \delta(x - \Delta x, y - \Delta y). \quad (9)$$

У отриманому співвідношенні (8) функції $G_k(f_x, f_y)$ і $G_{k+1}(f_x, f_y)$ є двовимірним дискретним перетворенням Фур'є $g_k(x, y)$ і $g_{k+1}(x, y)$ відповідно, ε^{-1} позначає зворотне перетворення Фур'є та позначає складну спряжену. Рівняння (8) також є імпульсною функцією в площині xu , а рівняння є оцінкою дрейфу між двома послідовними кадрами.

Припустимо, що дрейф СЗМ можна описати як зсув між системою координат зонда $O_{вз}(x_{вз}, y_{вз}, z_{вз})$ та системою координат вимірювального об'єкта $O_{ов}(x_{ов}, y_{ов}, z_{ов})$ у базовій системі координат СЗМ $O_{бс}(x_{бс}, y_{бс}, z_{бс})$, як показано на рис. 2.

У процесі вимірювання СЗМ, зонд приводиться в дію приводом ПЗМ. При зміні напруги до приводу, датчик буде рухатися у відповідний напрямок, тоді як зонд може дрейфувати по

відношенню до базової системи координат. Отже, ми можемо описати відношення між системою координат зонда та базової системи координат наступним чином:

$$O_{B3} = O_{6c} + B3_{B3,6c}, \quad (10)$$

де $B3_{B3,6c} = (t_{6cX}, t_{6cY}, t_{6cZ})^{B3}$ – це вектор переводу з однієї системи координат в іншу.

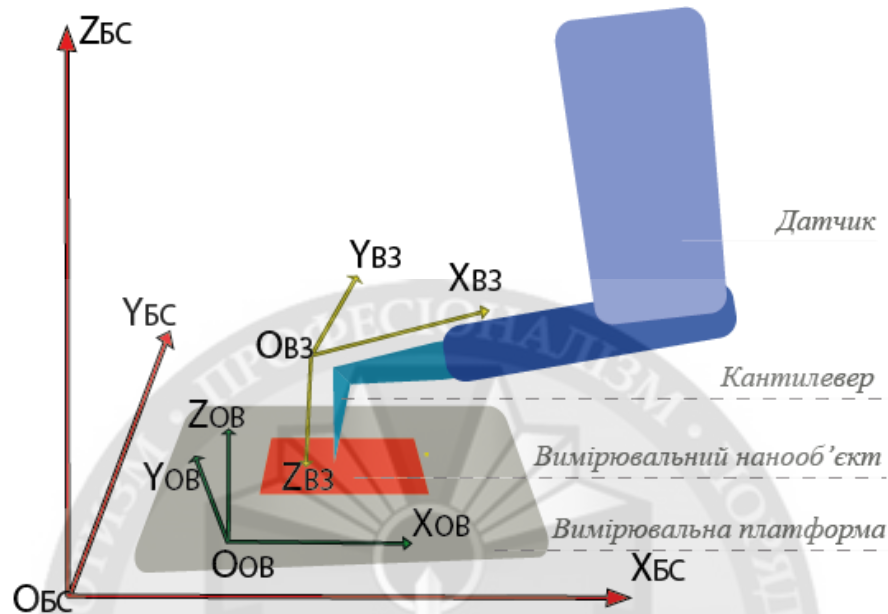


Рисунок 2 – Системи сканування ЗСМ з визначеними системами координат

Таким чином, якщо гістерезис компенсується або не враховує повзучість та нелінійність кривої переміщення. Переведення з однієї системи координат в іншу буде складатися з двох частин: одна - це п'єзо-розширення P_p ; інша – дрейф $D_{B3,6c}$ зонда щодо базової системи координат, тобто

$$B3_{B3,6c} = P_p + D_{B3,6c}. \quad (11)$$

Зв'язок переводу системи координат вимірювального об'єкту у базову систему координат можна записати як

$$O_{6v} = O_{6c} + B3_{6v,6c}, \quad (12)$$

де $B3_{6v,6c} = (t_{6vX}, t_{6vY}, t_{6vZ})^{6v}$ - вектор переводу, який містить лише дрейф D_{SB} між системою координат вимірювального об'єкту і базовою системою координат. Взаємозв'язок відносної системи координат вимірювального наноб'єкту і системи координат O_{B3} визначається наступним чином:

$$O_{6v} = O_{B3} + B3_{6v,B3} - B3_{B3,6c}, \quad (13)$$

Перетворення (12), (13) описує відповідну зміну положення вимірювального об'єкту та зонду, що може вплинути на топографічну карту під час сканування зображень ЗСМ.

Висновки й перспективи подальших досліджень

Виходячи з проведених досліджень, можна зробити висновок, що дрейф системи АСМ не повністю залежить від зміни температури системи під час її роботи, тобто теплове розширення приводу датчика не є єдиним домінуючим фактором, що спричинює загальний дрейф системи. Подальше дослідження слід провести для розуміння інших факторів, що впливають на явище дрейфу СЗМ. Цифрове зображення наноб'єкту та його положення у

системі координат СЗМ має бути кількісно виміряно і компенсуватися з метою підвищення надійності та можливості повтору нановізуалізації та наноманіпуляції.

Слід також підкреслити, що використання методу фазової кореляції для вимірювання зміщення двох градієнтних зображень є більш ефективним, ніж використання вихідних зображень. Крім того, у двох послідовних градієнтних зображень, топографічних змін немає. Використовуючи властивість зсуву перетворення Фур'є, метод фазової кореляції може перетворити зсув просторової області на різницю фаз у частотній області.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Нестеров С.Б. Сканирующие зондовые микроскопы / Нестеров С.Б., Логинов Б.А., Зилова О.С., Сабирзянов Н.Р. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007 г., 200 стр.
2. Андреева Н.В. Экспериментальные методы исследования: методики туннельной и атомно-силовой микроскопии / Андреева Н.В., Габдуллин П.Г., Журкин А.М. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2015. - 105 стр.
3. Бромберг Э. М. Тестовые методики повышения точности измерений / Э. М. Бромберг. – М: Энергия, 2008. – 242 с.
4. Кононогов, С. А. Исследование измерительных и калибровочных возможностей средств измерений нанометрового диапазона / С. А. Кононогов // *Законодательная и прикладная метрология*. – 2008. – № 3. – С. 19 – 25.
5. Тодуа П. А. Метрология и стандартизация в нанотехнологиях и nanoиндустрии / П. А. Тодуа. // *Измерительная техника*. – 2008. – №5. – С. 5 – 7.
6. Optical coherence tomography today: speed, contrast, and multimodality / [W. Drexler, M. Liu, A. Kumar та ін.]. // *Biomed*. – 2014. – №19. – С. 12–19.
7. Optical coherence tomography: a review of clinical development from bench to bedside / [A. M. Zysk, F. T. Nguyen, A. L. Oldenburg та ін.]. // *Biomed*. – 2007/ - № 12(5).
8. Pearson, E.S. *Biometrika* / E.S. Pearson, S.C. Chandra . – *Annals of mathematical statistics*, 1936. – 116 p.
9. Ferguson, T. S. *Proceeding of the 4 Berkeley symposium on mathematical statistics and probability* / T.S. Ferguson. – *Annals of mathematical statistics*, 2003. – 253 p.
10. Дэйвид Г. *Порядковые статистики: пер. с англ. под редакцией Петрова В.В.* / Г. Дэйвид. – М.: Наука, 1979. – 336 с.

REFERENCES:

1. Nesterov S., Loginov B., Zilova O., Sabirzyanov N. “Scanning probe microscopes” (2007) [MEI Publishing House] 200 p.
2. Andreeva N., Gabdullin P., Zhurkin A. “Experimental methods of research: methods of tunnel and atomic force microscopy” (2015) [St. Petersburg State Polytechnic University], 105 p.
3. Bromberg E.M. “Test methods for improving the accuracy of measurements” (2008) [Energy], 242c.
4. Kononogov S. “Research of measuring and calibration capabilities of nanometer measuring instruments” (2008) [Legislative and applied metrology], № 3, pp. 19 - 25.
5. Todua P. ‘Metrology and standardization in nanotechnology and nanoindustry’ (2008) [Measuring equipment], №5. - pp. 5 - 7.
6. W. Drexler, M. Liu, A. Kumar “Optical coherence tomography today: speed, contrast, and multimodality” (2014) [Biomed], №19, pp. 12–19.
7. A. M. Zysk, F. T. Nguyen, A. L. Oldenburg “Optical coherence tomography: a review of clinical development from bench to bedside” (2007) [Biomed], № 12 (5).
8. E.S. Pearson, S.C. Chandra “Annals of mathematical statistics” (1996) - 116 p.
9. Ferguson, T. S. “Proceeding of the 4 Berkeley symposium on mathematical statistics and probability” (2003), 253 p.
10. David G. “Ordinal statistics: trans. with English edited by VV Petrov” (2009) [Science], 336 c.

METHOD OF SPATIAL UNCERTAINTY COMPENSATION FOR MEASUREMENT IN NANOMETER RANGE

The article analyzes the main destabilizing factors that cause drift when measuring with a scanning probe microscope (SPM) in the nanometer range. It is determined that thermal drift is the main cause of spatial uncertainty in the mechanical system of SPM, because due to thermal expansion and compression can be displaced SPM probe or sample without applying any driving voltage to the piezoelectric drive mechanism. It has been established that thermal drift can have a significant effect on the reliability of measurement results in the form of a digital image, as it significantly distorts the position of the nanoobject during sequential scanning. Methods have been developed to compensate for the spatial uncertainty of the SPM and its piezoelectric drive mechanism, namely: hysteresis, creep, and thermal drift. It has been shown that hysteresis can be reduced by scanning in one direction, and it is recommended to pause for a few minutes after each major scan movement to eliminate creep. It is proved that drift in the z-direction can be considered as an uncorrelated value to the xy plane and can be eliminated by converting the original digital images to the gradient. Experiments have shown that the use of a phase correlation method to measure the offset of two gradient images is more effective than the use of original images. In addition, in two consecutive gradient images, there are no topographic changes, and using the Fourier transform shear property, the phase correlation method can convert the shift of the spatial region to the phase difference in the frequency domain. Calculation methods are proposed that analyze the effect of thermal expansion of the sensor drive on the overall drift of the system. The results showed that although the extension length of the sensor drive is the largest among all major system components, this may not be the main cause of overall system drift.

Key words: Scanning Probe Microscope; automatic nanomanipulation; automated sequential image processing; the drift of new dimensions.

