

# АВТОФОКУСУВАННЯ ЕЛЕКТРОННОГО МІКРОСКОПУ ЗА ЗОБРАЖЕННЯМ

*А.С. Краснополюсовський, А.М. Скаковська*

Сумський державний університет  
вул. Римського-Корсакова, 2, м.Суми, 40007  
33-03-90, факс (0542) 33-40-58  
E-mail: pm@ssu.sumy.ua

Розглядається застосування методу функціонально-статистичних випробувань (МФСВ), оснований на оцінці інформаційної здатності системи розпізнавання образів, для класифікаційної настройки (КН) складного об'єкту контролю та управління.

## ВСТУП

Важливою задачею в електронній мікроскопії є автофокусування растрового електронного мікроскопу (РЕМ). Це особливо актуально, наприклад, при автоматичній класифікації об'єктів дослідження, яка вимагає додержання незмінних і однакових умов для прийняття високостовірних рішень. До цього часу невідомі ефективні алгоритми розв'язання цієї задачі. Розглянемо підхід до розв'язання задачі автофокусування РЕМ за зображенням в рамках МФСВ [1,2].

## 1 ТЕОРЕТИЧНІ ТА МЕТОДОЛОГІЧНІ ПОЛОЖЕННЯ ПІДХОДУ

Фокусність зображення досліджуваного зразка залежить від багатьох факторів, які впливають на функціонування електронного мікроскопу. Для РЕМ в якості управляючого контрольованого параметру виступає струм об'єктивної лінзи  $I_L$ . Ідея автофокусування РЕМ полягає в обчисленні інформаційної міри початкового (базового) розфокусованого зображення  $X_0$  відносно

поточного зображення  $X_S$ , яке встановлюється на  $S$ -ому кроці КН, порівнянні її значення з попереднім і прийнятті рішення про зміну управляючого параметру на задану величину. Процес КН продовжується до тих пір, поки значення струму  $I_L$  не забезпечить прийнятної з практичної точки зору фокусності зображення. В якості критерію функціональної ефективності (КФЕ) КН розглянемо інформаційну міру Кульбака, яка є добутком відношення правдоподібності  $\Lambda$  на міру відхилень розподілів ймовірностей. В загальному випадку відношення правдоподібності подамо у вигляді

$$\Lambda = \log_2 \frac{P_i}{P_f} = \frac{p_1 D_1 + p_2 D_2}{p_1 \alpha + p_2 \beta}, \quad (1)$$

де  $P_i = p_1 D_1 + p_2 D_2$ ,  $P_f = p_1 \alpha + p_2 \beta$  - повні ймовірності правильного і неправильного прийняття рішень відповідно;  $p_1, p_2$  - апіорні ймовірності появи відповідних подій;  $\alpha, \beta, D_1, D_2$  - точнісні характеристики: помилки першого та другого роду, перша та друга достовірності відповідно. При допущенні, що  $p_1 = p_2 = 0.5$  (найгірші в статистичному сенсі умови) міра Кульбака набуває вигляду

$$E = 0,5 \log_2 \left( \frac{D_1 + D_2}{\alpha + \beta} \right) [(D_1 + D_2) - (\alpha + \beta)] = \log_2 \left( \frac{2 - (\alpha + \beta)}{\alpha + \beta} \right) [1 - (\alpha + \beta)]. \quad (2)$$

При введенні оцінок  $\alpha = k_1/n^*$ ,  $\beta = k_2/n^*$ , де  $k_1, k_2$  - число реалізацій класів  $X_0$  і  $X_S$  відповідно, які не знаходяться в області своїх класів;  $n^*$  - кількість спостережень, які забезпечують репрезентативність вибіркової послідовності. Тоді формула (2) набуває робочого вигляду

$$E = \frac{1}{n} \log_2 \left\{ \frac{2n + 10^{-r} - [k_1 + k_2]}{[k_1 + k_2] + 10^{-r}} \right\} * [n - (k_1 + k_2)], \quad (3)$$

де  $r$  - число цифр у мантисі значення критерію  $E$ , яке вводиться на випадок появи нульових емпіричних частот. В якості розділяючої гіперповерхні (РГП) у першому наближенні береться гіперсфера, центром якої є еталонний вектор (ЕВ)  $x_0 \in X_0$ .

## 2 ОБРОБКА ЗОБРАЖЕННЯ

Оскільки сучасні ЕОМ дозволяють розрізняти 256 градаций чорно-білого зображення, то його обробку доцільно здійснювати шляхом сканування рецепторного поля, що є природним для РЕМ, і побудови розподілу яскравості для кожного рядка рецепторів. Квантовані в часі криві розподілів яскравості розглядаються як випадкові реалізації зображення  $\{g_{0,n}^{(j)}\}$ , де  $n = \overline{1, n^*}$ ;  $j = \overline{1, J_{\max}}$  - змінна числа рецепторів у рядку.

З метою формування бітового масиву значень реалізацій  $\{x_{0,n}^{(j)}\}$  здійснюється їх квантування на два рівні за формулою

$$x_n^j = \begin{cases} 1, & \text{if } A_H \leq g_n^{(j)} \leq A_B; \\ 0, & \text{if } \text{else} \end{cases}, \quad (4)$$

де  $A_H, A_B$  - нижній і верхній контрольний допуски на рецептори. Оптимізація контрольних допусків в інформаційному сенсі здійснюється безпосередньо в рамках алгоритму КН. За початкові значення  $A_H$  і  $A_B$  приймаються відповідно

$A_H = A_0 - \Delta$  і  $A_B = A_0 + \Delta$ , де  $A_0$  - номінальне (середнє) значення яскравості зображення. Оскільки двобічне поле контрольних допусків вибрано симетричним, то початкове значення  $\Delta$  дорівнює чверті шкали яскравості, тобто 64. Формування бінарного ЕВ базового класу  $X_0$  здійснюється за формулою

$$x_0^{(j)} = \begin{cases} 1, & \text{if } \sum_{n=1}^{n^*} x_{0,n}^{(j)} \geq n^*/2; \\ 0, & \text{if } \text{else}. \end{cases} \quad (5)$$

Аналогічно обробляється поточне зображення  $X_S$ . Отже, в процесі обробки зображень  $X_0$  і  $X_S$  здійснюється формування вхідних даних, які за МФСВ необхідні для обчислення інформаційної міри між базовим і поточним зображеннями. Такими вхідними даними є ЕВ  $x_0, x_s$  і відповідно випадкові реалізації  $\{x_{0,n}^{(j)}\}, \{x_{s,n}^{(j)}\}$ .

Визначення оптимальної в інформаційному сенсі кодової відстані  $d_0^*$  - радіуса РГП, здійснюється за послідовним алгоритмом

$$d_0(k) = d_0(k-1) + \begin{cases} h, & \text{if } E[d(k-1)] < E[d(k)]; \\ 0, & \text{if } E[d(k-1)] \geq E[d(k)], \end{cases}$$

де  $k$  - число прирощень радіуса;  $h$  - крок прирощення. Обчислення КФЕ закінчується при знаходженні екстремального значення  $E^* = \max_{\{d\}} E$ ,

де  $\{d\} = \{1, 2, \dots, d(x_0 \oplus x_s)\}$  - множина радіусів РГП класу  $X_0$ ;  $d(x_0 \oplus x_s)$  - міжцентрова кодова відстань.

Оптимізація контрольних допусків здійснюється після вибору  $d_0^*$  для базового класу  $X_0$ , за алгоритмом

$$\{\delta_{k,i}\} = \{\delta_{k,i}^*\}, \quad \text{якщо} \\ E^*[\{\delta_{k,i}^*\}, d_0^*] = \max_{\{\delta_{e,i}^*\}} E^*[d_0^*], \quad \text{де } \{\delta_{e,i}\} - \text{система}$$

нормованих полів допусків на рецептори.

### 3 ОПИС АЛГОРИТМУ

Означимо три класи функціонального стану РЕМ:  $X_H^0$ , який відповідає прийнятній фокусності, тобто оцінці "НОРМА";  $X_M^0$ , який відповідає значенню параметру  $I_L$  "МЕНШЕ НОРМИ";  $X_B^0$ , який відповідає значенню параметру  $I_L$  "БІЛЬШЕ НОРМИ". Зрозуміло, що класи  $X_M^0$  і  $X_B^0$  мають розфокусовані зображення різного ступеню. Умовою запуску алгоритму є вихід РЕМ зі стану, що відповідає класу  $X_H^0$ . За базовий клас  $X_0$  приймемо стан РЕМ на момент запуску алгоритму КН. На рис.1 наведено структурну схему алгоритму автофокусування РЕМ в рамках МФСВ.



Рисунок 1.

Формування класу  $X_0$  відбувається таким чином:

1 Зчитується масив значень яскравості зображення базового класу  $X_0$ .

2 Здійснюється вибір початкових допусків  $A_H$  і  $A_B$ .

3 Формується бінарний масив  $BM0[N, J]$  за процедурою (4).

4 Формується ЕВ  $EVO[J]$  шляхом статистичного усереднення масиву  $BM0[N, J]$  за процедурою (5).

Після визначення напрямку зміни струму  $I_L$  шляхом встановлення приналежності класу  $X_0$  до одного із класів  $X_M^0$  або  $X_B^0$  обирається стратегія зміни  $I_L$  на кожному кроці КН.

Поточне зображення  $X_S$  формується аналогічно  $X_0$  при незмінних контрольних допусках. КФЕ обчислюється за формулою (3) в рамках наведених процедур оптимізації параметрів навчання [2].

### 4 РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМУ

Реалізація розглянутого алгоритму здійснювалася для автофокусування серійного мікроскопу РЕМ-103 виробництва АТ СЕЛМІ (м.Суми, Україна), для якого сталий струм обмотки об'єктивної лінзи змінюється в діапазоні 0.3-2.0 А. При цьому значення струму  $I_N$ , яке відповідає класу  $X_H^0$ , знаходиться в інтервалі 1.08-1.32 А і залежить від багатьох внутрішніх і зовнішніх випадкових факторів функціонування РЕМ. Прирощення струму  $I_L$  на кожному кроці КН здійснювалося шляхом поділу навпіл різниці між розрахованим (номінальним) і поточним його значеннями. На рис.2 наведено зображення досліджуваного зразка: базове розфокусоване зображення (рис. 2,а), зображення після першого кроку настройки (рис. 2,б) і екстремальне сфокусоване зображення (рис. 3,в).

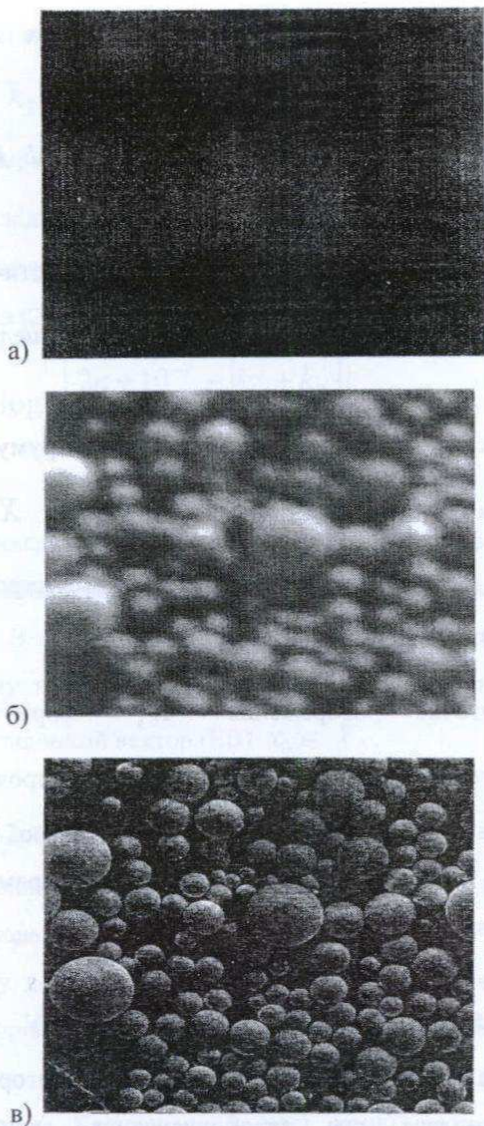


Рисунок 2.

На рис.3,а наведено значення нормованого критерію (3), при  $S=1$  і на рис. 3,б - для екстремального кроку настройки. Тут  $P$  - площа робочої області значень КФЕ, яка обчислюється на кожному кроці КН за умови, що  $D_1, D_2 \geq 0.5$ , і на рис.3 визначається затемненою частиною графіку.

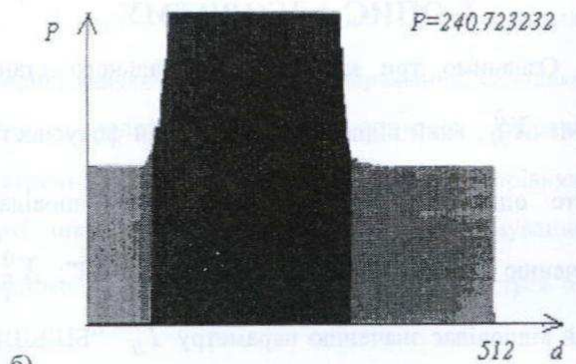
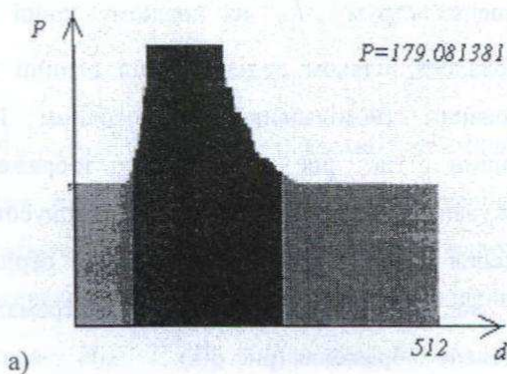


Рисунок 3.

Тривалість автофокусування для розглянутого базового зображення становила 5с, що обумовлено інерційністю управляючої обмотки об'єктивної лінзи.

## ВИСНОВКИ

- 1 Автонастройка складної системи розглядається як ітераційна процедура пошуку максимуму інформаційної міри різноманітності базового початкового образу настройки і образами, що формуються на наступних кроках настройки.
- 2 Обчислення КФЕ на поточному кроці КН здійснюється в рамках алгоритму навчання за МФСВ.
- 3 Автофокусування РЕМ за розглянутим алгоритмом КН є цілеспрямованою ітераційною процедурою, яка здійснюється в межах прийнятної з практичних міркувань оперативності при довільних початкових умовах.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Краснополюсовський А.С. Технічна діагностика складних систем за методом функціонально-статистичних випробувань//Обробка сигналів та розпізнавання образів: Праці третьої Всеукраїнської міжнародної конференції, 1996.- С.174-177.
2. Краснополюсовський А.С., Черниш А.В. Оцінка функціональної ефективності навчання системи розпізнавання. Вісник СумДУ, 1997.-№2.- С.112-118.