

Р. Н. Кветний, д. т. н., проф.; О. Ю. Софіна

## ОПТИМІЗАЦІЯ МЕТОДУ ІНВЕРСНОЇ РЕЗОНАНСНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ В ЗАДАЧАХ РОЗПІЗНАВАННЯ ОБ'ЄКТІВ НА ТЕКСТУРОВАНОМУ ФОНІ

*У роботі розглянуто новий підхід до розв'язання задач розпізнавання об'єктів на текстурованому фоні. Запропоновано виконувати фільтрацію текстур за допомогою інверсного резонансного фільтра (ІРФ). Синтез фільтра ґрунтується на апроксимації поверхні фону рядом Фур'є, який складають принципові власні двовимірні коливання фону.*

**Ключові слова:** інверсна фільтрація, дискретне перетворення Фур'є, власні коливання.

Розпізнавання об'єктів на фоні текстурованих зображень є однією з основних задач у системах відеовимірювання (visual basing) та відеоконтролю. Розпізнавання здійснюють за допомогою усунення впливу фону та виділення об'єктів, що відрізняються від нього за статистичними, структурними або динамічними властивостями. Для цього потрібно синтезувати фільтр відповідного типу. Основні методи аналізу текстур представлено в оглядах [1 – 5].

Переважає більшість методів аналізу текстурованих зображень працюють як класифікатори за рядом статистичних або спектральних параметрів. Коли ж стоїть задача фільтрації фону із виділенням неоднорідності, то її реалізація за допомогою фільтрів-класифікаторів є занадто об'ємною та складною. Найефективнішими для розв'язання такої задачі є методи на основі авторегресивних фільтрів. Але ці методи погано відображають зміну постійної складової сигналу зображення, тому що вона відповідає зміні амплітуди гармоніки з нульовою частотою в спектральній характеристиці моделі. Відомо, що моделі авторегресії відображають саме частотні властивості сигналу і з амплітудним спектром пов'язані лише опосередковано [6]. Зміна постійної складової зображення є однією з важливих ознак, оскільки може означати зміну градації сірого кольору або зміну освітленості. Щоб модель авторегресії була чутлива до зміни постійної складової, потрібно використовувати її нелінійний варіант із складовими другого та більш високого порядку [7 – 9]. Такий підхід було вдосконалено на основі фільтрації текстур за допомогою інверсного резонансного фільтра (ІРФ) [10, 11]. Синтез фільтра ґрунтується на апроксимації поверхні фону рядом Фур'є, який складають принципові власні двовимірні коливання фону. При цьому також, на відміну від моделей авторегресії, враховуються амплітуди гармонік. Як показали чисельні експерименти з тестування методу, аналіз складних зображень фону, наприклад, квазірегулярного, динамічного, потребує синтезу ІРФ високого порядку – не менше 64x64. Для синтезу такого фільтра необхідно визначити 32 пари комплексно спряжених резонансних коливань по кожній із просторових координат, тоді як їх реально може бути значно менше. Реалізація ІРФ за допомогою операції двовимірної згортки потребує великого об'єму обчислень. Отже, в роботі поставлено проблему розв'язання задачі синтезу ІРФ високого порядку та його ефективної реалізації з використанням швидких дискретних перетворень Фур'є (ДПФ).

**Метою** цієї роботи є підвищення ефективності фільтрації за рахунок розробки швидкого алгоритму фільтрації на основі ДПФ в базисі функцій, що відповідають резонансним коливанням поверхні фону.

Оператор одновимірного ДПФ можна представити в матричному вигляді як

$$\mathbf{F}_N(k, x) = [\exp -i2\pi(kx/N)]_{k,x=0\dots N-1} \quad (1)$$

Якщо  $N = m^n$ , де  $m, n$  – довільні константи, то матрицю (1) можна факторизувати – представити як добуток більш простих матриць. Факторизоване представлення дає алгоритм швидкого перетворення Фур'є [12]. Запишемо його в такій формі [13]

$$\mathbf{F}_N(k, x) = \prod_{i=1}^n \mathbf{W}_i(k, x) = \prod_{i=1}^n (\mathbf{V}_m(v_i) \otimes \mathbf{I}_{m^{n-i}}(k^i, x^i) \otimes \Omega_m(m^{i-1}k^i, v_i, u_i) \otimes \mathbf{I}_{m^{i-1}}) \quad (2)$$

$$k = k^i + \sum_{j=1}^i v_j m^{n-j}; \quad x = m^i x^i + \sum_{j=1}^i u_j m^{j-1}$$

де  $\otimes$  – операція прямого або тензорного множення [12],  $\mathbf{I}_{m^{n-i}}(k^i, x^i)$  – одинична діагональна матриця, індекс вказує на її розмір, номери її рядків та стовпців  $k^i$ ,  $x^i = 0, 1, \dots, N/m^i - 1$ , індекси  $u_i = 0, 1, \dots, m-1$  разом з  $x^i$  вказують на номери елементів вектора даних, що множаться на фазообертаючу матрицю

$$\Omega_m(k^i, v_i, u_i) = \left[ \exp \left( -i \frac{2\pi}{N} \left( k^i + v_i \frac{N}{m} \right) u_i \right) \right]_{v_i, u_i = 0, \dots, m-1} \quad (3)$$

де індекси  $v_i = 0, 1, \dots, m-1$  разом з  $k^i$  вказують на елементи вектора добутку. Вираз (2) можна узагальнити для випадку, коли  $N$  є добутком довільних цілих чисел [13]. Нехай  $N = pm^{n-1}$  і матриця (3) для  $i=1$  має такий вигляд:

$$\Omega_p(k^1, v_1, u_1) = \left[ \exp \left( -i \frac{2\pi k^1 u_1}{N} \right) \exp \left( -i \frac{2\pi v_1 u_1}{p} \right) \right]_{v_1, u_1 = 0, \dots, p-1} \quad (4)$$

Другий множник в (4) утворює елементи оператора ДПФ, коли  $N = p$ . Замінімо його елементами аналогічної матриці з резонансними частотами й отримаємо наступний вираз:

$$\Omega_p(k^1, v_1, u_1) = \left[ \exp \left( -i \frac{2\pi k^1 u_1}{N} \right) \exp(-i2\pi v_1 f_{u_1+1}) \right]_{v_1, u_1 = 0, \dots, p-1} \quad (5)$$

Підставимо матрицю (5) у вираз для ДПФ (2) і отримаємо оператор, який назвемо як оператор дискретного перетворення Фур'є з власним ядром (ДПФВЯ) по відношенню до деякого сигналу, що характеризується рядом резонансних частот  $f_1 \dots f_p$ . Запишемо це перетворення у факторизованій формі

$$\mathbf{F}'_N(k, x) = (\mathbf{V}_p(v_1) \otimes \mathbf{I}_{m^{n-1}}(k^1, x^1) \otimes \Omega_p(k^1, v_1, u_1)) \prod_{i=2}^n \mathbf{W}'_i(k, x) \quad (6)$$

$$\begin{cases} i=1: k = k^1 + v_1 m^{n-1}; x = px^1 + u_1. \\ i>1: k = k^i + \sum_{j=1}^i v_j pm^{n-j-1}; x = pm^{i-1}x^i + \sum_{j=1}^i u_j pm^{j-2} \end{cases}$$

$$\text{де } \mathbf{W}'_i(k, x) = \prod_{i=1}^n \left( \mathbf{V}_m(v_i) \otimes \mathbf{I}_{m^{n-i}}(k^i, x^i) \otimes \Omega_m(pm^{i-2}k^i, v_i, u_i) \otimes \mathbf{I}_{pm^{i-2}} \right).$$

Оберненим до перетворення (6) є аналогічне перетворення  $\mathbf{F}'_N^{-1}(k, x)$ , що відрізняється комплексно-спряженими значеннями елементів матриць (3) та матрицею (5),

$$\Omega_p^{-1}(k^1, v_1, u_1) = \left[ \exp\left(i \frac{2\pi k^1 u_1}{N}\right) \varphi_{v_1 u_1} \right]_{v_1, u_1=0, \dots, p-1}$$

де  $\varphi_{v_1 u_1}$  – елементи матриці, оберненої до матриці з елементами  $\exp(-i2\pi v_1 f_{u_1+1})$ .

Для визначення фільтра розміром  $N_x \times N_y$ , де  $N_x = Pm_x^{n_x-1}$  та  $N_y = Qm_y^{n_y-1}$ , можна синтезувати ДПФВЯ (6) з  $p = P$ ,  $m = m_x$  та  $p = Q$ ,  $m = m_y$ .

Представлення матриці поверхні базової області  $\mathbf{U}_b$  за допомогою ДПФВЯ можна записати як

$$\mathbf{U}_b \cong \mathbf{F}'_{N_x} \mathbf{A} \mathbf{F}'_{N_y}{}^T \quad (7)$$

Елементи матриці імпульсної перехідної характеристики в спектральній області мають вигляд  $H_{m,n} = E_{m,n} A_{m,n}^{-1}$ , де  $A_{m,n}$  – елементи спектральної матриці в (7),

$E_{m,n} = \sum_{i,k=0}^{N_x-1, N_y-1} z_{xm}^i z_{yn}^k$ ,  $z_{x(y)m}^i$  – функції базису. Фільтрацію в спектральній області фрагментів

поверхні можна записати як послідовність матричних операцій

$$\Xi = \mathbf{F}'_{N_x} \mathbf{H} \left( \mathbf{F}'_{N_x}^{-1} \mathbf{U} \mathbf{F}'_{N_y}{}^{-1T} \right) \mathbf{F}'_{N_y}{}^T \quad (8)$$

де  $\Xi$  – матриця сигналу розходження. Статистичний аналіз даного сигналу дозволяє виділити неоднорідності. Для фільтрації у просторовій області матрицю імпульсної перехідної характеристики ІРФ можна визначити як

$$\mathbf{h} = \mathbf{F}'_{N_x}{}^{-1} \mathbf{H} \mathbf{F}'_{N_y}{}^{-1T} \quad (9)$$

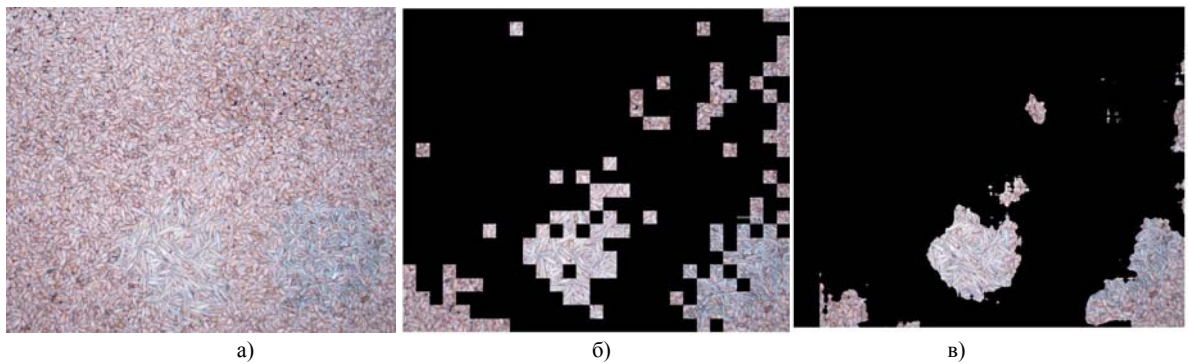


Рис. 1. а) оригінальне зображення; б) визначення об'єктів на текстурованому фоні за допомогою фільтрації в спектральній області; в) визначення об'єктів на текстурованому фоні за допомогою фільтрації у просторовій області

Фільтрація у просторовій області виконується за допомогою двовимірної згортки сигналу поверхні з перехідною характеристикою (9). Фільтрація у спектральній області може виконуватись у повному обсязі за допомогою операції згортки (8) із послідовним зміщенням елементів матриці  $U$  або шляхом експрес-аналізу послідовності фрагментів розміром  $N_x \times N_y$ . З погляду мінімізації числа операцій фільтрацію краще виконати у два етапи. На першому етапі виконати експрес-аналіз, на другому – більш точний аналіз виділених фрагментів за допомогою операції згортки в спектральній або просторовій області. Методи фільтрації було досліджено за допомогою тестового прикладу зображення розміром  $2048 \times 2048$  пікселів, який представлено на рис. 1. На текстурованому фоні – зерна пшениці, є три типи неоднорідності – мокре зерно, зерна вівса та жита. Порядок фільтра  $96 \times 96$ . Для синтезу фільтра утворено базис ДПФВЯ на множині відліків  $N_{x(y)} = 6 \cdot 2^4$ . Результати експрес-аналізу в спектральній області представлено на рис. 1б, результати фільтрації в просторовій області – на рис. 1в. Аналогічні результати було отримано з використанням базису функцій, утворених за допомогою резонансних частот. Тобто, підхід на основі ДПФВЯ дав рівноцінний за якістю результат фільтрації при значно меншому числі операцій за рахунок використання швидкого ДПФ. Оцінимо вигоду у кількості операцій. Для реалізації фільтрації в просторовій області необхідно  $96 \times 96 = 9216$  операцій множення та додавання на один піксель. Перетворення (8) без використання швидкого алгоритму потребує 2305 аналогічних операцій на піксель. Одна операція швидкого ДПФВЯ потребує  $(16 \times 4 \times 6 + 6 \times 6 \times 16) \times 6 = 5720$  операцій. Двовимірне ДПФ у (8) виконується для  $96 + 96$  стовпців і рядків двічі – пряме та обернене. У сумі – 241 операція на один піксель фрагмента розміром  $96 \times 96$ , тобто майже в 24 рази менше в порівнянні з фільтрацією в просторовій області і майже в 10 раз менше в порівнянні із звичайним базисом ДПФ. Звичайно, якість фільтрації дещо менша, але виділені фрагменти та прилягаючі до них можна відфільтрувати більш точно. У результаті можна отримати зображення виду 1б.

У роботі розглянуто реалізацію ІРФ для фільтрації неоднорідностей текстурованих зображень. Запропоновано новий тип базисів функцій для експрес-аналізу зображень у спектральній області. Базиси враховують резонансні властивості зображення і мають структуру швидких перетворень, що дозволяє значно зменшити число операцій. На відміну від відомих базисів [12, 13] базиси ДПФВЯ не ортогональні і частково мультиплікативні.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Tuceryan M., Anil K. J. Texture analysis. Handbook of pattern recognition & computer vision. – World Scientific Publishing Co., Inc, River Edge, NJ. – 1993. – 643 p.
2. Reed T. R., Hans du Buf J. M. A review of recent texture segmentation and feature extraction techniques // CVGIP: Image Understanding. – 1993. – V.57. – P. 359-372.

3. Connors R.W., Harlow C.A. A Theoretical Comparison of Texture Algorithms // IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1980. – V. 2. – № 3. – P. 204-221.
4. S. Soatto, G. Doretto, Y. N. Wu. Dynamic Textures // International Journal of Computer Vision. – 2003. – №. 2. – P. 91-109.
5. Randen T., Husoy J.H. Filtering for Texture Classification: A Comparative Study // IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1999. – V. 21. – № 4. – P. 291-310.
6. Буняк Ю.А. Операторная модель авторегрессии и скользящего среднего // Радиоэлектроника. – 1998. – Т. 41. – №9. – С. 53-60.
7. Кветний Р.Н, Буняк О.Ю. Використання моделей двохвимірної передбачення з квадратичною нелінійністю для розпізнавання об'єктів на динамічному фоні // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2006. – №1. – С. 156-159.
8. Кветний Р.Н, Буняк О.Ю. Розпізнавання об'єктів на динамічному фоні за допомогою моделей двохвимірної нелінійної передбачення // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2007. – №1. – С. 189-192.
9. Kvetny R., Bunyak O. Objects recognition on dynamic background using two-dimensional prediction models with quadratic nonlinearity // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2007. – №1. – 4 с.
10. Кветний Р.Н, Буняк Ю.А, Буняк О.Ю. Модели динамического фона в задачах распознавания объектов // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. – 2007. – №7 (26). – С. 227-232.
11. Bunyak O. Object recognition in image-based systems using resonance inverse filtering // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – Спецвипуск, 2007. – С. 63-66.
12. Трахтман А.М., Трахтман В.А. Основы теории дискретных сигналов на конечных интервалах. – М.: Сов. радио, 1975. – 208 с.
13. Буняк Ю.А. Класс дискретных ортогональных систем субэкспоненциальных функций // Изв. АН СССР. Радиотехника и электроника. – 1989. – Т. 34. – №6. – С. 1300-1303.

**Кветний Роман Наумович** – д. т. н., професор, завідувач кафедри автоматичної та інформаційно-вимірювальної техніки, тел.: (0432)-531675.

**Софін Ольга Юрївна** – аспірант кафедри автоматичної та інформаційно-вимірювальної техніки, e-mail: olyasof@mail.ru, тел.: (0432)-657524.

Вінницький національний технічний університет.