

МЕТОД РОЗПІЗНАВАННЯ ОПТИЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ У ХЕММІНГОВОМУ ПРОСТОРИ НА ОСНОВІ КРИТЕРІЮ СТРУКТУРНОЇ СКЛАДНОСТІ

Н.Я. Возна

Тернопільський національний економічний університет
вул. Львівська, 11, Тернопіль, 46020, Україна; e-mail: nvozna@ukr.net

В статті викладено теоретичні засади формування критерію структурної складності бінарних, напівтонових та кольорових оптичних зображень у Хеммінговому просторі, приведені аналітичні вирази оцінок Хеммінгової віддалі на основі різних взаємкореляційних функцій та наведені приклади застосування методу розпізнавання оптичних зображень у Хеммінговому просторі при вирішенні прикладних задач структуризації поліфункціональних даних у розподілених комп'ютерних системах. Результати досліджень мають ефективне застосування у галузі створення процесорів великої розрядності для шифрування даних. В основу таких пристроїв покладена функціональна схема пристрою для обчислення модульної кореляційної функції, завдяки чому досягнуто підвищення швидкодії пристрою визначення Хеммінгової віддалі між двома сигналами.

Ключові слова: структуризація, Хеммінгова віддаль, розпізнавання зображень, коефіцієнт взаємкореляції

Вступ

Розробка теорії структуризації даних є важливою та актуальною науковою задачею у галузі розпізнавання образів та оптичних зображень.

Вирішення прикладних задач у сфері застосування названої теорії тісно пов'язане з теорією розпізнавання образів та цифрового опрацювання зображень [1,2]. При цьому широко застосовуються методи кореляційного та спектрального аналізу у лінійному та квадратичному Хеммінговому просторах [3].

Для порівняння бінарних та багатоградацийних зображень успішно застосовано W -спектр зв'язності у матриці пікселів m_x, m_y, m_z згідно виразів [1]:

$$W_{\Sigma x,y} = \sum_0^8 \sum_{i,j}^{m_x m_y} a_{i,j}^v; \quad W_{\Sigma x,y,z} = \sum_0^{26} \sum_l^{m_z} \sum_{i,j}^{m_x m_y} a_{i,j,l}^v,$$

де $a_{i,j}^v, a_{i,j,l}^v$ – елементи зображення із координатами відповідно i, j та i, j, l і зв'язністю v ($v \in \overline{1,4}$).

Порівняння зображень виконується згідно лінійної оцінки Хеммінгової віддалі (ω):

$$\Delta \omega_{hg} = |\omega_h - \omega_g|,$$

де h, g – відповідні функції зв'язності порівнюваних зображень.

В роботі [2] для кодування та розпізнавання зображень застосований принцип побудови морфологічної піраміди на основі структуруючого елементу та розрахунку математичного очікування, дисперсії, коефіцієнта взаємкореляції та ентропії.

При цьому для порівняння вхідного та профільованого зображень застосована квадратична оцінка Хеммінгової віддалі ймовірнісної ентропії по Шеннону згідно виразу:

$$\omega_{mn} = -10 \log \left(\frac{\frac{1}{2^k} \sum_{m=0}^{2^k-1} \sum_{n=0}^{2^k-1} [f(m,n) - f'(m,n)]^2}{2^k} \right); k = 8,$$

де $f(m,n), f'(m,n)$ – відповідні інтенсивності початкового та фільтрованого зображень, k – об'єм вибірки.

В якості кореляційної оцінки порівняння зображень застосований відомий коефіцієнт взаємковаріації:

$$K_{mn}(0) = \frac{\sum_{m=0}^{2^k-1} \sum_{n=0}^{2^k-1} f_{mn} \cdot f'_{mn}}{\sqrt{(D_m + M_m^2) \cdot (D_n + M_n^2)}},$$

де D_m, D_n та M_m, M_n відповідні дисперсія та математичне очікування інтенсивностей порівнюваних зображень.

Мета роботи

Метою роботи є розробка теоретичних засад розпізнавання оптичних зображень у Хеммінговому просторі, представленому у теоретико-числовому базисі (ТЧБ) Крестенсона. Застосування оцінки Хеммінгової віддалі забезпечує можливість реалізації цифрових спецпроцесорів з високою швидкістю опрацювання структуризованих даних. Основним завданням даного дослідження є реалізація розробленого методу, що дозволить підвищити ефективність шифрування даних на основі багаторозрядних спецпроцесорів, які виконують операції модульної арифметики базису Крестенсона.

Основна частина

Теоретичні засади кодування зображень у різних теоретико-числових базисах. Існуюча практика структуризації та кодування елементів зображень у Хеммінговому просторі базується виключно на представленні кодів пікселів у двійковій системі числення ТЧБ Радемахера [4] (рис.1).

Кожен структурний елемент зображення певної інтенсивності описується вектором a :

$$a_{i,j}^v \in [m, n, l],$$

де m, n – двійкові коди декартових координат, l – код інтенсивності у випадку бінарного зображення.

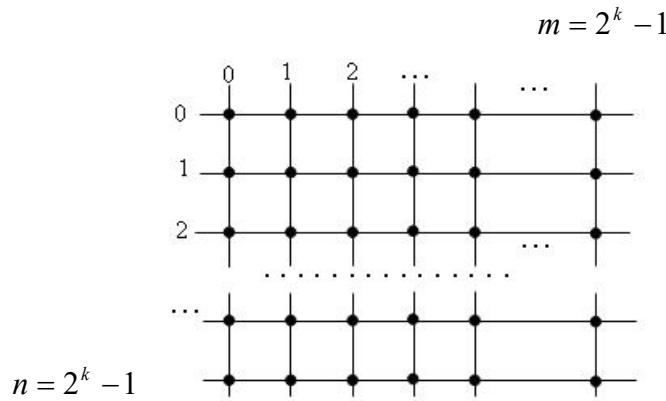


Рис. 1. Структуризація пікселів зображень у двовимірному Хеммінговому просторі

Для кольорових зображень відповідно кодуються інтенсивності трьох базових кольорів - s, t, z – відповідно синього, червоного та зеленого, тобто

$$a_{i,j}^v \in [m, n, s, t, z].$$

Таким чином, існуючі способи структуризації та кодування зображень у Хеммінговому просторі є багатовимірним, що потребує відповідної алгоритмічної та обчислювальної складності при виконанні їх порівняння та розпізнавання.

Більш ефективним способом структуризації та кодування елементів зображень у Хеммінговому просторі є застосування ТЧБ Крестенсона, який породжує систему числення залишкових класів [4,5] (рис.2).

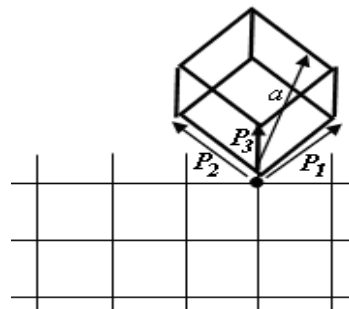


Рис. 2. Структуризація елементів зображень у ТЧБ Крестенсона

На рис.2: P_1, P_2, P_3 – взаємно прості модулі, a – результат кодування.

В основу цілочисельного перетворення системи залишкових класів (СЗК) покладена відома Китайська теорема про залишки, згідно якої будь-яке ціле число може бути представлено набором найменших невід’ємних залишків $(b_1, b_2, \dots, b_i, \dots, b_k)$ у системі взаємно простих чисел $(P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_k)$.

Таким чином вектор структуризованих даних, який кодує елемент зображення у Хеммінговому просторі $a_{i,j}^v \in \langle m, n, z \rangle$ однозначно кодується та декодується у ТЧБ Крестенсона згідно виразів:

$$a_{i,j}^v = (b_1, b_2, \dots, b_i, \dots, b_k); a_{i,j}^v = \text{res} \sum_{i=1}^k (\text{mod } \rho); \rho = \prod_{i=1}^k P_i; b_{ik} = \frac{\rho}{P_i} \cdot m_i \cdot b_i,$$

де $(P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_k)$ – система взаємно простих модулів; ρ – діапазон кодування даних, m_i – обернений елемент, $(1 \leq m_i \leq P_i - 1)$; b_{ik} – скоригований по m_i залишок b_i .

Кодування кольорових зображень RGB-системою в цілочисельній формі системи залишкових класів базису Крестенсона виконується згідно виразу:

$$N_k = \text{res} \sum_{i=1}^3 b_i \cdot B_i \pmod{P_0},$$

де N_k – число у позиційній системі числення; res – символ операції знаходження найменшого невід’ємного залишку; b_i – найменший невід’ємний залишок; B_i – базисні числа СЗК; $P_0 = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3$, де P_1, P_2, P_3 – взаємно прості модулі.

Для однозначного кодування кольорів RGB-системи обрано наступні модулі:

$$P_1 = 255_{(10)} = 11111111_{(2)};$$

$$P_2 = 256_{(10)} = 100000000_{(2)};$$

$$P_3 = 257_{(10)} = 100000001_{(2)}.$$

$$\text{Звідси: } P_0 = 16776960_{(10)} = 1111111111 \ 111110000 \ 0001_{(2)}.$$

Для здійснення перевірки знаходимо обернені елементи відповідних модулів:

$$m_1 = 128, \ m_2 = 255, \ m_3 = 129$$

та базисні числа:

$$B_1 = 8421376_{(10)} = 100000001000000000000000_{(2)};$$

$$B_2 = 16711425_{(10)} = 1111110111111100000001_{(2)};$$

$$B_3 = 8421120_{(10)} = 10000000011111100000000_{(2)}.$$

Перевірка правильності розрахунків виконується згідно виразу:

$$(B_1 + B_2 + B_3) \pmod{P_0} = 1$$

При цьому число градацій червоного кольору становить $0 \leq R \leq 254$, зеленого – $0 \leq G \leq 255$, синього – $0 \leq D \leq 256$.

Запропонований спосіб кодування у базисі Крестенсона дозволяє замінити вектори P_1, P_2, P_3 одним вектором P_0 , розрядність якого рівна 24 біти, що дорівнює розрядності кодів RGB-системи.

Практична реалізація визначення Хеммінгової віддалі. Відомий пристрій визначення залишку по модулю багаторозрядного числа [6] містить вхідну і вихідну шини, які є відповідно n -розрядними входами і n -розрядними виходами пристрою. В кожному розряді пристрою міститься однорозрядний суматор, прямий вхід переносу якого підключений до прямого виходу переносу суматора молодшого розряду пристрою, а прямий вихід переносу підключений до прямого виходу переносу суматора старшого розряду пристрою. Такий пристрій дозволяє визначити модульну різницю між двома двійковими кодами.

На рис.3 зображена структурна схема пристрою визначення залишку по модулю багаторозрядного числа, де 1 – вхідна шина, 2 – вихідна шина, 3 – спеціалізований однорозрядний суматор, 4 – D-тригер, 5 – вхід синхронізації, 6 – мультиплексор.

Даний пристрій використовується для виконання операції

$$(a + P_{\bar{a}}) \pmod{P},$$

де $P_{\bar{a}}$ – доповнюючий код числа P ($P_{\bar{a}} = \vec{P} + 1$), який використовується в асиметричних системах шифрування даних. Для отримання доповнюючого коду спочатку записують зворотний код початкового числа, для чого всі його розряди інвертують, а потім до отриманого після інвертування коду додають одиницю. На основі даного коду

проектується однокристална мікроелектронна реалізація багаторозрядного модульного суматора. Для можливості шифрування і розшифрування інформації такі кристали використовуються як апаратні засоби шифрування інформації.

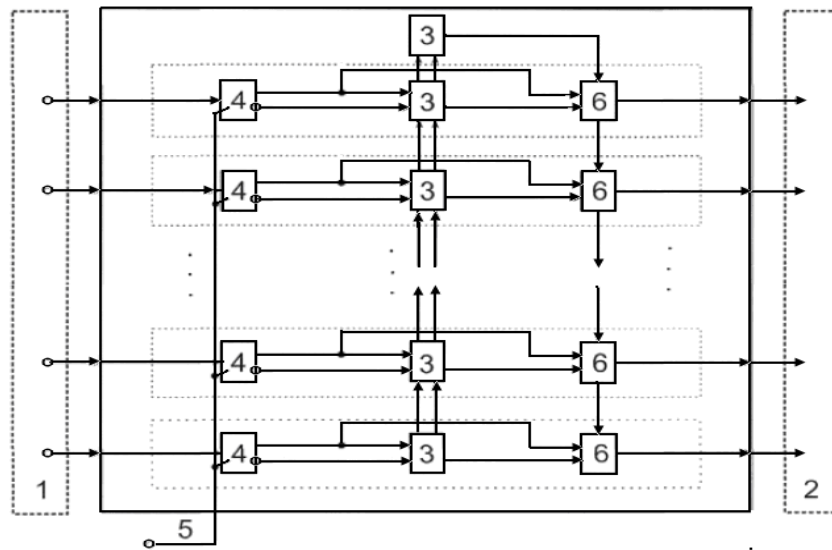


Рис. 3. Структурна схема пристрою визначення залишку по модулю багаторозрядного числа

На початку роботи пристрою (рис.3) вхідний код даних a ($0 << a \leq 2P-1$) подається на вхідну шину пристрою 1. Після подачі сигналу синхронізації у вигляді фронту наростання на вхідну шину 5 вхідний код даних записується в тригер 4 відповідного розряду суматора 3. Вихідні коди тригерів подаються на відповідні входи нульових чи одиничних спеціалізованих однорозрядних суматорів відповідного доповнюючого коду модуля P_a . У результаті підсумовування вхідного коду з кодом P_a та всіх наскрізних переносів у суматорах пристрою на виході $2k$ знакового розряду однорозрядного суматора (S_k) формується потенціал: 0, якщо $a \geq P$, тоді $b = (a + P_0) \bmod P$, інакше $a < P$ і $b = a$. Отриманий код b з виходів мультиплексорів 6 надходить на вихідну шину пристрою 2.

Однак недоліком такого пристрою є обмежені функціональні можливості, оскільки він не дозволяє визначити Хеммінгову віддаль між двома аналоговими сигналами на основі усередненої суми модульних різниць цифрових двійкових кодів. Іншим недоліком такого пристрою є низька швидкість та висока апаратна складність обумовлена наявністю мультиплексора у його структурі.

Відомий також багатоканальний пристрій для обчислення модульної кореляційної функції [7], який призначений для статистичного аналізу випадкових процесів в реальному часі. Такий пристрій дозволяє визначити усереднену Хеммінгову віддаль між двома поточними аналоговими сигналами та їх Хеммінгову віддаль між двома зсунутими в часі вхідними аналоговими сигналами.

На рис.4 приведена структурна схема багатоканального пристрою для обчислення модульної кореляційної функції, де 1 – блок перетворення аналог-часовий інтервал; 2 – синхронізатор; 3 – група регістрів зсуву; 4 – елементи "Виключне АБО"; 5 – блок пам'яті.

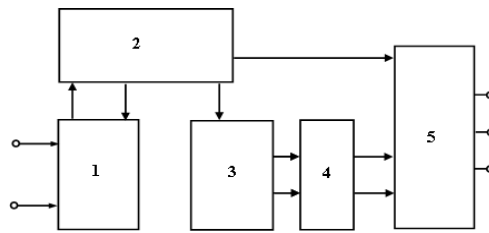


Рис. 4. Структурна схема багатоканального пристрою для обчислення модульної кореляційної функції

Недоліком такого пристрою є низька швидкодія обумовлена наявністю перетворювачів аналог-часовий інтервал, які формують вихідні послідовні цифрові унітарні коди з числом імпульсів 2^n , де n – розрядність відповідних двійкових кодів.

Запропоновано новий пристрій визначення Хеммінгової віддалі між двома аналоговими сигналами, де підвищення швидкодії визначення накопиченого усередненого значення суми модульних різниць оцифрованих аналогових сигналів відповідає оцінці Хеммінгової віддалі між ними згідно виразу:

$$Z = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - y_i|,$$

де $i \in \overline{1, n}$ – об'єм вибірки цифрових кодів; x_i та y_i – вхідні оцифровані аналогові сигнали $x(t)$ і $y(t)$.

Такий пристрій визначення Хеммінгової віддалі може бути використаний у якості компонента цифрових процесорів розпізнавання образів.

Удосконалення пристрою полягає в тому, що вхідні аналогові сигнали у двоканальному АЦП паралельного типу перетворюються у паралельні унітарні коди, які однозначно представляють більше та менше значення x_i та y_i , після чого перетворюються у паралельні інверсні розрядно-позиційні коди Хаара, дешифруються у відповідні: прямий двійковий код більшого з них та доповнюючий код меншого з них, які додаються у швидкодіючому багаторозрядному накопичувальному суматорі.

На рис.5 та рис.6 представлена структурна схема пристрою визначення Хеммінгової віддалі між двома сигналами, який містить: 1 – синхронізатор; 2 – перший аналоговий вхід; 3 – перший компаратор i -го розряду; 4 – другий аналоговий вхід; 5 – другий компаратор i -го розряду; 6 – схема формування ступінчастих взірцевих потенціалів; 7 – вхід схеми формування ступінчастих взірцевих потенціалів; 8 – логічний елемент "АБО"; 9 – логічний елемент "І"; 10 – перший логічний елемент "І-НЕ"; 11 – перший логічний елемент "НЕ"; 12 – другий логічний елемент "І-НЕ"; 13 – другий логічний елемент "НЕ"; 14 – третій логічний елемент "І-НЕ"; 15 – перший багаторозрядний суматор; 16 – парафазний вхід логічної 1 0; 17 – накопичуваний суматор; 18 – вхід логічного 0; 19 – вхід скиду в 0 накопичуваного суматора; 20 – вхід синхронізації накопичуваного суматора 17; 21 – вихідна шина пристрою.

На початку циклу роботи пристрою на першому виході синхронізатора 1 формується сигнал скиду у нульовий стан накопичуваного суматора 17 по третьому входу 19, а на другому виході синхронізатора 1 на протязі циклу роботи пристрою формується n - синхронізуючих імпульсів, які поступають на треті входи всіх логічних елементів "АБО" 8 та логічних елементів "І" 9. Вхідні аналогові сигнали $x(t)$ $y(t)$ поступають на відповідні входи пристрою 2, 4, які у вигляді потенціалів U_y та U_x поступають на перші входи відповідних компараторів 3, 5, на другі входи яких з'єднані з відповідними виходами схеми формування взірцевих потенціалів 6, вхід якої з'єднаний з третім входом пристрою 7 взірцевого потенціалу U_0 .

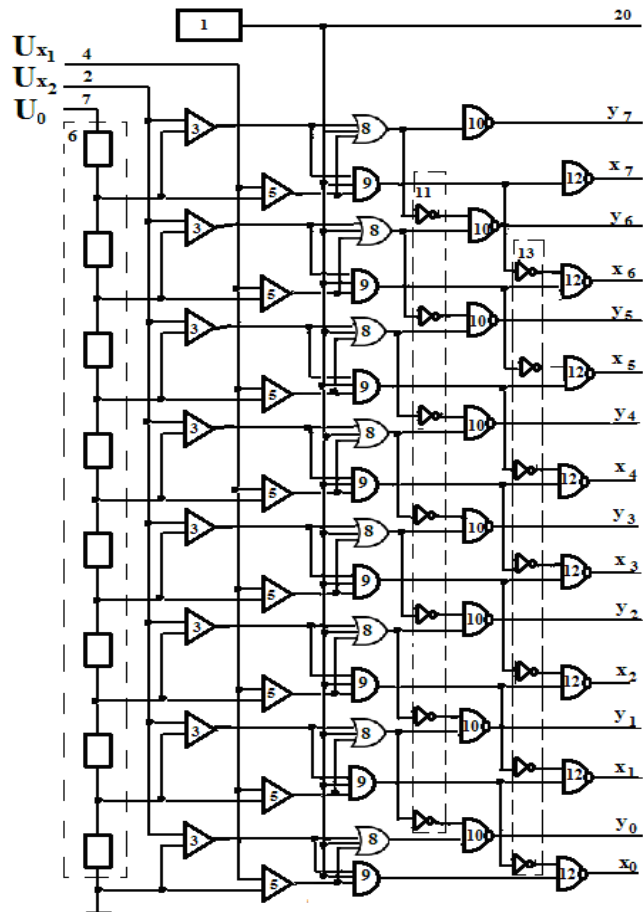


Рис. 5. Структурна схема пристрою визначення Хеммінгової віддалі між двома сигналами

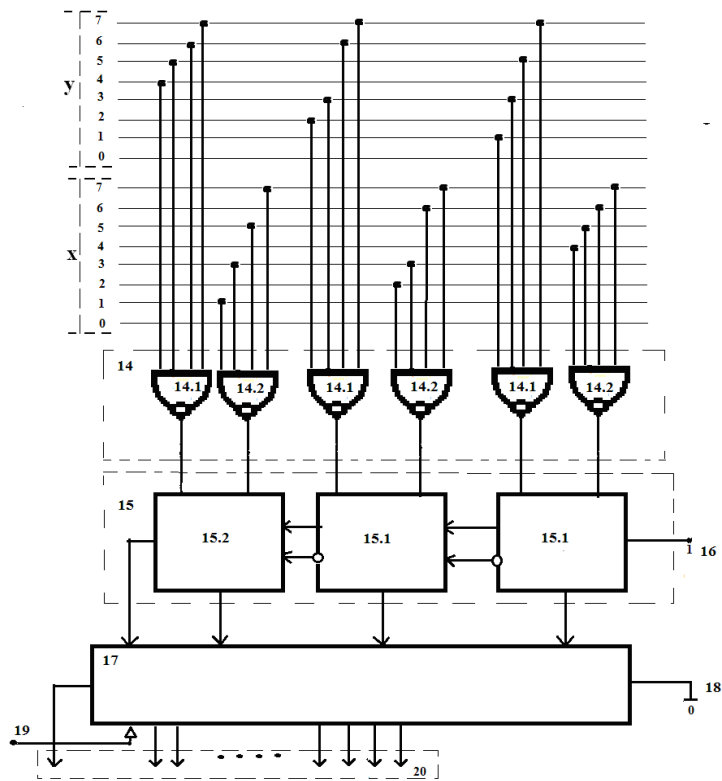
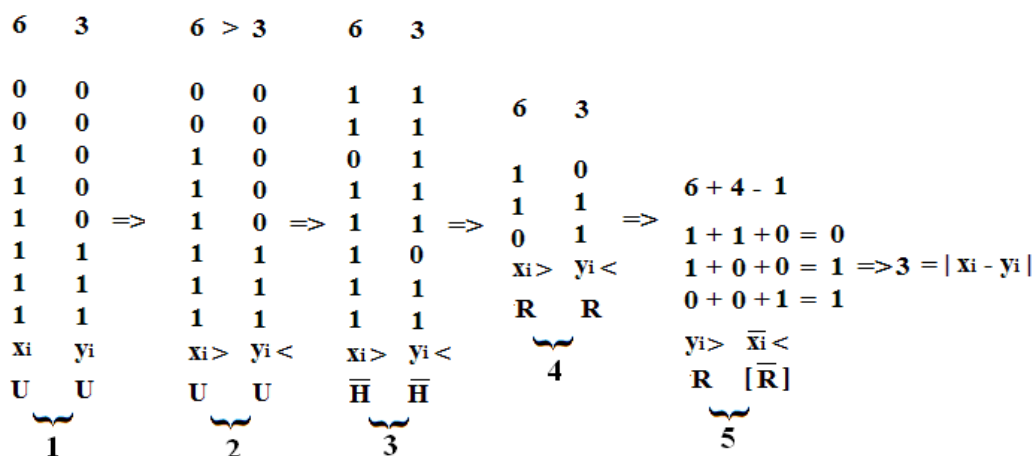


Рис. 6. Структурна схема пристрою визначення Хеммінгової віддалі між двома сигналами

При цьому на виходах компараторів 8 та 9 формуються відповідні паралельні унітарні коди вхідних потенціалів U_y та U_x , які поступають на входи відповідних логічних елементів "АБО" 8, І 9. Логічні елементи "АБО" формують інверсні паралельні унітарні коди більшого з двох цифрових значень x_i або y_i , а на виходах логічних елементів І 9 формуються паралельні інверсні коди меншого з двох цифрових значень x_i або y_i .

При цьому на виходах логічних елементів "І-НЕ" 10 формуються інверсні розрядно-позиційні паралельні коди Хаара більшого з двох цифрових значень x_i або y_i , які поступають на відповідні входи третіх логічних елементів "І-НЕ" 14.1, на виходах яких формуються прямі паралельні двійкові коди більшого із них, на виходах других логічних елементів "І-НЕ" 12 формуються інверсні розрядно-позиційні коди Хаара меншого з двох цифрових значень x_i або y_i , які поступають на відповідні входи третіх логічних елементів "І-НЕ" 14.2, на виходах яких формуються інверсні паралельні двійкові коди меншого із них. Отримані вихідні двійкові коди цифрових значень $\overline{x_i}$ та y_i поступають на входи багаторозрядного двійкового суматора 15 з парафазними входами та наскрізними переносами [8], де додаються з врахуванням логічної одиниці на вході суматора 16. У результаті на виході суматора 15 формується двійковий код модульної різниці між цифровим значенням x_i та y_i , сума яких накопичується в накопичувальному суматорі 17, із старших розрядів якого знімається двійковий код 20 значення Хеммінгової віддалі між двома аналоговими сигналами.

Наприклад, нехай $x_i = 6$, $y_i = 3$, тоді отримаємо наступні значення:



У процесі визначення Хеммінгової віддалі між двома аналоговими сигналами виконуються наступні перетворення цифрових кодів x_i та y_i :

1. Перетворення аналогових сигналів $x(t)$ та $y(t)$ у вигляді паралельних унітарних кодів на виході компараторів (U);
2. Формування паралельних унітарних кодів більшого з двох x_i та y_i на виходах логічних елементів "АБО" (U);
3. Формування паралельних інверсних кодів Хаара на виходах логічних елементів "І-НЕ" (\overline{H});
4. Формування паралельного коду Радемахера $y >$ та інверсного паралельного коду Радемахера $x <$ на виходах логічних елементів "І-НЕ" (R);
5. Виконання операції додавання прямого коду y_i , інверсного коду $\overline{x_i}$ та одиниці доповнюючого коду.

Висновки

Отже, в результаті розроблених теоретичних засад методу розпізнавання оптичних зображень у Хеммінговому просторі досягнуто підвищення швидкодії у порівнянні з відомими пристроями в 2^n рази пристрою визначення Хеммінгової віддалі між двома сигналами, де n – розрядність паралельного АЦП. Це дозволяє пришвидшити шифрування інформаційних потоків, які представляють бінарні та напівтонові зображення.

Список літератури

1. Кожем'яко, В.П. Застосування W-спектру зв'язності для порівняння зображень / В.П. Кожем'яко, Л.І. Тимченко, Ю.Ф. Кутаєв, А.А. Яровий, Н.І. Кокрецька. // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. — 2002. — № 1 (3). — С. 10-16.
2. Харатишвили, Н.Г. Кодирование изображений на основе построения морфологической пирамиды / Н.Г. Харатишвили, И.М. Ихеидзе, З.Дж. Гошгашвили. // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. — 2002. — № 1 (3). — С. 54-62.
3. Кожем'яко, В.П. Оптико-електронний пристрій для кореляційного аналізу біозображень / В.П. Кожем'яко, О. Семенець, Хані Аль Зубі, Д.Ш. Гельман. // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. — 2002. — № 1 (3). — С. 101-103.
4. Акушский, И.Я. Машинная арифметика в остаточных классах / И.Я. Акушский, Д.И. Юдицкий. — М.: Сов. радио, 1978. — 256 с.
5. Николайчук, Я.М. Коды поля Галуа: теория та застосування. — М: Тернопіль: ТзОВ "Терно-граф", 2012. — 320 с.
6. Пат. 90144 Україна МПК G06F 7/00 (2014.01) Пристрій визначення залишку по модулю багаторозрядного числа / Я.М. Николайчук, В.Л. Кімак, О.І. Волинський, Б.Б. Круліковський № u201315351; заявл. 27.12.2013; опубл. 12.05.2014, Бюл. № 9, 2014.
7. Николайчук, Я.Н., Ищеряков С.М., Ластовецкий А.Д. Многоканальное устройство для вычисления модульной корреляционной функции SU 1686433, Бюл. № 39, 1991.
8. Пат. 109142 Україна МПК G06F 7/00 (2016.01) Однорозрядний суматор / А.Я. Давлетова, Б.Б. Круліковський, Н.Я. Возна, Я.М. Николайчук № u201602165; заявл. 04.03.2016; опубл. 10.08.2016, Бюл. № 15, 2016.

МЕТОД РАСПОЗНАВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ХЕММИНГОВОМ ПРОСТРАНСТВЕ НА ОСНОВЕ КРИТЕРИЕВ СТРУКТУРНОЙ СЛОЖНОСТИ

Н.Я. Возна

Тернопольский национальный экономический университет,
ул. Львовская, 11, Тернополь, 46020, Украина; E-mail: nvozna@ukr.net

В статье изложены теоретические основы формирования критерия структурной сложности бинарных, полутоновых и цветных оптических изображений в Хемминговом пространстве, приведены аналитические выражения оценок Хеммингового расстояния на основе различных взаимокорреляционных функций и приведены примеры применения метода распознавания оптических изображений в Хемминговом пространстве при решении прикладных задач структуризации полифункциональных данных в распределенных компьютерных системах. Результаты исследований имеют эффективное применение в области создания процессоров большой разрядности для шифрования данных. В основу таких устройств положена функциональная схема устройства для вычисления модульной корреляционной функции, благодаря чему достигнуто повышение быстродействия устройства определения Хеммингового расстояния между двумя сигналами.

Ключевые слова: структуризация, Хеммингово расстояние, распознавание изображений, коэффициент взаимокорреляции

METHOD FOR RECOGNITION OF OPTICAL IMAGES IN THE HAMMING SPACE BASED ON THE STRUCTURAL COMPLEXITY CRITERION

N.Ya. Vozna

Ternopil National Economic University,
11, Lvivska Str., Ternopil, 46020, Ukraine; E-mail: nvozna@ukr.net

The theoretical principles of the formation of the criterion of structural complexity of binary, halftone and color optical images in the Hamming space are highlighted, analytical expressions of the Hamming distance estimates are given on the basis of different cross-correlation functions, and the examples of applying the method for recognition of optical images in the Hamming space while solving applied problems of structuring multifunctional data in distributed computer systems are presented in this paper. The research results can be used while developing high capacity processors for data encryption. These devices are based on a functional scheme of the device for calculating the modular correlation function. This leads to increased efficiency of the device for estimating the Hamming distance between two signals.

Keywords: structuring, the Hamming distance, image recognition, cross-correlation coefficient