

ІЄРАРХІЧНИЙ АЛГОРИТМ РОЗПІЗНАВАННЯ ЕЛЕКТРОНОГРАМ

Розглядається інформаційно-екстремальний ієрархічний алгоритм розпізнавання електронограм, одержаних в електронній мікроскопії в режимі мікродифракції, який дозволяє підвищити функціональну ефективність навчання системи при збільшенні потужності алфавіту класів. Оброблення електронограм в полярних координатах дає можливість зробити алгоритм інваріантним до зсуву та повороту.

Вступ

Розпізнавання одержаних в електронній мікроскопії в режимі мікродифракції електронограм є важливою науково-практичною задачею [1], актуальною в металургійній та хімічній промисловості, геології, кристалографії та інших галузях. Існуючі аналітико-геометричні методи розпізнавання електронограм [2] вимагають значних часових витрат і потребують високого рівня кваліфікації особи, що приймає рішення. Більшість відомих машинних алгоритмів розпізнавання зображень [2-4] орієнтовано на розв'язання модельних задач, які виключають перетин класів, характеризуються невисокою достовірністю розпізнавання і потребують на підготовчому етапі навчання нормалізації апріорно деформованих образів, що на практиці, як правило, є ускладненим.

Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є використання ідей і методів інформаційно-екстремальної інтелектуальної технології (ІЕІ-технології), що ґрунтується на максимізації інформаційної спроможності системи розпізнавання шляхом введення в процесі навчання додаткових інформаційних обмежень [5]. У працях [6,7] досліджувалися у рамках ІЕІ-технології питання аналізу і синтезу систем розпізнавання електронограм за неієрархічним алгоритмом, який є чутливим до збільшення потужності алфавіту класів розпізнавання. У статті розглядається питання стиснення та оброблення відеоінформації в інформаційно-екстремальних алгоритмах навчання системи розпізнавання електронограм, які мають ієрархічну структуру.

1. Постановка задачі

Розглянемо задачу загального синтезу системи розпізнавання зображень. Нехай ефективність навчання розпізнаванню реалізацій класу X_m^o , $m = \overline{1, M}$, характеризується значенням E_m критерію функціональної ефективності (КФЕ). Відома навчальна матриця $\|y_{m,i}^{(j)}\|$, $i = \overline{1, N}$, $j = \overline{1, n}$, де N, n – кількість ознак розпізнавання і випробувань відповідно. Рядок матриці $\{y_{m,i}^{(j)} | i = \overline{1, N}\}$ утворює j -ту реалізацію образу, а стовпець $\{y_{m,i}^{(j)} | j = \overline{1, n}\}$ – навчальну вибірку з генеральної сукупності значень i -ї ознаки розпізнавання. Треба для структурованого вектора параметрів функціонування системи розпізнавання $g_m = \langle g_{m,1}, \dots, g_{m,q}, \dots, g_{m,Q} \rangle$, які будемо називати параметрами навчання і для яких відомі обмеження $R_q(g_1, \dots, g_Q) \leq 0$, шляхом організації послідовних ітераційних процедур знайти екстремальні значення координат вектора g_m , що забезпечують максимум КФЕ навчання системи розпізнавання:

$$E_{\max}^* = \max_G E_m, \quad (1)$$

де G – область допустимих значень параметрів навчання.

На етапі екзамени треба за побудованими в процесі навчання системи розпізнавання вирішальними правилами визначити належність реалізації образу, що розпізнається, до відповідного класу розпізнавання із заданого алфавіту $\{X_m^o\}$.

Метою роботи є підвищення достовірності та оперативності розпізнавання електронограм за ІЕІ-технологією при збільшенні потужності алфавіту класів розпізнавання.

2. Алгоритм навчання системи розпізнавання

Математичну (категорійну) модель процесу навчання системи розпізнавання за ІЕІ-технологією подамо у вигляді діаграми відображень множин. При обґрунтуванні гіпотези нечіткої компактності має місце нечітке розбиття $\tilde{\mathfrak{R}}^{|\mathcal{M}|} \subset \Omega$, де Ω – простір ознак розпізнавання. Введемо оператор θ нечіткої факторизації простору ознак: $\theta: Y \rightarrow \tilde{\mathfrak{R}}^{|\mathcal{M}|}$ і оператор класифікації $\gamma: \tilde{\mathfrak{R}}^{|\mathcal{M}|} \rightarrow I^{|\mathcal{I}|}$, який перевіряє основну статистичну гіпотезу про належність реалізацій $\{x_m^{(j)} | j=\overline{1, n}\}$ нечіткому класу X_m^o . Тут l – кількість статистичних гіпотез. Оператор $g: I^{|\mathcal{I}|} \rightarrow \mathfrak{S}^{|\mathcal{Q}|}$ шляхом оцінки статистичних гіпотез формує множину точнісних характеристик $\mathfrak{S}^{|\mathcal{Q}|}$, де $q=|\mathcal{Q}|$ – кількість точнісних характеристик. Оператор $\phi: \mathfrak{S}^{|\mathcal{Q}|} \rightarrow E$ обчислює множину значень інформаційного КФЕ, який є функціоналом точнісних характеристик. Контур оптимізації геометричних параметрів нечіткого розбиття $\tilde{\mathfrak{R}}^{|\mathcal{M}|}$ шляхом пошуку максимуму КФЕ навчання розпізнаванню реалізацій класу X_m^o замикається оператором $g: E \rightarrow \tilde{\mathfrak{R}}^{|\mathcal{M}|}$.

Структурну діаграму відображень множин у процесі навчання за базовим інформаційно-екстремальним алгоритмом показано на рис. 1.

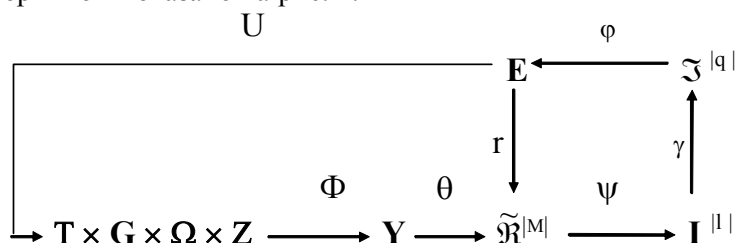


Рис. 1. Діаграма відображень множин у процесі навчання системи розпізнавання

Оператор $U: E \rightarrow G \times T \times \Omega \times Z$ регламентує процес навчання і дозволяє оптимізувати параметри його плану, які визначають, наприклад, обсяг і структуру випробувань, черговість розгляду класів розпізнавання та інше.

Вхідною інформацією для навчання за базовим алгоритмом є багатовимірна навчальна матриця $\|y_{m,i}^{(j)} | m=\overline{1, M}; i=\overline{1, N}; j=\overline{1, n}\|$, де M, N, n – кількість класів, ознак розпізнавання та векторів-реалізацій класів відповідно; система полів контрольних допусків $\{\delta_{k,i}\}$ на ознаки розпізнавання і рівні селекції $\{\rho_m\}$ координат еталонних векторів-реалізацій, які за замовчуванням дорівнюють 0,5 для всіх класів розпізнавання.

Основні етапи реалізації алгоритму:

1. Побудова ієрархічної структури алфавіту класів розпізнавання. При цьому перший ярус структури складається з типових представників якісно відмінних класів електронограм, які визначають алфавіт класів розпізнавання $\{X_m^{(1)}\}$, а наступні яруси – з представників їх класів та підкласів. Кожна гілка вищого ярусу утворює страту, яка визначає свій алфавіт класів розпізнавання $\{X_{k,m}^{(r)}\}$, де k, r – номери страт і ярусів відповідно.

2. Для кожного класу будується спектрограма яскравості шляхом оброблення електронограми у полярних координатах за умови, що центр електронного пучка приймається за центр електронограми.

3. Для кожного алфавіту формується вхідна навчальна матриця $\|y_{k,m,i}^{(j)}\|^{(r)}$, вектори-реалізації якої утворюються шляхом квантування у часі відповідної спектрограми яскравості.

4. Для кожного алфавіту формується бінарна навчальна матриця $\|x_{k,m,i}^{(j)}\|^{(r)}$, елементи якої дорівнюють

$$x_{k,m,i}^{(j)} = \begin{cases} 1, & \text{if } y_{k,m,i}^{(j)} \in \delta_{K,i}; \\ 0, & \text{if } y_{k,m,i}^{(j)} \notin \delta_{K,i}. \end{cases} \quad (2)$$

5. Формування масиву еталонних двійкових векторів $\{x_{k,m,i} \mid m = \overline{1, M}, i = \overline{1, N}\}$, елементи якого визначаються за правилом:

$$x_{k,m,i} = \begin{cases} 1, & \text{if } \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{k,m,i}^{(j)} > \rho_{k,m}; \\ 0, & \text{if else,} \end{cases} \quad (3)$$

де $\rho_{k,m}^{(r)}$ – рівень селекції координат вектора $x_{k,m}^{(r)} \in X_{k,m}^{(r)}$.

6. Розбиття множини еталонних векторів на пари найближчих «сусідів»: $\mathcal{R}_{k,m}^{[2]} = \langle x_m, x_1 \rangle$, де x_1 – еталонний вектор сусіднього класу $X_{k,m}^{(r)}$, за таким алгоритмом:

а) структурується множина еталонних векторів, починаючи з вектора x_1 базового класу X_1^0 , який характеризує найбільшу функціональну ефективність системи розпізнавання;

б) будується матриця кодових відстаней між еталонними векторами розмірності $M \times M$;

в) для кожного рядка матриці кодових відстаней знаходиться мінімальний елемент, який належить стовпцю вектора, найближчого до вектора, що визначає рядок. За наявності декількох однакових мінімальних елементів вибирається з них будь-який, оскільки вони є рівноправними;

г) формується структурована множина елементів попарного розбиття $\{\mathcal{R}_{k,m}^{[2]} \mid m = \overline{1, M}\}$, яка задає план навчання.

7. Оптимізація кодової відстані $d_{k,m}^{(r)}$ відбувається за рекурентною процедурою. При цьому приймається $E_{k,m}^{(r)}(0) = 0$.

8. Процедура закінчується при знаходженні максимуму КФЕ в робочій області визначення його функції: $E_{k,m}^{*(r)} = \max_{\{d\}} E_m$, де $\{d\} = \{d_1, \dots, d_k, \dots, d_{\max}\} \in [0; d(x_m \oplus x_1) - 1]$ – множина радіусів концентрованих гіперсфер, центр яких визначається вершиною еталонного вектора $x_{k,m}^{(r)} \in X_{k,m}^{(r)}$. При цьому множина $\{d\}$ є так само множиною кроків навчання системи розпізнавання.

Таким чином, базовий алгоритм навчання є ітераційною процедурою пошуку глобального максимуму інформаційного КФЕ в робочій області визначення його функції:

$$d_{k,m}^{*(r)} = \arg \max_{\{d\}} E_{k,m}^{*(r)}. \quad (4)$$

Параметри навчання системи розпізнавання за базовим алгоритмом – оптимальні кодові відстані $\{d_{k,m}^{*(r)}\}$ і оптимальні еталонні вектори-реалізації $\{x_{k,m}^{*(r)}\}$ для заданого алфавіту $\{X_{k,m}^{(r)}\}$ є обов'язковими вхідними даними для функціонування системи розпізнавання в режимі екзамену, тобто безпосереднього прийняття рішень.

Отже, основною функцією базового алгоритму навчання у рамках ІЕІ-технології є обчислення на кожному кроці навчання інформаційного КФЕ і організація пошуку його глобального максимуму в робочій області визначення функції критерію з метою визначення оптимальних геометричних параметрів розбиття простору ознак на класи розпізнавання.

Як критерій оптимізації параметрів навчання у рамках ІЕІ-технології може розглядатися будь-яка статистична інформаційна міра, яка є функціоналом від точнісних характеристик. Широкого використання в алгоритмах навчання набула модифікація інформаційної міри Кульбака [7], в якій розглядається відношення правдоподібності у вигляді логарифмічного відношення повної ймовірності правильного прийняття рішень P_f до повної ймовірності помилкового прийняття рішень P_f . Для рівноймовірних гіпотез, що характеризує найбільш важкий у статистичному розумінні випадок прийняття рішень, міру Кульбака подамо у вигляді

$$\begin{aligned}
E_{k,m}^{(r)} &= \log_2 \frac{P_{t,k,m}}{P_{f,k,m}} * [P_{t,k,m} - P_{f,k,m}] = \left| \frac{P_{t,k,m} = 0,5D_{1,k,m} + 0,5D_{2,k,m}}{P_{f,k,m} = 0,5\alpha_{k,m} + 0,5\beta_{k,m}} \right| = \\
&= \frac{1}{2} \log_2 \left(\frac{D_{1,k,m} + D_{2,k,m}}{\alpha_{k,m} + \beta_{k,m}} \right) [(D_{1,k,m} + D_{2,k,m}) - (\alpha_{k,m} + \beta_{k,m})] = \\
&= \log_2 \left(\frac{2 - (\alpha_{k,m} + \beta_{k,m})}{\alpha_{k,m} + \beta_{k,m}} \right) [2 - (\alpha_{k,m} + \beta_{k,m})], \tag{5}
\end{aligned}$$

де $D_{1,k,m}, D_{2,k,m}, \alpha_{k,m}, \beta_{k,m}$ – точнісні характеристики розпізнавання реалізацій класу $\{X_{k,m}^{(r)}\}$: перша і друга достовірності, помилки першого та другого роду відповідно.

3. Реалізація ієрархічного алгоритму розпізнавання електронограм

Для реалізації прикладу роботи системи розпізнавання електронограм використовувались отримані на просвічуючому електронному мікроскопі електронограми, зображені на рис. 2.

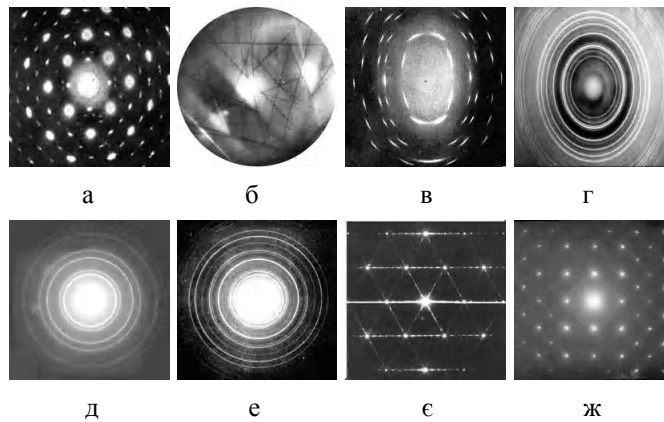


Рис. 2. Електронограми: а – мозаїчного монокристалу; б – з Кікучі-лініями; в – текстури; г – полікристалу; д – алюмінію; е – NaCl; е – тодорокіту; ж – золота

Оброблення електронограм, зображених на рис. 2, здійснювалось у полярних координатах, які дозволяють зробити електронограми, що досліджуються, інваріантними до зсуву і повороту. При обробленні зображень в полярних координатах рядок навчальної матриці – вектор-реалізація образу формувався з ознак розпізнавання, які обчислювалися за формулою

$$\Theta_j = \frac{\sum_{i=1}^N \theta_i}{N}, \tag{6}$$

де Θ_j – числове значення спектра в j -му радіусі кола зчитування, $j = \overline{1, R}$; θ_i – значення яскравості в i -му пікселі, $i = \overline{1, N}$; N – загальна кількість пікселів у колі зчитування.

Було побудовано ієрархічну структуру, яка зображена на рис. 3.

На першому ярусі ієрархічної структури (див. рис. 3) розташовано чотири класи основних типів електронограм: монокристалу – клас $X_1^{(1)}$ (електронограми з рефlekсами у вигляді плям), з Кікучі-лініями – клас $X_2^{(1)}$, текстури – клас $X_3^{(1)}$ (з рефlekсами у вигляді дуг) та полікристалу – клас $X_4^{(1)}$ (концентричні кільця). На другому ярусі розташовані: тодорокіт – клас $X_{1,1}^{(2)}$, золото – клас $X_{1,2}^{(2)}$ та алюміній – клас $X_{4,1}^{(2)}$ і NaCl – клас $X_{4,2}^{(2)}$.

Базовий алгоритм навчання проводився при значенні параметра поля контрольних допусків $\delta = 15$. Графік залежності усередненого КФЕ від радіуса контейнера для класу $X_4^{(1)}$ зображений на рис. 4.

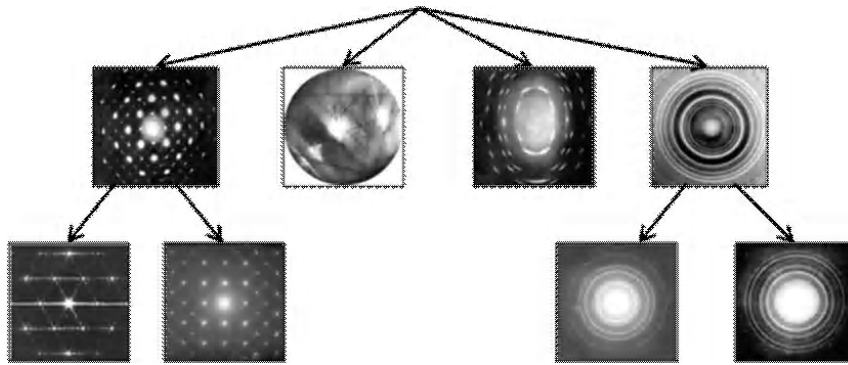


Рис. 3. Ієрархічна структура алфавіту класів розпізнавання

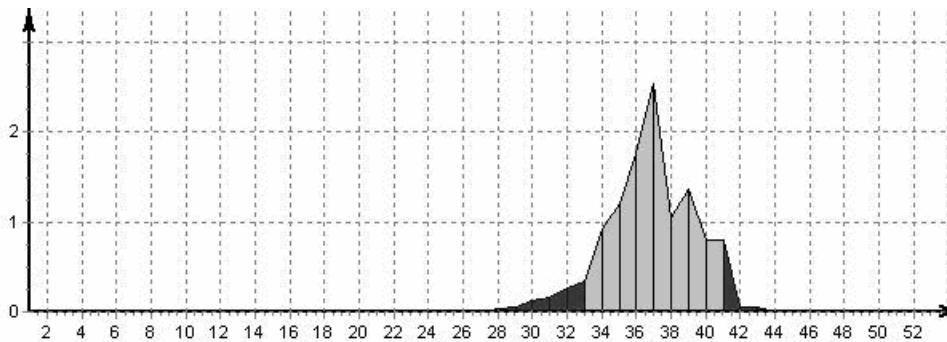


Рис. 4. Графік залежності КФЕ від радіуса контейнера для класу $X_4^{(1)}$

Світла ділянка на графіку рис. 4 визначає робочу область, в якій проводиться пошук глобального максимуму КФЕ (5). Аналіз графіка показує, що максимальне значення КФЕ для класу досягається при значенні радіуса контейнера $d = 37$ і становить 2.53. При цьому мають місце такі точнісні характеристики: перша достовірність $D1=0,9$, друга достовірність $D2=0,9$, помилка першого роду $\alpha = 0,1$, помилка другого роду $\beta = 0,1$.

Середнє значення КФЕ після проведення навчання для першого ярусу ієрархічної структури дорівнює $\bar{E} = 2,01$.

З метою перевірки працездатності розробленого ієрархічного алгоритму в режимі екзамєну на монітор комп'ютера електронного растрового мікроскопа РЕМ-103М виробництва ВАТ «Selmi» (Суми, Україна) транслялася електроннограма алюмінію, яка в ієрархічній структурі (див. рис. 3) знаходиться у другому ярусі (клас $X_{4,1}^{(2)}$). Результати екзамєну наведено на рис. 5.

	Перший рівень ієрархії:			
	Полікристал	С Кичучі лініями	Монокристал	Текстура
	Ф-я належності:	0,6333	-1,0666	-1,0877
Висновок: Зображення належить до класу полікристалів				
Другий рівень ієрархії:				
NaCl		Al		
-1,0566		0,8333		
Висновок: Зображення належить до класу Al				

Рис. 5. Інтерфейс програми в режимі проведення екзамєну

Аналіз рис. 5 показує, що у режимі екзамєну електроннограма, що розпізнавалася, була правильно віднесена до відповідного класу за максимальним значенням геометричної

(дистанційної) функції належності реалізації образу відповідному гіперсферичному контейнеру і обчислювалася за формулою

$$\mu_{k,m}^{(r)} = 1 - \frac{d(x_{k,m}^* \oplus x^{(j)})}{d_{k,m}^*}, \quad (7)$$

де $x_{k,m}^{*(r)}$, $x^{(j)}$ – еталонний вектор-реалізація класу $X_{k,m}^{(r)}$ і реалізація класу, що розпізнається, відповідно; $d_{k,m}^{*(r)}$ – оптимальний радіус контейнера класу $X_{k,m}^{(r)}$, побудований на етапі навчання.

Таким чином, ієрархічний алгоритм екзамену складається з послідовних процедур визначення максимальної функції належності (7) реалізації, що розпізнається, класу першого ярусу ієрархічної структури, переходу на відповідну страту другого ярусу, визначення максимальної функції належності для алфавіту класів цієї страти і так до тих пір, поки не буде знайдено фінальну вершину, яка не утворює свою страту.

Висновки

1. Запропоновано ієрархічний інформаційно-екстремальний алгоритм розпізнавання електроннограм, одержаних в електронній мікроскопії у режимі мікродифракції, який шляхом оптимізації у процесі навчання параметрів функціонування за інформаційним критерієм дозволяє підвищити достовірність розпізнавання та зменшити чутливість системи до збільшення потужності інформаційного фонду електроннограм. При цьому оброблення електроннограм у полярних координатах дозволяє забезпечити інваріантність алгоритму розпізнавання до їх зсуву та повороту.

2. У перспективі при розширенні інформаційного фонду електроннограм для побудови безпомилкових за навчальною вибіркою вирішальних правил необхідно здійснювати оптимізацію додаткових просторово-часових параметрів функціонування системи розпізнавання.

Список літератури: 1. Томас Г., Гориндж М.Дж. Просвечивающая электронная микроскопия материалов: Пер. с англ. / Под ред. Б.К. Вайнштейна. М.: Наука. 1983. 320 с. 2. Васильев В.И. Распознающие системы: Справочник. 2-е изд., перераб. и доп. Киев: Наук. думка, 1983. 422 с. 3. Duda R. O., Hart P. E., Stork D. G. Pattern Classification, second ed. John Wiley & Sons, New York, 2001. 738 p. 4. Shalkoff R.J. Digital image processing and computer vision. New York-Chichester-Brisbane-Toronto-Singapore: John Wiley & Sons, Inc., 1989. 489 p. 5. Красноясовський А.С. Інформаційний синтез інтелектуальних систем керування, що навчаються: Підхід, що ґрунтується на методі функціонально-статистичних випробувань. Суми: Видавництво СумДУ, 2003. 257 с. 6. Красноясовський А.С., Козинець М.В., Шелехов І.В. Розпізнавання електроннограм в електронній мікроскопії // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. Харьков: Нац. аерокосмический ун-т «ХАИ», 2002. Вып. 12. С. 140–146. 7. Довбиш А.С., Мартиненко С.С. Інформаційно-екстремальний метод розпізнавання електроннограм // Вісник СумДУ. Технічні науки. 2009. №2. С. 85-91.

Надійшла до редколегії 13.07.2009

Довбиш Анатолій Степанович, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри інформатики Сумського державного університету. Наукові інтереси: інформаційний аналіз і синтез інтелектуальних систем, що навчаються (самонавчаються). Адреса: Україна, 40035, Суми, вул. Заливна, б. 7, кв. 40, тел. (0542) 77-08-27, e-mail: kras@id.sumdu.edu.ua.

Алтиннікова Катерина Василівна, аспірантка кафедри інформатики Сумського державного університету. Наукові інтереси: інформаційний аналіз і синтез інтелектуальних систем, що навчаються (самонавчаються). Захоплення та хобі: туризм та плавання. Тел. (0542) 77-08-27, e-mail: mejal3@mail.ru.