

ВІДГУК
офіційного опонента
на дисертаційну роботу Баловсяка Сергія Васильовича
“Багаторівневі методи оброблення електронно-дифракційних
та X-променевих сигналів у комп’ютеризованих інформаційно-
вимірювальних системах”,
що подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за
спеціальністю 05.13.05 – комп’ютерні системи та компоненти

1. Актуальність теми дисертації

Дифракційні картини, які спостерігаються при відбиванні електронів від кристалів, протягом багатьох років успішно використовуються в фізиці поверхні, будучи одним з основних джерел знань про специфіку атомної будови границь твердого тіла. З’явилися переконливі свідчення того, що дифракційні картини відбитих електронів середньої та високої енергій є досить інформативними, а їх використання забезпечує ряд важливих переваг, порівняно з іншими методами. Для монокристалів спостерігаються виразні максимуми картин, орієнтовані вздовж напрямків міжатомних зв’язків, що відображають взаємне положення атомів об’єкта в реальному просторі. Ця особливість дифракційних картин, отриманих у вигляді цифрових зображень, суттєво спрощує аналіз даних експерименту та фактично створює базу для розвитку нового методу візуалізації кристалічної структури поверхні.

Сьогодні візуальна інформація є найбільш інформативною для опису об’єктів і процесів, в зв’язку з чим роль і значення образного подання результатів безупинно зростає.

На основі аналізу експериментальних сигналів при дослідженні кристалів отримується важлива інформація про досліджувані зразки, що в подальшому використовується для удосконалення технологій синтезу кристалів та контролю їх параметрів.

Експериментальні зображення, отриманні за допомогою електронних мікроскопів та X-променевих дифрактометрів, мають великий рівень шумів та

артефактів, що обумовлює необхідність розробки нових методів і засобів для підвищення достовірності отримання корисної інформації.

Процес формування та оброблення електронно-дифракційних та X-променевих зображень характеризується багатоетапністю перетворень, високою трудомісткістю аналізу, а також відсутністю єдиного теоретичного підґрунтя для уніфікованого використання. Велика кількість зображень про зразок і тривалий час їх оброблення гостро ставить питання про підвищення продуктивності аналізу зображень.

При дослідженні кристалів на основі електронно-дифракційних сигналів класичні методи забезпечують обчислення параметрів кристалів з відносно високою похибкою при тривалому часі оброблення. Невідповідність можливостей сучасних методів дослідження кристалів потребам галузі визначає проблему, для розв'язання якої необхідна розробка нового теоретичного базису. Тому підвищення точності та швидкодії оброблення електронно-дифракційних та X-променевих сигналів є актуальною проблемою, яка у дисертаційній роботі вирішується на рахунок використання багаторівневих методів і засобів оброблення цифрових сигналів.

2. Зв'язок роботи із науковими програмами, темами

Дисертаційна робота виконувалась згідно до програм наукової тематики кафедри комп'ютерних систем та мереж, кафедри фізики твердого тіла Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича. Дослідження, проведені під час виконання роботи, є частиною науково-дослідних тем, які фінансувались із коштів державного бюджету Міністерством освіти і науки України та Державним фондом фундаментальних досліджень, зокрема: «Мультифункціональний адаптивно реконфігуровний модуль цифрової обробки інформації для задач медико-екологічного і технологічного профілю» (2015-2016 рр., № держреєстрації 0115U003239); «Розробка методів прецизійної X-променевої дифрактометрії деформаційних станів епітаксціальних наноструктур з гетеровалентними

переходами A3B5/A2B6 (2015-2016 рр., № держреєстрації 0215U008200); «Структурні та електрофізичні характеристики напівізолюючих кристалів матеріалів A2B6 (CdTe, Cd_{1-x}MnxTe, Cd_{1-x}ZnxTe) після впливу зовнішніх чинників» (2016-2018 рр., № держреєстрації 0116U001451); «Високопродуктивні комп'ютерні засоби і системи багатомасштабної і багатопараметричної ідентифікації та обробки інформації в режимі реального часу» (2016-2020 рр., № держреєстрації 0116u007043); «X-променево-оптична томографія полікристалічних мереж біологічних шарів (2017-2019 рр., № держреєстрації 0117U001149).

3. Оцінка змісту дисертації, її завершеність в цілому та оформлення.

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою. Автореферат адекватно відображає зміст дисертації.

Дисертаційна робота включає вступ, шість розділів, висновки, додатки та список використаних джерел. Обсяг основного тексту дисертації складає 309 сторінок. Дисертація включає 241 рисунок, 19 таблиць, 5 додатків і список літератури з 314 найменувань.

У вступі визначено актуальність, сформульовано мету і розглянуто наукову новизну, практичну цінність, ступінь апробації, публікації та структуру роботи.

Перший розділ присвячено аналізу сучасних методів і засобів оброблення сигналів у комп'ютеризованих інформаційно-вимірювальних системах (КІВС) на основі сканувальних електронних мікроскопів та X-променевих дифрактометрів.

Проаналізовано методи оброблення зображень, отриманих на основі електронно-дифракційних сигналів, зокрема, зображень смуг Кікучі, у КІВС на базі електронних мікроскопів і зображень від X-променевих дифрактометрів. Встановлено, що на зображеннях, крім базової інформації, містяться в основному імпульсний і гаусовий шуми. Проаналізовано основні

методи оброблення зображень у КІВС: методів фільтрації і визначення рівня шуму; методів інтерполяції й апроксимації, локального оброблення зображень та видалення їх неоднорідного фону; детектування геометричних примітивів на зображеннях методом Хафа. Встановлено, що існуючі (однорівневі) методи цифрового оброблення зображень часто не забезпечують потрібної точності та швидкодії, тому існує потреба у розробленні методів багаторівневого оброблення сигналів. На основі проведеного аналізу сформульовано прикладну науково-технічну проблему, визначено перспективний напрям досліджень і завдання дисертаційної роботи.

У другому розділі описано запропоновану концепцію багаторівневого оброблення електронно-дифракційних та Х-променевих сигналів у КІВС на базі електронних мікроскопів та Х-променевих дифрактометрів. На основі запропонованої концепції розроблено теоретичні основи та методи багаторівневого оброблення сигналів. Розроблено багаторівневі методи фільтрації й апроксимації сигналів, завдяки чому підвищено точність або швидкодію їх оброблення. Точність методів обчислення рівня та видалення гаусового шуму на зображеннях підвищено за рахунок врахування їх контурів. У запропонованих багаторівневих методах апроксимації сигнали-результати складаються з суми згладженої та узгоджувальної функцій, що зменшило спотворення апроксимованих сигналів. Розроблено методи багатомасштабного аналізу енергетичних спектрів Фур'є зображень, завдяки чому підвищено точність обчислення параметрів досліджуваних зразків на основі експериментальних Х-променевих муарових зображень. Встановлено, що завдяки багаторівневому підходу можна підвищити точність і швидкодію існуючих методів оброблення сигналів.

У третьому розділі розроблено багаторівневі методи аналізу, синтезу та локального оброблення сигналів у КІВС на основі електронних мікроскопів та Х-променевих дифрактометрів. Розроблено математичну

модель і метод для обчислення усереднених профілів цифрових зображень. Характерною особливістю запропонованого методу є використання конічних перерізів як обвідних серії профілів зображення, завдяки чому підвищено відношення сигнал/шум на усереднених профілях. Розроблено швидкодіючий метод підвищення локального контрасту та видалення неоднорідного фону зображень, який використовує як додаткові рівні значення обвідних екстремальних значень сигналу в межах локальних вікон прямокутної форми. Запропоновано багаторівневі методи орієнтованої фільтрації сигналів у просторовій і частотній областях, які характеризуються підвищеною точністю. Високоточну фільтрацію та видалення фону X-променевих сигналів виконано за допомогою біортогональних вейвлетів.

Четвертий розділ присвячено опису розроблених методів багаторівневого визначення положення об'єктів на електронно-дифракційних та X-променевих зображеннях у КІВС. Метод визначення просторового положення відрізків прямих, кіл та еліпсів на зображеннях удосконалено шляхом низькочастотної фільтрації початкового зображення, що забезпечило підвищення точності визначення координат об'єктів на зображеннях. Запропоновано багаторівневий метод визначення положення особливих ділянок на зображеннях методом суміщення з еталоном, який дозволяє визначати координати перетинів смуг на електронно-дифракційних зображеннях з точністю до пікселя. Розроблено багатомасштабний метод побудови карти просторого розподілу частот і періодів зображення, які обчислюються на основі енергетичних спектрів вікон зображення. Удосконалено метод деконволюції зображень шляхом орієнтованої фільтрації шумів.

У п'ятому розділі описано багаторівневі методи оброблення зображень від електронно-дифракційних та X-променевих сигналів із використанням засобів штучного інтелекту, а саме штучних нейронних мереж і генетичних алгоритмів. Одержав подальший розвиток метод навчання нейромережі з різним масштабом вхідних сигналів, що значно зменшило час навчання. На

основі генетичного алгоритму розроблено швидкодіючий метод суміщення цифрових зображень об'єктів; точність суміщення зображень підвищено алгоритмом координатного спуску.

Шостий розділ присвячено практичній реалізації багаторівневого оброблення електронно-дифракційних і Х-променевих сигналів у КІВС. Розроблено апаратно-програмні засоби оброблення сигналів у КІВС на базі електронного мікроскопу «Zeiss EVO 50» і побудовано систему підтримки прийняття рішень оператора електронного мікроскопу. Методи оброблення сигналів реалізовано у вигляді програм у середовищі Borland Delphi та в системі Matlab. Розроблено структурні схеми апаратних засобів, які реалізують оброблення електронно-дифракційних сигналів у КІВС. Завдяки комплексному обробленню електронно-дифракційних сигналів за допомогою розроблених методів отримано достатню для практичного використання відносну похибку визначення структурних характеристик кристалів ($\sim 10^{-5}$). Створено апаратно-програмні засоби для оброблення сигналів у КІВС на базі Х-променевих дифрактометрів ДРОН-3М та ДРОН-4, які використано для побудови системи підтримки прийняття рішень оператора Х-променевого дифрактометра. Для автоматизації експерименту на Х-променевих дифрактометрах апаратно реалізовано адаптери системи керування. Завдяки комплексному обробленню Х-променевих сигналів розробленими методами та засобами точність обчислення характеристик для досліджуваних зразків підвищено на порядок.

4. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій та їх достовірність. Дисертація має послідовну логічну структуру. Задачі досліджень, наукові положення та висновки чітко сформульовані і математично строго доведені.

Достовірність теоретичних положень дисертаційної роботи підтверджується строгістю постановки задач, коректним застосуванням математичних методів під час доведення наукових положень, строгим

виведенням аналітичних співвідношень, порівнянням результатів, отриманих за допомогою розроблених у роботі методів, з відомими, та збіжністю результатів математичного моделювання з результатами, що отримані під час впровадження розроблених програмних і апаратних засобів.

5. Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше запропоновано концепцію багаторівневого оброблення експериментальних сигналів у КІВС, яка полягає в обчисленні та аналізі додаткових рівнів сигналів, що забезпечує підвищення їх швидкодії або точності на порядок.

2. На основі запропонованої концепції вперше розроблено теоретичні основи аналізу та синтезу профілів розподілу інтенсивності зображень, що використано для розробки нового методу. Характерною особливістю розробленого методу є використання кінчних перерізів як обвідних серії профілів, що забезпечує підвищення точності визначення параметрів усереднених профілів на порядок.

3. Вперше запропоновано високоточні методи багаторівневої інтерполяції, в яких інтерпольовані одновимірні та двовимірні сигнали складаються з коректованої та узгоджувальної функцій, що дозволяє в середньому на 16% зменшити похибку інтерполяції.

4. Вперше розроблено швидкодійний метод підвищення локального контрасту та видалення неоднорідного фону зображень, особливістю якого є використання обвідних екстремумів сигналів, що забезпечує підвищення локального контрасту зображень до 8 разів.

5. Розроблено нові методи орієнтованої фільтрації зображень у просторовій і частотній областях, особливістю яких є визначення напрямку фільтрації на основі контурів зображення, що дозволяє видаляти на зображеннях шум при незначному розмитті контурів.

6. Вперше розроблено метод суміщення зображень об'єктів на основі генетичного алгоритму та алгоритму координатного спуску, що забезпечує підвищену точність ($\approx 0.01\%$ за масштабом) та швидкодію суміщення зображень.

7. Вперше запропоновано багатомасштабний метод аналізу енергетичних спектрів Фур'є зображень, що забезпечує до 2 разів вищу точність вирішення оберненої задачі при обчисленні параметрів досліджуваних зразків на основі X-променевих муарових зображень.

8. Подальшого розвитку отримали:

- метод детектування просторового положення об'єктів на зображеннях за допомогою перетворення Хафа, який відрізняється від відомих низькочастотною фільтрацією зображення та акумулятора методу Хафа, що дозволяє отримати субпікселну точність визначення координат об'єктів.
- високоточний метод автоматичного визначення рівня гаусового шуму, який відрізняється від відомих врахуванням контурів зображення, що забезпечує на $\approx 0.1\%$ меншу похибку обчислення рівня шуму;
- метод автоматичної фільтрації гаусового шуму на зображеннях із використанням фільтра Гауса, який відрізняється від відомих локальним обробленням зображень у контурів ділянках, що забезпечує квазіоптимальний результат фільтрації;
- високоточний метод вейвлет-фільтрації з використанням сімейства біортогональних вейвлетів;
- швидкодійний метод використання штучних нейронних мереж для визначення структурних параметрів зразків на основі експериментальних X-променевих сигналів, який відрізняється від відомих навчанням ШНМ для різних масштабів вхідних сигналів;

- високоточний метод деконволюції зображень, який відрізняється від відомого використанням як функції розсіяння точки орієнтованого двовимірного розподілу Гауса.

6. Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що на основі запропонованих методів, моделей і алгоритмів розроблено програмні та апаратні засоби для оброблення цифрових електронно-дифракційних та X-променевих сигналів; комп'ютерну інформаційно-вимірювальну систему на базі електронних мікроскопів та X-променевих дифрактометрів.

Розроблений комплекс програм для оброблення електронно-дифракційних зображень у КІВС на базі електронного мікроскопу забезпечує на порядок вищу точність обчислення параметрів досліджуваних кристалів, наприклад, кристалів штучного алмазу та кремнію. Розроблені комплекси програм для оброблення X-променевих сигналів у КІВС на базі X-променевих дифрактометрів забезпечують підвищену швидкодію або точність обчислення параметрів досліджуваних зразків.

Результати дисертаційної роботи впроваджено в Центрі колективного користування приладами НАН України; Інституті фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України (м. Київ); Інституті надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України (м. Київ); Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України (м. Київ). Теоретичні та практичні результати роботи використано в навчальному процесі у Чернівецькому національному університеті імені Юрія Федьковича.

7. Відповідність дисертаційної роботи обраній спеціальності

Робота відповідає паспорту спеціальності спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти, оскільки в ній розроблено багаторівневі

методи та засоби оброблення електронно-дифракційних і X-променевих сигналів, а також комп'ютеризовану інформаційно-вимірювальну систему.

8. Ідентичність основних положень дисертації і змісту автореферату

Автореферат дисертації написано відповідно до існуючих вимог. Він містить всі необхідні складові. У ньому викладена основна суть проведених досліджень, наведені висновки та список основних публікацій. Порівняння змісту автореферату з текстом дисертації дозволяє стверджувати, що він адекватно відображає дисертаційну роботу та містить основну сутність виконаних досліджень і отриманих результатів.

На жаль, в авторефераті недостатньо уваги приділено питанням розробки КІВС та її підсистем, які відображено в дисертаційній роботі.

9. Висвітлення наукових результатів в опублікованих працях.

За тематикою дисертації опубліковано 68 наукових праць, у тому числі 1 монографія, 29 статей у фахових виданнях, 30 доповідей у матеріалах міжнародних конференцій, 5 доповідей у матеріалах всеукраїнських конференцій, 3 патенти на корисну модель, 12 робіт у міжнародних виданнях, що входять до наукометричної бази SCOPUS. Матеріали досліджень обговорювались на 27 наукових і науково-практичних конференціях.

В опублікованих працях викладено основні результати дисертаційних досліджень.

Зауваження щодо дисертації:

1. Автором використано термін «візуальна якість зображення», яке часто використовується в роботі (стор. 74, 164, 166, 168, 193, 214, 276), але не дано його пояснення, що ускладнює аналіз отриманих у роботі експериментальних результатів, оскільки зображення характеризується множиною параметрів.

2. Багато прийнятих в дисертаційній роботі рішень має евристичний характер, що базуються на використанні досвіду та інтуїції дисертанта. При цьому достовірність прийнятих рішень підтверджується результатами

експериментальних досліджень. Доцільно було б навести теоретичне обґрунтування прийнятих рішень.

Так, наприклад, у роботі запропоновано метод обчислення рівня шуму на зображеннях (стор. 96-112). Констатується, що новизна методу (стор. 96) полягає в обчисленні контурів зображення за методами Собеля або Кенні. Однак, теоретичного обґрунтування для цього не наведено. Можливо, що використання інших методів забезпечить кращий результат.

3. Не наведено обмеження на розроблені методи. Так, наприклад, точність відтворення контуру залежить від кількості точок, а тому при малих розмірів об'єктів може призвести до артефактних результатів.

4. Не розглянуто можливості використання для формування зображень HDR (High Dynamic Range Imaging) — технологій, доцільність, яких обумовлена великим динамічним діапазоном зображень вибраної предметної області.

5. В роботі часто ототожнюються поняття «оброблення електронно-дифракційних і X-променевих сигналів» з «обробкою зображень, отриманих на основі електронно-дифракційних і X-променевих сигналів».

6. Не зрозуміло твердження автора (стор. 198) «Межі смуг Кікучі на зображенні описуються за допомогою гіпербол, які незначно відрізняються від прямих». Таке можливо тільки у граничному випадку, але при цьому гіпербола має дві гілки.

7. Використання крайового антиаліазингу призведе до розмиття граничних траєкторій смуг Кікуча, і, як наслідок, до зменшення контрастності граничних зон. Великий ризик має місце при близьких інтенсивностях кольорів фону і смуг Кікуча.

8. Не зрозуміло, як отримано еталонні (тестові) фігури для експериментальних досліджень. Наскільки вони точні?

9. На стор. 141 констатується, що «внаслідок перебору енергетичного спектра швидкодія запропонованого методу на порядок менша, проте це є

незначним недоліком порівнянні зі зростанням точності методу». Про яку точність йде мова, які її значення?

10. Метою роботи є «підвищення точності та швидкодії оброблення...». Ці два критерії знаходяться в протиріччі. Тому доцільніше було б використати інтегральний критерій з обмеженнями на допустимі значення критеріїв.

11. Недостатньо обґрунтовано необхідність підвищення швидкодії оброблення зображень, отриманих від електронно-дифракційних і X-променевих сигналів, оскільки динамічний режим для подальшого аналізу не передбачається. Тим більше, що автоматизована обробка в КІВС передбачає роботу користувача, дії якого можуть бути тривалими.

12. У запропонованому методі багаторівневої інтерполяції (с. 129) не описано послідовність вибору значення для згладжувального коефіцієнта k_s .

13. В методі обчислення усередненого профілю зображення (с. 151) не вказано, за яким критерієм з серії профілів вибирається найменш спотворений профіль класу z_{fc} .

14. В методі деконволюції зображень смуг (с. 274) не показано, як визначається напрямок орієнтованої двовимірної функції Гауса ?

15. Не наведено оцінок просторової складності розроблених програмних засобів.

16. У роботі запропоновано програмно-апаратну реалізацію КІВС, але не наведено рекомендацій або обґрунтування щодо їх оптимального розподілу.

17. У тексті дисертації зустрічаються окремі неточності термінологічного та стилістичного плану.

18. У підрозділі «Структура та обсяг дисертації» (с.44) помилково замість «шести розділів» записано «п'яти розділів», таку ж помилку виявлена на с.7 автореферату.

19. На жаль, в авторефераті недостатньо уваги приділено питанням розробки KIBC та її підсистем, які відображено в дисертаційній роботі.

ВИСНОВОК

Сформульовані в результаті критичного аналізу розділів дисертаційної роботи зауваження не відносяться до її принципових положень, а тому не впливають на її наукову та практичну цінність

Тема дисертаційної роботи, проведені дослідження та одержані результати відповідають паспорту спеціальності 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти.

Роботу виконано за актуальною темою. Автореферат та публікації автора адекватно відображають зміст дисертації. Оформлення дисертації та автореферату відповідає встановленим вимогам ВАК .

Результати наукових досліджень, за якими здобувач захистив кандидатську дисертацію, не виносяться на захист докторської дисертації.

Дисертаційна робота є завершеною працею, в якій отримано нові науково обґрунтовані результати, що вирішують важливу наукову проблему підвищення точності та швидкодії оброблення електронно-дифракційних та X-променевих сигналів у комп'ютеризованих інформаційно-вимірювальних системах шляхом використання багаторівневих методів. Вважаю представлену дисертаційну роботу як таку, що відповідає паспорту спеціальності 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти, за якою вона подається, задовольняє вимогам, які ставляться до робіт на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, п. 9, 10, 12 „Порядку

присудження наукових ступенів”. Автор дисертації, Баловсяк Сергій Васильович, заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти.

Професор кафедри програмного забезпечення
Вінницького національного технічного
університету
д.т.н., професор



О. Н. Романюк

