

УДК 004.93+519.2

Б. О. Капустій, О. В. Надобко, В. М. Репік

РОЗПІЗНАВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ ЦИФРОВИХ ФІЛЬТРІВ З МОДИФІКОВАНИМИ ІМПУЛЬСНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

General conception of recognition of images with noises using nonrecursive digital filters is formed. The scheme of algorithm of correlated image recognition is proposed. The influence of recognition system parameters on the authentication of true identification of image with etalon is investigated.

Key words: *pattern recognitions, not recursive digital filters, Cappellini window.*

Сформульовано загальну концепцію щодо розпізнавання зашумлених зображень за допомогою нерекурсивних цифрових фільтрів. Запропоновано блок-схему алгоритму кореляційного розпізнавання зображень. Досліджено вплив параметрів системи розпізнавання на достовірність правильної ідентифікації зображення з еталоном.

Ключові слова: *розпізнавання образів, нерекурсивні цифрові фільтри, вікно Капеліні.*

Постановка задачі. Розпізнавання двовимірних зображень здійснюється за допомогою автоматизованих систем їх цифрової обробки. Для цього первинне зображення перетворюється у цифрову форму, що являє собою двовимірний масив дійсних чисел (відліків) $x(n_1, n_2)$, кожне з яких відповідає яскравості елемента зображення [1].

Актуальною задачею є розробка ефективної системи, яка використовує такі масиви для розпізнавання зображень у реальному часі. Відновлення зашумлених зображень, заданих багатокомпонентними іконічними моделями [2], здійснюється в системі шляхом їх обробки у двовимірних цифрових фільтрах. Для підвищення швидкості фільтрації та забезпечення стійкості ці фільтри мають бути нерекурсивними (СІХ-фільтрами). Разом з тим, у СІХ-фільтрах накладаються обмеження на кількість відліків імпульсної характеристики та величину пульсацій, створюваних ними у смузі пропускання. Тому в системі розпізнавання запропонована ефективна модифікація імпульсної характеристики СІХ-фільтрів, яка полягає в перемноженні виборок безмежної імпульсної характеристики ідеального низько-частотного фільтра-прототипу на вибірки коректуючого “вікна” Капеліні [3].

Двовимірні масиви відліків відновленого та еталонного зображень використовують для обчислення міри подібності. Як простий й зрозумілий критерій подібності вибрано величину відношення взаємкореляційної функції відновленого та еталонного зображень до автокореляційної функції еталона.

Всебічне дослідження достовірності правильного розпізнавання при малих значеннях відношення сигнал/шум дає змогу здійснювати параметричний синтез розробленої системи із заданою надійністю функціонування.

Теоретичні основи. Будемо вважати, що двовимірною частотною характеристикою ідеального фільтра-прототипу є функція $H(e^{j\omega_1}, e^{j\omega_2})$, періодична за частотами ω_1 та ω_2 . Якщо ці просторові частоти нормовані по частоті дискретизації, то період частотної характеристики становить 2π .

Відліки $h(n_1, n_2)$ ідеальної імпульсної характеристики можна отримати шляхом обчислення коефіцієнтів двовимірного ряду Фур'є періодичної частотної характеристики (здійснивши зворотне перетворення Фур'є). Для синтезу практично

© Б. О. Капустій, О. В. Надобко, В. М. Репік, 2010

реалізованого СІХ-фільтра необхідне вкорочення імпульсної характеристики з метою одержання матриці відліків скінченних розмірів $N_1 \times N_2$. Цього можна досягнути шляхом домноження відліків $h(n_1, n_2)$ на вибірки функції “вікна” $w(n_1, n_2)$, рівної нулю поза межами заданої області.

У випадку непарності N_1 та N_2 відліки модифікованої імпульсної характеристики некаузального фільтра набувають вигляду

$$h^*(n_1, n_2) = h(n_1, n_2) \cdot w(n_1, n_2), \quad (1)$$

де $n_1 = -(N_1 - 1)/2, \dots, (N_1 - 1)/2$; $n_2 = -(N_2 - 1)/2, \dots, (N_2 - 1)/2$.

Двовимірна частотна характеристика модифікованого фільтра $H^*(e^{j\omega_1}, e^{j\omega_2})$ рівна згортці $H(e^{j\omega_1}, e^{j\omega_2})$ із $W(e^{j\omega_1}, e^{j\omega_2})$, де $W(e^{j\omega_1}, e^{j\omega_2})$ – перетворення Фур’є для послідовності $\{w(n_1, n_2)\}$. Функцію $H^*(e^{j\omega_1}, e^{j\omega_2})$ можна безпосередньо отримати в результаті прямого двовимірного перетворення Фур’є модифікованої імпульсної характеристики $h^*(n_1, n_2)$ із врахуванням лінійної фазової затримки, необхідної для забезпечення каузальності фільтра.

Для побудови СІХ-фільтрів запропоновано та використовують декілька функцій “вікна” [3]. Одна їх частина зручна через простоту, однак не дуже ефективна. Інша частина функцій “вікна” відповідає певним критеріям оптимальності передавальних характеристик цифрових фільтрів.

Прикладом найпростіших двовимірних “вікон” є одиничне “вікно”

$$w_{\text{rect}}(n_1, n_2) = \begin{cases} 1 & \text{і} \quad n_1 = -\frac{N_1 - 1}{2}, \dots, \frac{N_1 - 1}{2}; n_2 = -\frac{N_2 - 1}{2}, \dots, \frac{N_2 - 1}{2}; \\ 0 & \text{і} \quad \text{інакше} \end{cases} \quad (2)$$

У процесі синтезу двовимірних СІХ-фільтрів із покращеним виглядом частотної характеристики добрий результат дає застосування “вікна” Каппеліні

$$w_{\text{cap}}(n_1, n_2) = \left(\frac{\sin \frac{2\pi \cdot n_1}{N_1 - 1}}{\frac{2\pi \cdot n_1}{N_1 - 1}} \right)^{m_1} \cdot \left(\frac{\sin \frac{2\pi \cdot n_2}{N_2 - 1}}{\frac{2\pi \cdot n_2}{N_2 - 1}} \right)^{m_2}, \quad (3)$$

де $n_1 = -\frac{(N_1 - 1)}{2}, \dots, \frac{(N_1 - 1)}{2}$; $n_2 = -\frac{(N_2 - 1)}{2}, \dots, \frac{(N_2 - 1)}{2}$; $m_1 > 0$; $m_2 > 0$.

Цінність “вікна” Каппеліні полягає в тому, що за допомогою параметрів m_1 і m_2 можна керувати співвідношенням між шириною головного пелюстка частотної характеристики та площею під боковими пелюстками. Це дає змогу при будь-яких значеннях N_1 та N_2 отримувати різні перехідні смуги та амплітуди бокових пелюстків [3].

Якщо відліки імпульсної характеристики ідеального двовимірного фільтра допускають подання у вигляді $h(n_1, n_2) = h_1(n_1) \cdot h_2(n_2)$, а вибірки функції “вікна” – у вигляді $w(n_1, n_2) = w_1(n_1) \cdot w_2(n_2)$, то

$$h^*(n_1, n_2) = h_1^*(n_1) \cdot h_2^*(n_2), \quad (4)$$

де $h_1^*(n_1) = h_1(n_1) \cdot w_1(n_1)$; $h_2^*(n_2) = h_2(n_2) \cdot w_2(n_2)$.

Якщо виконується умова (4), двовимірну частотну характеристику модифікованого фільтра також можна записати як добуток двох одновимірних характеристик:

$$H^*(e^{j\omega_1}, e^{j\omega_2}) = H_1^*(e^{j\omega_1}) \cdot H_2^*(e^{j\omega_2}). \quad (5)$$

Це означає, що двовимірний фільтр фактично являє собою послідовне з'єднання двох одновимірних фільтрів, один із яких здійснює цифрову обробку елементів стрічок, а інший – елементів стовпців вхідного масиву.

Вхідний масив утворений множиною відліків зашумленого зображення, яке підлягає розпізнаванню. Під час опису неоднорідних просторових зображень використовуються багатоконпонентні іконічні моделі [2]. Найбільш вживаними є два варіанти таких моделей:

– двокомпонентна модель

$$x(n_1, n_2) = x_o(n_1, n_2) + x_\phi(n_1, n_2), \quad (6)$$

де $x_o(n_1, n_2)$ – складова, що описує невеликі об'єкти, а $x_\phi(n_1, n_2)$ – складова, що описує однорідне дискретне шумове поле;

– фоновая модель

$$x(n_1, n_2) = \lambda(n_1, n_2) \cdot x_o(n_1, n_2) + [1 - \lambda(n_1, n_2)] \cdot x_\phi(n_1, n_2), \quad (7)$$

де $x_o(n_1, n_2)$ – зображення об'єкта, $x_\phi(n_1, n_2)$ – зображення фону, а $\lambda(n_1, n_2)$ – функція маски об'єкта:

$$\lambda(n_1, n_2) = \begin{cases} 1 & \text{â ðì ÷êàð, çàéí ÿðèð í á°êðì ;} \\ 0 & \text{â òñ³ð æí ø èð òì ÷êàð ï èí ù èì è.} \end{cases} \quad (8)$$

Розробка структури та опис алгоритму роботи системи розпізнавання зображень. Розпізнавання зображень можна здійснити за допомогою системи, блок-схема алгоритму роботи якої наведена на рис. 1.

Блок формування двовимірної математичної моделі (ММ) еталонного зображення формує цю модель у вигляді матриці відліків $x_o(n_1, n_2)$ розмірністю $N_1 \times N_2$.

Блок формування двовимірної ММ шуму $x_\phi(n_1, n_2)$ призначений для формування шумового поля із математичним сподіванням

$$m_\phi = \frac{\sum_{n_1=1}^{N_1-1} \sum_{n_2=1}^{N_2-1} x_\phi(n_1, n_2)}{N_1 \cdot N_2} \quad (9)$$

та дисперсією

$$\sigma_\phi^2 = \frac{\sum_{n_1=1}^{N_1-1} \sum_{n_2=1}^{N_2-1} [x_\phi(n_1, n_2) - m_\phi]^2}{N_1 \cdot N_2}. \quad (10)$$

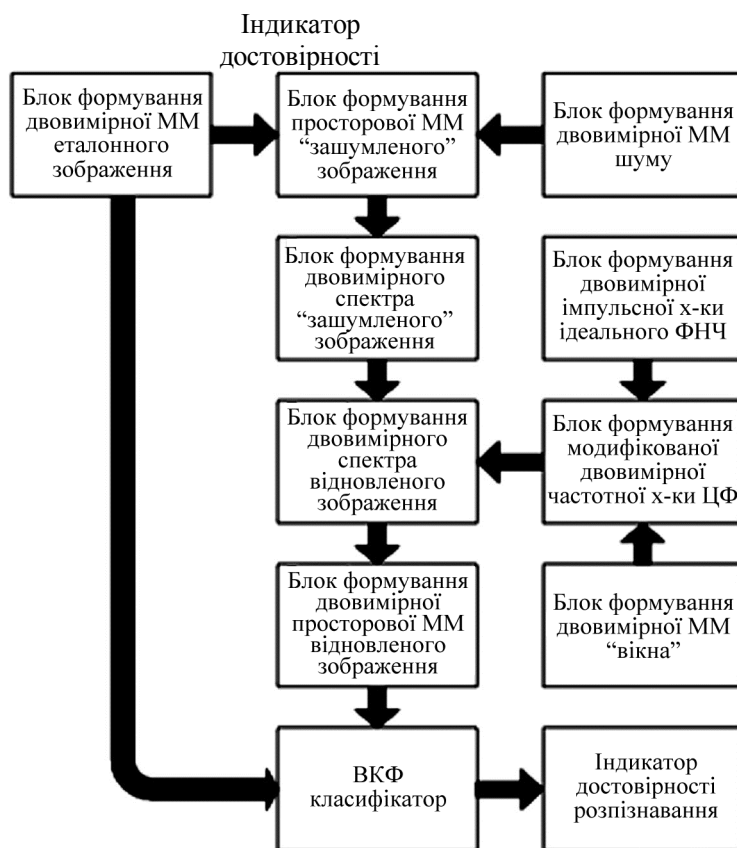
Під час використання фонові моделі (7) потрібно прийняти $m_\phi = m_u$ та $\sigma_\phi = \sigma_u$.

У блоці формування просторової ММ зашумленого зображення формуються двокомпонентна (6) та фоновая (7) моделі.

Блок формування двовимірного спектра зашумленого зображення забезпечує отримання такого спектра на основі двовимірного прямого перетворення Фур'є за формулою

$$S(e^{j\omega_1}, e^{j\omega_2}) = \sum_{n_1=1}^{N_1-1} \sum_{n_2=1}^{N_2-1} x(n_1, n_2) \cdot e^{-jn_1\omega_1} \cdot e^{-jn_2\omega_2}, \quad (11)$$

де $S(e^{j\omega_1}, e^{j\omega_2})$ – неперервна періодична функція просторових частот, причому $-\pi \leq \omega_1 \leq \pi$ та $-\pi \leq \omega_2 \leq \pi$.



розпізнавання

Рис. 1. Блок-схема алгоритму роботи системи розпізнавання зображень з ВКФ-класифікатором.

У блоці формування модифікованої двовимірної частотної характеристики ЦФ ця характеристика формується шляхом двовимірного прямого перетворення Фур'є модифікованої імпульсної характеристики СІХ-фільтра. Модифікована імпульсна характеристика відображається добутком функції "вікна" на нескінченну імпульсну характеристику ідеального ФНЧ із частотами зрізу ω_{sp1} та ω_{sp2} :

$$h(n_1, n_2) = \frac{\sin(n_1 \cdot \omega_{\zeta d1})}{\pi \cdot n_1} \cdot \frac{\sin(n_2 \cdot \omega_{\zeta d2})}{\pi \cdot n_2}. \quad (12)$$

Тут $n_1 = 0, \pm 1, \dots, \pm \infty$; $n_2 = 0, \pm 1, \dots, \pm \infty$; $0 \leq \omega_{sp1} \leq 2\pi$; $0 \leq \omega_{sp2} \leq 2\pi$.

У разі використання "вікон" (2) або (3) розрахунки можна спростити відповідно до співвідношень (4) та (5).

У блоці формування двовимірного спектра відновленого зображення $S_d(e^{j\omega_1}, e^{j\omega_2})$ відбувається перемноження модифікованої частотної характеристики двовимірного СІХ-фільтра на двовимірний спектр "зашумленого" зображення.

Блок формування двовимірної просторової ММ відновленого зображення створює цю модель шляхом двовимірного зворотного перетворення Фур'є спектра відновленого зображення за формулою

$$x_d(n_1, n_2) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} S_d(e^{j\omega_1}, e^{j\omega_2}) \cdot e^{jn_1\omega_1} \cdot e^{jn_2\omega_2} d\omega_1 d\omega_2. \quad (13)$$

У ВКФ-класифікаторі здійснюється аналіз подібності двовимірних просторових ММ відновленого та еталонного зображень за величиною відношення максимумів взаємної кореляційної (ВКФ) та автокореляційної (АКФ) функцій.

Відповідні максимуми розраховуються за формулами

$$\begin{aligned} \hat{A}_{\hat{A}\hat{E}\hat{O}}(0,0) &= \sum_{n_1} \sum_{n_2} x_0^2(n_1, n_2), \\ \hat{B}_{\hat{A}\hat{E}\hat{O}}(0,0) &= \sum_{n_1} \sum_{n_2} x_0(n_1, n_2)x_a(n_1, n_2). \end{aligned} \quad (14)$$

Тут $n_1, n_2 \in \sigma$, де σ – просторова область існування об'єкта.

Показником якості роботи системи розпізнавання є співвідношення

$$D = \frac{\hat{A}_{\hat{A}\hat{E}\hat{O}}(0,0)}{\hat{A}_{\hat{A}\hat{E}\hat{O}}(0,0)}, \quad (15)$$

яке можна інтерпретувати як достовірність розпізнавання (ДР). Залежність ДР від вхідного співвідношення сигнал/шум є визначальною для вибору інших параметрів системи розпізнавання (розмірів шумового поля, частот зрізу модифікованого СІХ-фільтра, типу “вікна”).

Експериментальні дослідження. Для дослідження алгоритму роботи системи розпізнавання (рис. 1) як еталон вибрано спрощене зображення фюзеляжу літака (рис. 2а). Еталонне зображення спотворюється білим шумом (рис. 2б) відповідно до двокомпонентної (6) або фонові (7) моделі. Скінченність імпульсної характеристики цифрового фільтра забезпечується “вікнами” двох типів: одиничним (2) та Каппеліні (3). У процесі проведення експериментів було прийнято $N_1 = N_2 = N$, $m_1 = m_2 = m$ та $\omega_{zp1} = \omega_{zp2} = \omega_{zp}$.

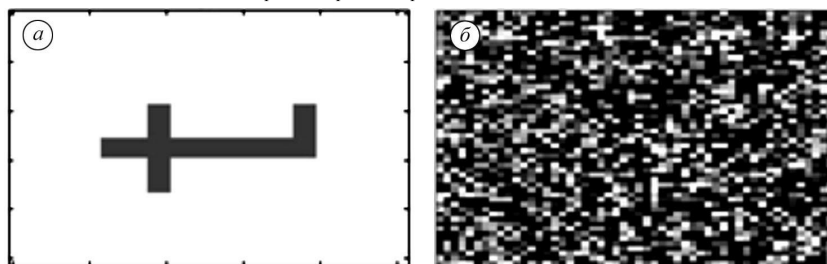


Рис. 2. Еталонне зображення фюзеляжу літака (а) та спотворюючий його білий шум (б).

Результати експериментального дослідження ДР зображення, заданого двокомпонентною моделлю, цифровим фільтром із “вікном” Каппеліні при $N = 51$, $m = 2$, $\omega_{zp} = 1,5$ та різних значеннях відношення сигнал/шум ілюструють рис. 3–5.

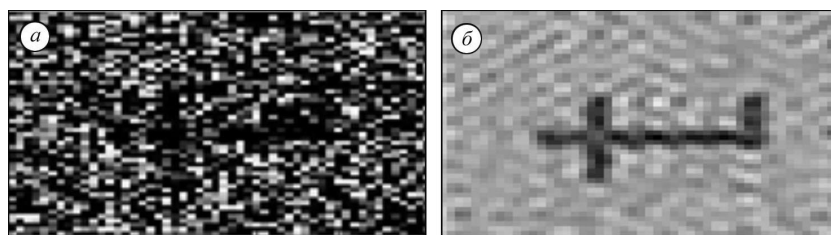


Рис. 3. Зашумлене (а) та відновлене (б) зображення, якщо $c/m = 0,7$ та $D = 0,75$.

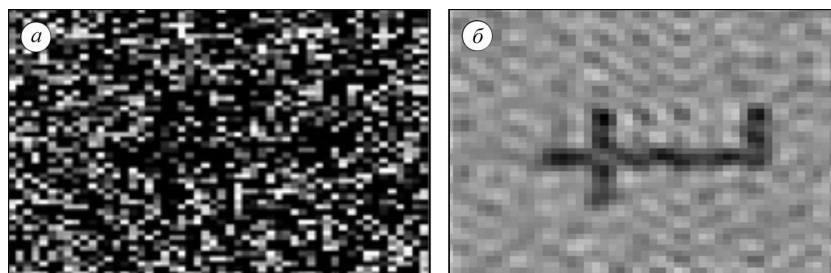


Рис. 4. Зашумлене (а) та відновлене (б) зображення, якщо $c/u = 0,5$ та $D = 0,64$.

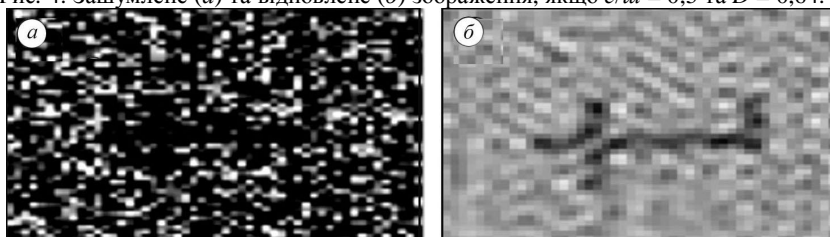


Рис. 5. Зашумлене (а) та відновлене (б) зображення, якщо $c/u = 0,3$ та $D = 0,52$.

Отримана залежність ДР зображення від частоти зрізу СІХ-фільтра подана у вигляді таблиці.

Залежність достовірності розпізнавання від частоти зрізу модифікованого СІХ-фільтра з “вікном” Капеліні ($N = 51$; $m = 2$; $c/u = 0,5$)

$\omega_{зр}$	0,5	1	1,5	2	2,5	3
D	0,38	0,72	0,75	0,71	0,65	0,59

ВИСНОВКИ

1. Досліджено, що достовірність розпізнавання у всіх розглянутих випадках перевищує 50%. Це свідчить про задовільну роботу системи розпізнавання зображень.

2. При заданому відношенні сигнал/шум на вході системи ДР слабо залежить від параметрів N та m . Якщо $c/u = 0,7$, то при $N = 25, 51, 101$ ця достовірність відповідно становить 0,74; 0,75; 0,74, а при $m = 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3$ – відповідно 0,73; 0,73; 0,74; 0,75; 0,73; 0,72. Результати цих досліджень можуть служити основою для оптимального вибору параметрів N та m при заданих відношеннях сигнал/шум.

3. Більш суттєво на ДР впливають частоти зрізу модифікованого СІХ-фільтра (див. таблицю), а максимум достовірності досягається, якщо $\omega_{зр} = 1,5$.

4. Із результатів досліджень випливає, що для фонові моделі і того ж “вікна” достовірність перевищує 50% лише при відношенні сигнал/шум, не меншому від 0,5. Крім цього, ДР об’єкта на фоні шуму нижчі від відповідних достовірностей для двокомпонентної моделі. Тому фонові модель вимагає кращої “настройки” системи розпізнавання.

5. Після відновлення еталонного зображення із використанням одиничного “вікна” ДР виявляється нижчою, ніж у випадку “вікна” Капеліні. Це можна пояснити тим, що імпульсна характеристика, модифікована одиничним “вікном”, має меншу крутість і нижчий пік порівняно з “вікном” Капеліні. Тому відповідний модифікований СІХ-фільтр буде менш ефективним.

1. Капустій Б. О., Русин Б. П., Таянов В. А. Системи розпізнавання образів з малими базами даних. – Львів: СПОЛОМ, 2006. – 152 с.
2. Справочник по устройствам цифровой обработки информации / Н. А. Виноградов, В. Н. Яковлев, В. В. Воскресенский и др. – К.: Техника, 1988. – 415 с.
3. Капеліни В., Константинович А. Дж., Емилиани П. Цифровые фильтры и их применение. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 360 с.