УДК 621.317

Т.М. Локтікова, ст. викл.
Житомирський державний технологічний університет

ПАРАЛЕЛЬНІ АЛГОРИТМИ ТА СТРУКТУРИ ДЛЯ ОБЧИСЛЕННЯ ДВОВИМІРНИХ ЗГОРТОК

(Представлено д.т.н., проф. Панішевим А.В.)

Запропоновано алгоритми, що мінімізують загальну кількість арифметичних операцій, необхідних для виконання процедури двовимірної згортки й передбачають векторизацію обчислювального процесу обробки інформації. Представлено відповідні графові моделі.

Постановка проблеми. Як відомо, при обробці зображень значна частина операцій проводиться з матрицями. Насамперед, саме зображення – це матриця, елементами якої є значення яскравості точок зображення. Роботу блоків попередньої фільтрації, виділення граничних точок, стоншення меж можна описати функцією роботи блока $Y = F(X)$, де X – матриця, яка містить дані, що надходять на блок, Y – матриця, яка містить дані на його виході.

У більшості випадків перетворення, які здійснюють методи, що реалізуються в блоках, можна представити у вигляді $Y = H \tilde{\circ} X$ $Y = H \tilde{\circ} X$, де H – матриця, яка за допомогою деякої операції $\tilde{\circ}$ виконує перетворення над матрицею X .

Для обробки даних векторно-матричного типу доцільно використовувати паралельні алгоритми з векторизацією процесу обчислень. У подальшому буде розглянуто згортку двовимірних масивів, оскільки вона є однією з найбільш поширених операцій обробки зображень цифровими методами [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Операція двовимірної згортки є найбільш трудомісткою з точки зору обчислювальних витрат, внаслідок чого тривалість її виконання є достатньо великою. Тому одним із напрямків в області підвищення ефективності процедури двовимірної згортки є пошук алгоритмів, що мінімізують необхідну на її виконання загальну кількість арифметичних операцій [2–4]. Другим напрямком робіт є застосування нової швидкодіючої елементної бази. При цьому відпадає необхідність використовувати надмірно ускладнені алгоритми тому, що зменшення часу обчислення двовимірної згортки масивів можливо досягти за рахунок природного розпаралелювання процесу обробки даних. Зміст цього підходу полягає в концепції систолічної обробки інформації [5–7]. Інший підхід передбачає векторизацію обчислювального процесу обробки інформації [8].

Мета роботи. Розглянути питання організації згортки у межах векторного підходу.

Викладення основного матеріалу. Нехай задано масив вхідних даних $X_N = \left\| x_{k,l} \right\|$, $k, l = \overline{0, N-1}$, та масив вагових коефіцієнтів $\Phi_M = \left\| \phi_{r,s} \right\|$, $r, s = \overline{0, M-1}$, $M < N$. Необхідно виконати операцію:

$$y_{k,l} = \sum_r \sum_s x_{k+r,l+s} \cdot \phi_{r,s} , \qquad (1)$$

що називається двовимірною ковзною згорткою масивів X_N та Φ_M .

Потрібно відмітити, що вираз (1) лише формально визначає перелік математичних операцій, необхідних для виконання при обчисленні згортки, у той час як спосіб організації цих обчислень, їх послідовність залишаються нерозкритими.

Розглянемо способи організації обчислень при вирішенні цього завдання, які допускають векторизацію процесу обробки даних. При цьому будемо використовувати такі позначення:

$\oplus$ – знак тензорної суми матриць;

$\otimes$ – знак тензорного множення матриць;

T – знак транспонування матриці.

Введемо для розглядання вектор $X = [X^{(0)}, X^{(1)}, X^{(2)}, \ldots, X^{(N-1)}]^T$, де $X^{(k)} = [x_{k,0}, x_{k,1}, \ldots, x_{k,N-1}]^T$ – підвектор розміру $N \times 1$, що описує елементи k -го рядка масиву X_N . Тоді процедура, яка описує модифікації організації обчислювального процесу ковзної згортки, може бути представлена векторно-матричним виразом:

$$Y = A_\alpha \cdot (A_\beta \cdot (\Phi_\gamma \cdot (P_\delta \cdot (P_\sigma \cdot X)))) , \qquad (2)$$

де $\alpha = (N-M+1)^2 \times M\,(N-M+1)^2$; $\beta = M\,(N-M+1)^2 \times M^2 (N-M+1)^2$; $\gamma = M^2 (N-M+1)^2$; $\delta = M^2 (N-M+1)^2 \times MN\,(N-M+1)$; $\sigma = MN\,(N-M+1) \times N^2$.

Реалізувати обчислення виразу (2) можна за двома алгоритмами. Для першого алгоритму матричні конструкції, що входять у вираз (2), визначаються так:

$P_\sigma = \left[P^{(0)}_{MN\times N^2}, P^{(1)}_{MN\times N^2}, \dots, P^{(N-M)}_{MN\times N^2}\right]^T$ – матриця «глобального» мультиплексування першої степені розміром σ з підматрицями $P^{(i)}_{MN\times N^2}$:

$$P^{(i)}_{MN\times N^2} = V_{MN\times N^2} \cdot I^{(iN\to)}_{N^2},\ i = \overline{0, N-M},$$

де I – тут та в подальшому одинична матриця, порядок якої визначено нижнім індексом, а верхній індекс, якщо він є, визначає кількість операцій циклічного зсуву її стовпців у напрямку, вказаному стрілкою;

$$V_{MN\times N^2} = \left\|\theta_{m,n}\right\|,\ \theta_{m,n} = \begin{cases} 1, & m = n,\ m = \overline{0, MN-1} \\ 0, & m \neq n,\ n = \overline{0, N^2-1} \end{cases}.$$

$P_\delta = I_{N-M+1} \otimes P_{M^2(N-M+1)\times MN}$ – матриця мультиплексування другої степені з підматрицями «локального» мультиплексування.

$$P_{M^2(N-M+1)\times MN} = I_M \otimes P_{M(N-M+1)\times N},$$

де $P_{M(N-M+1)\times N} = \left[P^{(0)}_{M\times N}, P^{(1)}_{M\times N}, \dots, P^{(N-M)}_{M\times N}\right]^T$; $P^{(i)}_{M\times N} = V_{M\times N} \cdot I^{(i\to)}_N$, $i = \overline{0, N-M}$; $V_{M\times N} = \left\|\theta_{m,n}\right\|$,

$$\theta_{m,n} = \begin{cases} 1, & m = n,\ m = \overline{0, MN-1} \\ 0, & m \neq n,\ n = \overline{0, N^2-1} \end{cases}.$$

$\Phi_\gamma = I_{N-M+1} \otimes \Phi_{M^2(N-M+1)}$ – матриця вагових коефіцієнтів, де $\Phi_{M^2(N-M+1)} = diag\left(\Phi^{(0)}_{M(N-M+1)}, \Phi^{(1)}_{M(N-M+1)}, \dots, \Phi^{(M-1)}_{M(N-M+1)}\right)$, $\Phi^{(j)}_{M(N-M+1)} = I_{N-M+1} \otimes \Phi^{(j)}_M$, $j = \overline{0, M-1}$, $\Phi^{(j)}_M = diag\left(\phi_{j,0}, \phi_{j,1}, \dots, \phi_{j,M-1}\right)$.

$A_\beta = I_{N-M+1} \otimes (I_M \otimes (I_{N-M+1} \otimes L_M))$ – матриця додавання першої степені, де $L_M = [1, 1, \dots, 1]$ – вектор-рядок, що містить M одиниць.

$A_\alpha = I_{N-M+1} \otimes \left(L_M \otimes I_{N-M+1}\right)$ – матриця додавання другої степені.

Алгоритм, що реалізує вираз (2), зі структурою та способами додавання матричних конструкцій, описаними вище, дозволяє обробляти вхідний масив даних по $N - M + 1$ незалежно працюючим каналам. При цьому дані обробляються «смугами» по M рядків вхідного масиву в кожній. На рисунку 1 представлено графову модель, що ілюструє організацію обчислювального процесу обробки даних відповідно з першим алгоритмом.

Для другого алгоритму відповідні матриці набувають такого вигляду:

$P_\sigma = \left[P^{(0)}_{N(N-M+1)\times N^2}, P^{(1)}_{N(N-M+1)\times N^2}, \dots, P^{(M-1)}_{N(N-M+1)\times N^2}\right]^T$ – матриця «глобального» (першої степені) мультиплексування вхідного вектора даних X розміром σ з підматрицями:

$$P^{(j)}_{N(N-M+1)\times N^2} = V_{N(N-M+1)\times N^2} \cdot I^{(jN\to)}_{N^2},\ j = \overline{0, M-1},$$

де $V_{N(N-M+1)\times N^2} = \left\|\theta_{m,n}\right\|, \theta_{m,n} = \begin{cases} 1, m = n, m = \overline{0, N(N-M+1)-1} \\ 0, m \neq n, n = \overline{0, N^2-1} \end{cases}.$

$P_\delta = I_M \otimes P_{M(N-M+1)^2\times N(N-M+1)}$ – матриця мультиплексування другої степені, де $P_{M(N-M+1)^2\times N(N-M+1)} = I_{N-M+1} \otimes P_{M(N-M+1)\times N}$, $P_{M(N-M+1)^2\times N(N-M+1)} = \left[P^{(0)}_{(N-M+1)\times N}, P^{(1)}_{(N-M+1)\times N}, \dots, P^{(M-1)}_{(N-M+1)\times N}\right]^T$, а матриці $P^{(i)}_{(N-M+1)\times N} = V_{(N-M+1)\times N} \cdot I^{(i\to)}_N$, $i = \overline{0, M-1}$, співпадають з визначеними раніше.

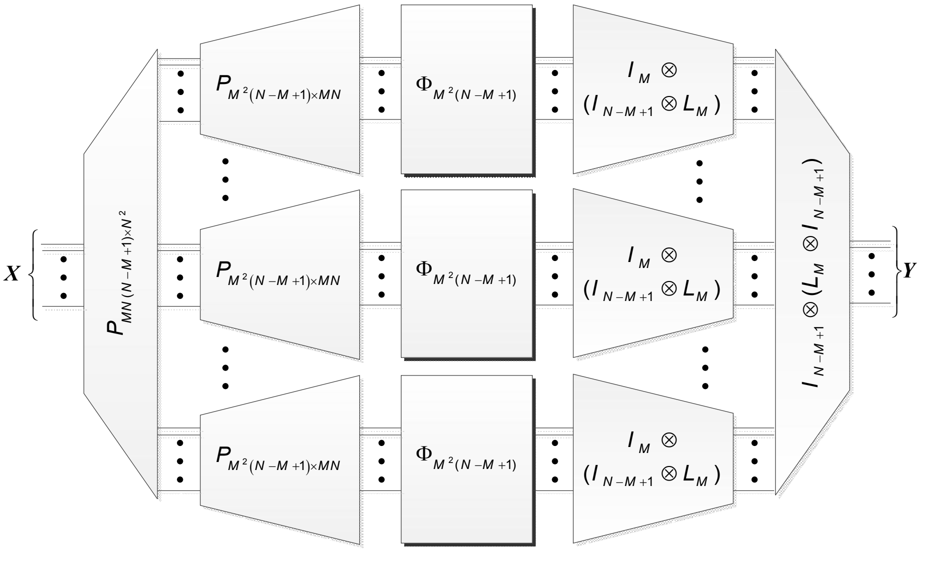

Рис. 1

Для цього випадку $\Phi_\gamma = diag\left(\Phi^{(0)}_{M(N-M+1)^2}, \Phi^{(1)}_{M(N-M+1)^2}, ..., \Phi^{(M-1)}_{M(N-M+1)^2}\right)$, де $\Phi^{(j)}_{M(N-M+1)^2} = I_{N-M+1} \otimes \Phi^{(j)}_{M(N-M+1)}$, $j = \overline{0, M-1}$, $\Phi^{(j)}_{M(N-M+1)} = \Phi^{(j)}_M \otimes I_{N-M+1}$, а матриці $\Phi^{(j)}_M$ співпадають з визначеними вище.

$A_\beta = I_M \otimes \left(I_{N-M+1} \otimes \left(L_M \otimes I_{N-M+1}\right)\right)$ – матриця додавання першої степені.

$A_\alpha = L_M \otimes I_{(N-M+1)^2}$ – матриця додавання другої степені.

Алгоритм реалізації виразу (2), зі структурою та способами додавання матриць, що входять в узагальнену векторно-матричну обчислювальну процедуру і визначені для другого випадку, дозволяє виконувати обробку даних по M незалежно працюючим каналам. При цьому кожний канал обробляє «смугу» вхідного масиву даних, яка складається з $N - M + 1$ рядків.

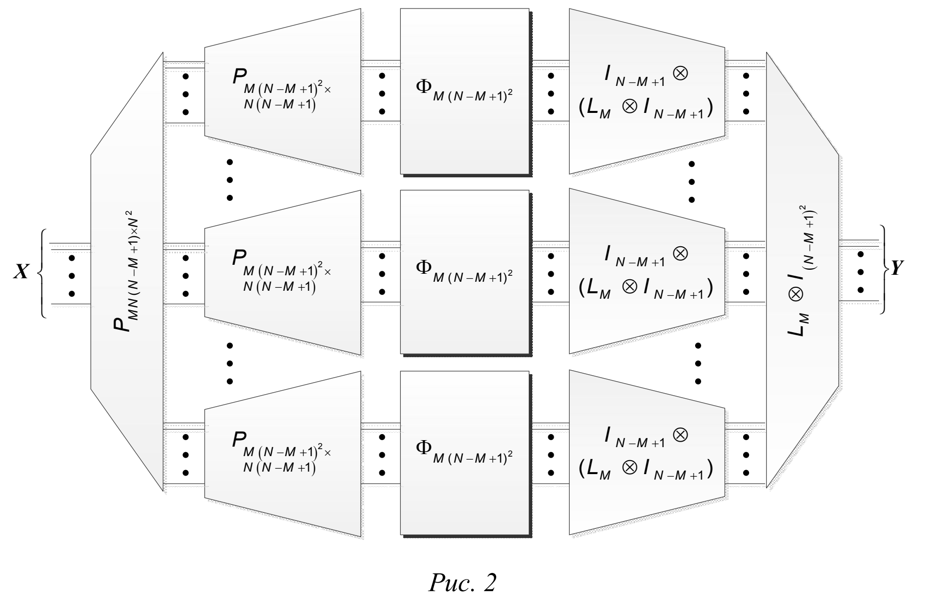

Рис. 2

На рисунку 2 представлено схему, що ілюструє організацію обчислювального процесу обробки даних відповідно з другим алгоритмом.

Висновки. Наведені схеми дозволяють проаналізувати різні способи організації обчислень у межах описаного підходу, оцінити, виходячи з вимог конкретної задачі, кількість та швидкодію процесорних модулів, можливості апаратної реалізації операції двовимірної згортки.

Очевидно, що дані алгоритми можуть бути реалізовані послідовно у кожному каналі, послідовно-паралельно та повністю паралельно.

Запропоновані алгоритми мають перспективу використання не лише для обчислення двовимірної згортки. Як видно з наведених схем, алгоритми можна узагальнити для використання в тих операціях, де необхідна робота з матричними даними і висуваються вимоги щодо зменшення часу обчислень.

Так алгоритми в цілому складаються з трьох етапів:

- мультиплексування;
- виконання безпосередньо операції;
- додавання.

На етапі мультиплексування здійснюється розпаралелювання вхідного потоку інформації. При цьому утворюються смуги даних, які можуть оброблятися незалежно. Отже, для випадків, коли необхідно проводити операції з часом виконання більшим, ніж період надходження наступних даних, розпаралелювання призведе до зменшення затримок, перешкоджаючи втратам даних.

При проектуванні пристроїв обробки зображень необхідно враховувати, що немає потреби використовувати весь діапазон смуг розпаралеленого інформаційного потоку. Дійсно, взагалі кількість необхідних паралельних потоків визначається як:

$$N = \frac{T_{обч}}{T_{інф}},$$

де $T_{обч}$ – час, необхідний для виконання операції обчислювачем для одного вхідного набору даних; $T_{інф}$ – період надходження наступного набору даних.

Етап додавання – заключний етап обробки матричних даних. Він описує спосіб збору результатів обчислень, що виконуються в незалежних потоках. Алгоритм роботи визначається вимогами, що висуваються до вихідних даних, способом організації подальшої передачі даних або зручністю їх представлення для подальшої обробки.

Етап виконання безпосередньо операції – це етап, на якому здійснюється обробка вхідних даних. Операція реалізується одночасно для кожного набору вхідних даних. Тому застосовується необхідна кількість однакових обчислювачів, розроблених для виконання заданої операції. Залежно від функції (операції), яку реалізує обчислювач, можна проводити різні обчислення, не змінюючи структуру обчислювального пристрою. Це дозволяє зменшити витрати на розробку обчислювачів, спростити організацію потоків даних, застосувати модульну структуру.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Прэтт У.* Цифровая обработка изображений : пер. с англ. / *У.Прэтт.* – М. : Мир, 1982. – 720 с.
2. *Нуссбаумер Г.* Быстрое преобразование Фурье и алгоритмы вычислений сверток : пер. с англ. / *Г.Нуссбаумер.* – М. : Радио и связь, 1985. – 248 с.
3. *Мур У.* Систолические структуры : пер. с англ. / *У.Мур, Э.Маккейб, Р.Уркхарт.* – М. : Радио и связь, 1993. – 416 с.
4. *Каневский Ю.С.* Систолические процессоры / *Ю.С. Каневский.* – К. : Техніка, 1991. – 173 с.
5. *Аксенов В.П.* Систолические алгоритмы и процессоры / *В.П. Аксенов, П.Я. Красинский, Г.В. Спиридонов* // Зарубежная радиоэлектроника. – 1987. – № 7. – С. 7–33.
6. *Кухарев Г.А.* Алгоритмы и систолические процессоры для обработки многозначных данных / *Г.А. Кухарев, В.П. Шмерко, Е.Н. Зайцева*. – Минск : Навука і тєхніка, 1990. – 416 с.
7. *Садыхов Р.Х.* Систолические процессоры цифровой обработки изображений в двумерных базисах / *Р.Х. Садыхов, А.Г. Мачнев*. – Минск : ИТК АНБ, 1996. – 82 с.
8. *Царев А.П.* Формальный синтез алгоритмов и структур процессов обработки сигналов на основе графо-структурных моделей / *А.П. Царев* // Тезисы докладов конференции. – Кишинев, 1986. – С. 181–182.

ЛОКТІКОВА Тамара Миколаївна – старший викладач кафедри автоматики та управління в технічних системах Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– цифрова обробка зображень та розпізнавання образів.

Тел.: (0412)24–14–17.

Подано 05.05.2011