

УДК 681.3

Т. Б. Мартинюк, к. т. н., доц.;
Л. М. Куперштейн, к. т. н.

ЕФЕКТИВНІСТЬ КОНВЕЄРНОГО ПРОЦЕСОРА З РІЗНИЦЕВО-ЗРІЗОВИМ ОБРОБЛЕННЯМ ДАНИХ

Розглянуто основні характеристики продуктивності конвеєрних процесорів. Проаналізовано показники та коефіцієнти продуктивності конвеєрного процесора з урахуванням особливостей оброблення векторних масивів даних за різницево-зрізовими зрізами.

Вступ

Останнім часом широкого розповсюдження набули систолічні архітектурні рішення в апаратній реалізації таких базових процедур прикладних задач оброблення та аналізу сигналів і зображень [1—3] як згортка, фільтрація, кореляція, векторно-матричні операції, роз'язання систем алгебраїчних рівнянь, перетворення (Фур'є, Уолша—Адамара, Хаара, Хафа, Карунена—Лоєва), сортування тощо [1, 4, 5]. Це пов'язано з тим, що систолічні масиви є класом мережевих матричних архітектур зі специфічним паралельно-конвеєрним обробленням масивів даних. Для них характерними є такі властивості, як регулярність структури, локальна зв'язність, конвеєрність та синхронність мультиоброблення даних [1, 6, 7].

Разом з тим, специфічні особливості систолічних масивів потребують особливого підходу під час оцінювання їх продуктивності. Найприйнятнішим у цьому випадку виявився підхід до систолічних структур, як до конвеєрних пристроїв [8], але з урахуванням їх особливостей.

Метою роботи є підвищення продуктивності систолічних структур з різницево-зрізовим обробленням векторних масивів даних через урахування впливу найважливіших чинників конвеєрного процесу.

Постановка задачі

Показники ефективності паралельних і векторних обчислювальних засобів досліджено досить докладно [8—11]. Особливості оброблення векторних масивів даних за різницево-зрізовими зрізами (РЗ) розглянуто в роботах [12—14]. Але, враховуючи значну конвеєрну складову в організації процесу оброблення даних за РЗ [15—18], зупинимось детальніше на коефіцієнтах ефективності, які характеризують саме конвеєрні процесори [8].

Часові складові лінійного конвеєрного процесу можна подати у вигляді такої діаграми (рис. 1) [8], де τ_{0i} — затримка i -ї комбінаційної схеми $КС_i$; τ_r — час запису даних у регістр $Рг$; τ_M — час розповсюдження сигналу у між'єднаннях; τ_c — час зсуву синхроімпульсів.

Отже, такт τ_k роботи конвеєра визначається таким чином:

$$\tau_k = \tau_{0m} + \tau_r + \tau_M + \tau_c, \tag{1}$$

де τ_{0m} — максимальне значення серед τ_{0i} , тобто

$$\tau_{0m} = \max_i \tau_{0i}. \tag{2}$$

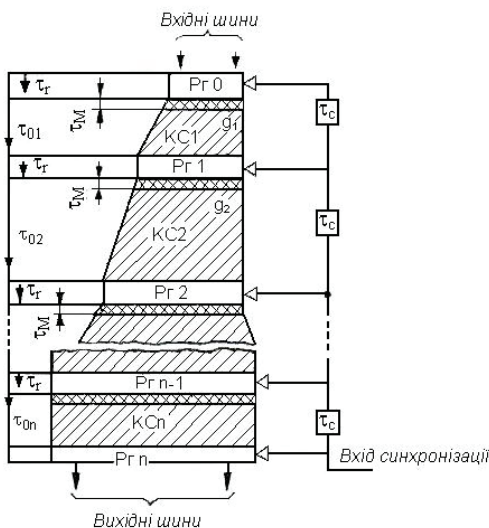


Рис. 1. Схематичне зображення конвеєрного пристрою

За умови, що

$$\tau_{01} \approx \tau_{02} \approx \dots \approx \tau_{0n} \approx \tau_0, \quad (3)$$

отримаємо

$$\tau_k = \tau_0 + \tau_s. \quad (4)$$

З виразу (1) випливає, що

$$\tau_s = \tau_r + \tau_M + \tau_c. \quad (5)$$

В подальшому для випадку, коли потік даних є неперервним, важливими є такі величини, як відношення τ_s/τ_0 і продуктивність конвеєра за умови $\tau_s \ll \tau_0$ у вигляді

$$V_0 = 1/\tau_0. \quad (6)$$

В цьому плані основними характеристиками конвеєрних процесорів (КП) є такі [8]:

- асимптотична продуктивність КП — V_{k1} ;
- коефіцієнт використання КС КП — Ψ_1 ;
- продуктивність КП з урахуванням кількості n ступенів конвеєра — $V_k(n)$;
- коефіцієнт ефективності КП — Ψ_2 ;
- продуктивність КП з урахуванням кількості N операндів масиву даних — $V(N)$;
- коефіцієнт завантаження конвеєра — Ψ_3 ;
- продуктивність КП з урахуванням витрат, що пов'язані з τ_s — $V(\tau_s, N)$;
- коефіцієнт використання конвеєра — Ψ_4 .

З іншого боку, враховуючи особливість оброблення даних, за РЗ [13—15] час T виконання векторної операції можна розрахувати з формули [10]:

$$T = s + \tau N, \quad (7)$$

де s — час запуску конвеєра; τ — проміжок часу, за який конвеєр видає результат; N — довжина вектора.

Час запуску s — це час, який необхідний для заповнення конвеєра, включаючи час підготовки операндів і час налаштування конвеєра зі змінною конфігурацією [10]. Швидкість видачі результатів τ з формули (7) тісно пов'язана з часом циклу або тактом конвеєра, оскільки після його заповнення кожний наступний результат формується через цей такт.

Середній час отримання одного результату визначається з виразу (7)

$$T_R = \tau + s/N \quad (8)$$

і свідчить про необхідність роботи з векторами великої розмірності для компенсації витрат на запуск конвеєра [10].

Тоді продуктивність конвеєра, як кількість результатів, що видаються ним за одиницю часу, має такий вигляд:

$$r = T_R^{-1} = N/(s + \tau N), \quad (9)$$

звідки при $s = 0$ і $N \rightarrow \infty$ випливає, що

$$r_\infty = 1/\tau. \quad (10)$$

Величину r_∞ з (10) називають асимптотичною продуктивністю [9, 10], яка дорівнює недосяжній максимальній швидкості видачі результатів при ігноруванні витрат на запуск конвеєра [10].

Особливості функціонування конвеєрного процесора з різницево-зрізовим обробленням даних

Оброблення даних за РЗ дозволяє збільшити багатofункціональність конвеєрного процесора за рахунок одночасного виконання разом із формуванням суми S_N елементів $a_{i,0}$ ($i = \overline{1, n}$) вхідного векторного масиву A_0 таких операцій: а) сортування за зростанням значень його елементів ($\text{sort } a_{i,0}$); б) визначення екстремальних елементів ($\max_i a_{i,0}, \min_i a_{i,0}$); в) формування верхньої межі середньої суми \overline{S} елементів масиву як локального зовнішнього порогу оброблення [19]; г) порогове під-

сумовування елементів масиву з формуванням вихідного сигналу Y ; д) відновлення елементів (rest $a_{i,0}$) вхідного масиву A_0 як зворотної операції [15, 20, 21].

Основною операцією серед наведених є пряма операція паралельного підсумовування або згортка елементів $a_{i,0}$ векторного масиву A_0 [16], тому особливості конвеєрного процесу оброблених за РЗ розглянемо для операції порогового підсумовування елементів вхідного векторного масиву [15,16], як найбільш затребуваної, з одного боку, і найбільш схожої з основною операцією, з іншого боку.

Конвеєрний процесор містить n базових комірок і додаткову $(n + 1)$ комірку (рис. 2). Базова комірка (рис. 3) складається із суматора SM , суматора у режимі віднімання SM^* , чотирьох регістрів RGR , RGN , RGM , RGS , мініматора MIN , мультиплексора MX , тригера T і комутатора SW . Додаткова комірка (рис. 4) складається із суматора у режимі віднімання SM^* , регістра RGR , мультиплексора MX , двох тригерів $T1$, $T2$, логічного елемента OR (АБО) і двох логічних елементів NOR (АБО-НІ).

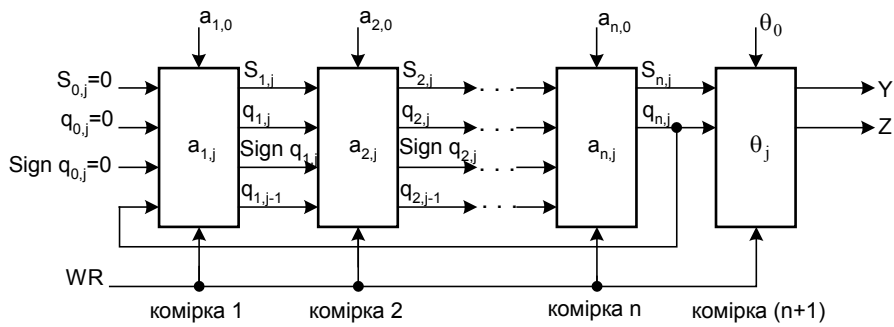


Рис. 2 Конвеєрний процесор на базі різницевих зрізів

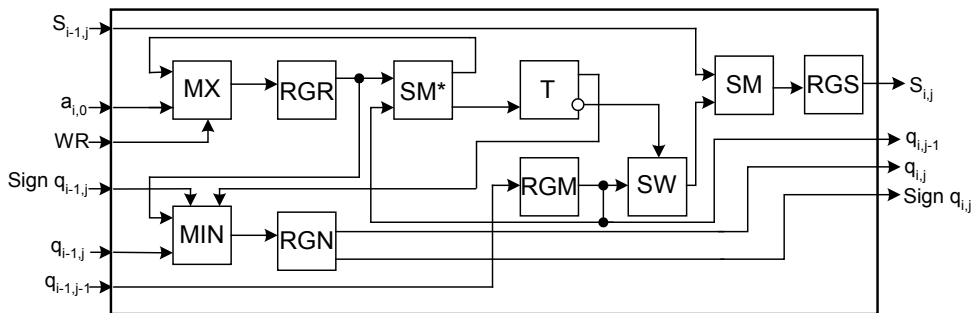


Рис. 3. Базова комірка конвеєрного процесора

На обох схемах (див. рис. 3, 4) не показані входи стандартних сигналів синхронізації та встановлення у початковий стан тригерів та регістрів.

Базова комірка (див. рис. 3) у робочому режимі у j -му циклі виконує такі операції:

- визначення мінімального значення ($q_{i,j}$) двох операндів ($a_{i,j-1}$, $a_{i-1,j-1}$) та його знаку ($Sign q_{i,j}$);
- формування поточної часткової суми ($S_{i,j}$);
- транзит поточного внутрішнього порогу оброблення ($q_{i,j-1}$).

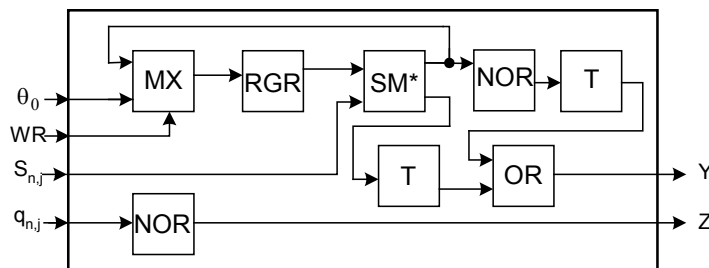


Рис. 4. Додаткова комірка конвеєрного процесора

А додаткова комірка (див. рис. 4) у робочому режимі у j -му циклі виконує такі операції:
 — формування поточного зовнішнього порога оброблення θ_j ;
 — формування сигналу спрацювання штучного нейрона у вигляді активного вихідного сигналу Y ;
 — визначення моменту завершення оброблення елементів векторного масиву за сигналом Z при неактивному вихідному сигналі Y .

Завдяки «просторовій однорідності» операцій, які виконуються при обробленні векторних даних за P3 [22], конвеєрний процесор (див. рис. 2) використовує принцип розпаралелювання та конвеєризації обчислювального процесу. Так у цьому процесорі на початку роботи паралельно у всі базові комірки і у додаткову комірку завантажуються елементи $a_{i,0}$ вхідного масиву A_0 і значення зовнішнього порога θ_0 відповідно, а впродовж всього обчислювального процесу у j -му циклі — елементи $a_{i,j}$ наступного P3 A_j і поточний зовнішній поріг θ_j відповідно. У конвеєрному режимі у j -му циклі в базових комірках визначається поточне мінімальне значення $q_{i,j}$ і формується поточна часткова сума $S_{i,j}$.

Особливості цього обчислювального процесу наочно видно з часової діаграми (див. рис. 5), де наведено приклад порогового підсумовування масиву з чотирьох цілих додатних чисел $A_0 = \{13, 8, 3, 11\}$ і порога $\theta_0 = 30$, а також вказано по тактах вміст операційних вузлів всіх комірок. Кожний з елементів вхідного масиву записано у відповідну базову комірку, а поріг θ_0 — у додаткову п'яту комірку.

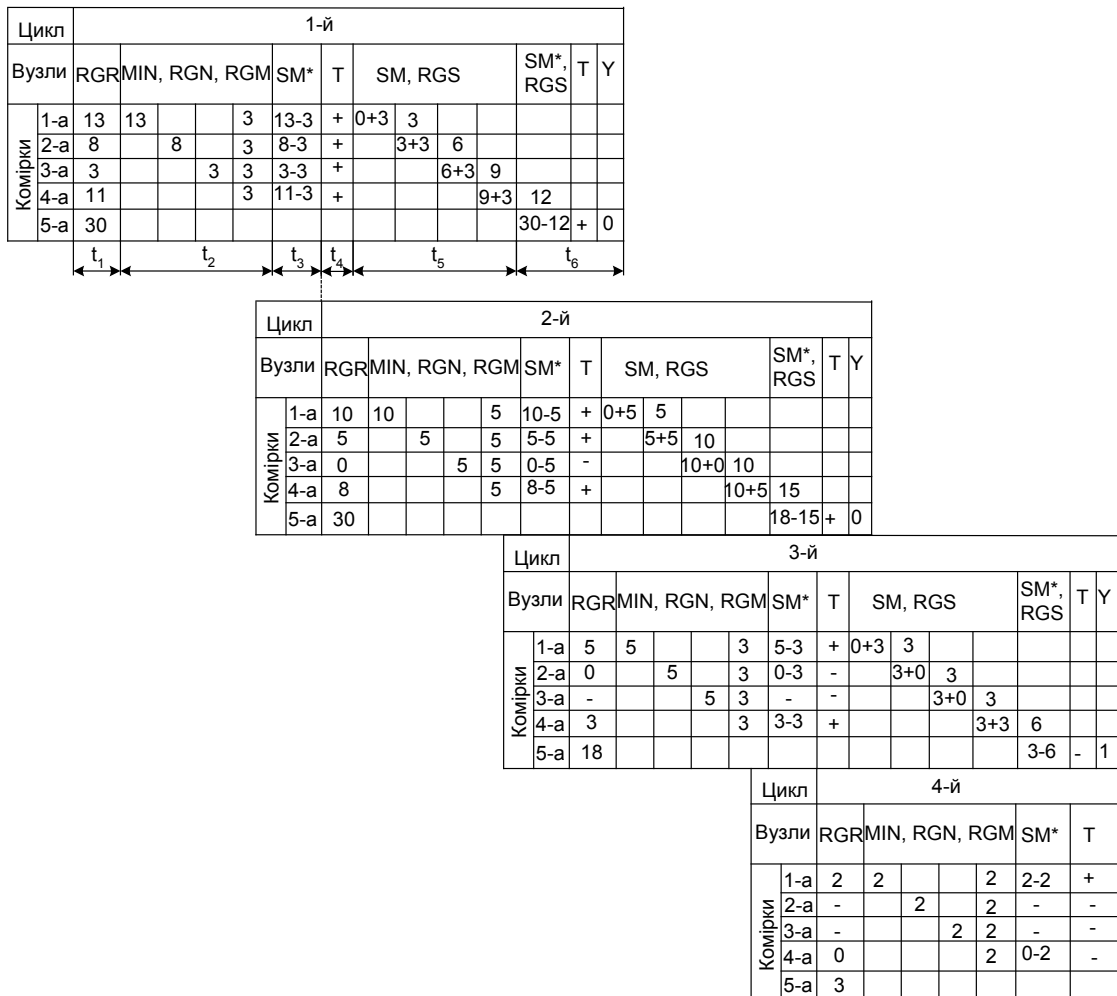


Рис. 5. Часова діаграма обробки даних у конвеєрному процесорі

З часової діаграми на рис. 5 видно, що процес порогового оброблення у КП закінчується з моментом формування одиничного вихідного сигналу Y [22].

Аналіз діаграми (див. рис. 5) показує, що час S запуску (розгону) конвеєра складають часові ін-

тервали t_1, t_2, t_3 у першому циклі, але як тільки у суматорах SM^* в усіх базових комірках сформовано елементи $a_{i,j}$ наступною РЗ A_j та їх знаки, можна починати операції наступного, другого циклу. Отже, максимальний час T виконання порогового підсумовування елементів векторного масиву за РЗ можна визначити за формулою (7), де

$$S = t_1 + t_2 + t_3;$$

$$\tau = t_4 + t_5 + t_6.$$

Кожну складову часу S запуску і такту τ конвеєра можна записати з урахуванням часу спрацювання відповідних вузлів базових і додаткової комірок, а саме:

$$t_1 = t_{MX} + t_{WR}; \quad t_4 = t_{WR}^D;$$

$$t_2 = N(t_{COM} + t_{WR}); \quad t_5 = N(t_{SM} + t_{SW} + t_{WR});$$

$$t_3 = t_{SUB}; \quad t_6 = t_{SUB} + t_{WR}^D,$$

де t_{MX} — час мультиплексування даних; t_{WR} — час запису у регістр; t_{COM}, t_{SM}, t_{SUB} — час порівняння, додавання і віднімання двох чисел відповідно; t_{SW} — час комутації даних; t_{WR}^D — час запису у тригер.

Отже, такт τ конвеєра з врахуванням того, що

$$t_{WR}^D, t_{SW}, t_{MX} \ll t_{SM}, t_{SUB}, \quad (11)$$

$$t_{SM} = t_{SUB} = t,$$

можна визначити так

$$\tau = N(t_{SM} + t_{WR}) + t_{SUB} = (N + 1)t + Nt_{WR}. \quad (12)$$

З діаграми (див. рис. 5) видно, що для роботи конвеєра без простоювання необхідно, щоб викувалось співвідношення

$$\tau = S, \quad (13)$$

оскільки можна сумістити процес послідовного накопичення кратних загальної частини поточного РЗ A_{j-1} і визначення поточного порогу θ_j j -го циклу із записом сформованих елементів наступного РЗ A_j , послідовним визначенням загальної (мінімальної) значущої частини РЗ A_j і формуванням елементів наступного РЗ A_{j+1} у $(j+1)$ -му циклі. Отже, можна теоретично передбачити, що у момент формування вихідного сигналу Y у 1-му циклі закінчується формуванням наступного РЗ A_2 у 2-му циклі і можна розпочати першу операцію 3-го циклу. Доведемо реальність цього часового процесу.

Із співвідношення (13) випливає, що

$$t_1 + t_2 + t_3 = t_4 + t_5 + t_6,$$

а з урахуванням припущень (11) і виразу (12) оскільки

$$S = Nt_{COM} + t + (N + 1)t_{WR},$$

маємо

$$Nt_{COM} + t + (N + 1)t_{WR} = (N + 1)t + Nt_{WR}$$

або

$$Nt_{COM} + t_{WR} = Nt. \quad (14)$$

Враховуючи, що $t > t_{COM}$ і $t > t_{WR}$ можна припустити слушність виразу (14).

Характеристика конвеєрного процесора з різницево-зрізовим обробленням даних

Для наведеного КП (рис. 2—4) характерні такі часові параметри у межах кожного циклу (див. рис. 5):

— максимальна затримка КС або такт роботи конвеєра за виразом (2) дорівнює

$$\tau_k = \tau_{0m} = t_{SM} = t_{SUB} = t, \quad (15)$$

а за виразом (12) максимальна затримка дорівнює

$$\tau_0 = (N + 1)t; \quad (16)$$

— величина τ_s дорівнює

$$\tau_s = N t_{WR}; \tag{17}$$

— величина τ_s/τ_0 дорівнює

$$\tau_s/\tau_0 = \frac{N t_{WR}}{(N+1)t} \ll 1;$$

— такт конвеєра з виразу (12) дорівнює

$$\tau_k = (N+1)t + N t_{WR}; \tag{18}$$

— продуктивність конвеєра з виразу (6) дорівнює

$$V_0 = 1/\tau_0 = \frac{1}{(N+1)t}. \tag{19}$$

Отже, відмінністю КП з обробленням даних за РЗ (див. рис. 2) від класичного КП (див. рис. 1) є те, що такт τ_k роботи конвеєра (1) не дорівнює такту τ конвеєра (7). Таким чином, дані на вхід конвеєра в цьому випадку подаються не через такт τ_k роботи конвеєра (15), а із затримкою на такт τ_k конвеєра (18), які різняться фактично на величину N .

Виходячи з цього, асимптотична продуктивність КП з обробленням за РЗ дорівнює

$$V_{k1} = 1/\tau_k = \frac{1}{(N+1)t + N t_{WR}} = \frac{V_0}{1 + \frac{N}{N+1} \frac{t_{WR}}{t}} = \frac{V_0}{1 + \frac{N}{N+1} k}, \tag{20}$$

а коефіцієнт використання КС у КП визначається так:

$$\Psi_1 = \frac{V_{k1}}{V_0} = \frac{1}{1 + \frac{N}{N+1} k}, \tag{21}$$

де $k = \frac{t_{WR}}{t}$.

За умови, що $k \rightarrow 0$, можна отримати максимальне значення Ψ_1 , тобто

$$\lim_{k \rightarrow 0} \Psi_1 \rightarrow 1.$$

Продуктивність КП з урахуванням кількості n ступенів конвеєра

$$V_k(n) = \frac{1}{T_{HK}/n + \tau_s}, \tag{22}$$

для цього КП може бути обчислена за умови, що $T_{HK} = S$, де T_{HK} — час спрацювання неконвеєрної частини КП. Тоді з врахуванням виразу (13) і особливостей структурної організації КП (див. рис. 2), які визначають співвідношення $n = N+1$, маємо

$$\begin{aligned} V_k(n) &= \frac{1}{\tau/(N+1) + \tau_s} = \frac{1}{\frac{(N+1)t + N t_{WR}}{N+1} + N t_{WR}} = \frac{1}{t + \frac{N}{N+1} t_{WR} + N t_{WR}} \cong \\ &\cong \frac{1}{t + (N+1)t_{WR}}, \end{aligned} \tag{23}$$

а коефіцієнт ефективності КП дорівнює

$$\Psi_2 = \frac{V_k(n)}{V_{HK}} = \frac{1}{1 + (N+1)\tau_s/T_{HK}} = \frac{1}{1 + (N+1)N t_{WR}/N t_{WR}} = \frac{1}{1 + (N+1)}.$$

Тобто, чим більша розмірність N вхідного векторного масиву даних, тим більше коефіцієнт Ψ_2 ефективності КП наближається до одиниці, тобто

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \Psi_2 \rightarrow 1.$$

Продуктивність КП з врахуванням кількості N операндів масиву даних обчислюється з виразу

$$V(n, N) = \frac{N}{t_3 + t_p + t_b},$$

де t_3, t_b — усереднений по всіх ступенях час корисної роботи конвеєра під час завантаження і видачі даних відповідно; t_p — час корисної роботи конвеєра у постійному режимі (без завантаження і видачі), а коефіцієнт завантаження конвеєра дорівнює

$$\Psi_3 = \frac{V(n, N)}{V_k},$$

де $V_k = 1/\tau_k$ — продуктивність конвеєра.

З часової діаграми (див. рис. 5) випливає, що

$$t_3 = S = \tau_k;$$

$$t_b = t_{WR} \cong 0,5t;$$

$$t_p = n\tau_k.$$

Тоді

$$V(n, N) = \frac{N}{(n+1)\tau_k + 0,5t};$$

$$\Psi_3 = \frac{N\tau_k}{(n+1)\tau_k + 0,5t} = \frac{N}{(n+1) + 0,5\frac{t}{\tau_k}},$$

а враховуючи, що $t \ll \tau_k = (N+1)t + Nt_{WR}$, і співвідношення (23), маємо

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \Psi_3 \rightarrow 1.$$

Продуктивність КП з урахуванням витрат, що пов'язані із затримкою τ_s , обчислюється так

$$V(\tau_s, N) = \frac{V_0}{(1 + \tau_s/\tau_0)(1 + n/N)},$$

а коефіцієнт використання конвеєра визначається з формули

$$\Psi_4 = \frac{V(\tau_s, N)}{V_0} = \frac{1}{(1 + \tau_s/\tau_0)(1 + n/N)}.$$

Враховуючи вирази (16), (17) і (23), маємо

$$\Psi_4 = \frac{1}{\left(1 + \frac{Nt_{WR}}{(N+1)t}\right)\left(1 + \frac{N+1}{N}\right)} = \frac{1}{\left(1 + \frac{N}{N+1}k\right)\left(2 + \frac{1}{N}\right)},$$

що дозволяє визначити верхню межу для коефіцієнта Ψ_4 за умови, що $t_{WR} < t$:

$$\lim_{\substack{N \rightarrow \infty \\ k \rightarrow 0}} \Psi_4 \rightarrow \frac{1}{2}. \quad (24)$$

Співвідношення (24) підтверджує особливості функціонування КП з обробленням даних за РЗ, зокрема те, що час S запуску співрозмірний з тактом τ_k конвеєра і кожний новий результат на виході конвеєра формується із затримкою τ_k .

Кількісні значення отриманих характеристик КП з різницево-зрізовим обробленням даних з урахуванням апаратної реалізації [23, 24] на програмованих логічних ІС (ПЛІС) відомих фірм Altera і Xilinx наведено у таблиці.

Характеристика	Конвеєрний багатовхідний суматор [23]	Конвеєрний процесор [24]
Елементна база	ПЛИС Altera	ПЛИС Xilinx
Тип ПЛИС	FPGA	CPLD
Мікросхема ПЛИС	EP1K100F C256-3	XC95288XL-6-BG256
Максимальна затримка, нс	54	27,4
Кількість вхідних операндів, n	20	16
Кількість ступенів конвеєра, n	21	17
Такт роботи конвеєра, t_k , нс	1134	466
Асимптотична продуктивність V_{k1} , млн оп./с	0,88	2,15
Коефіцієнт Ψ_1 використання комбінаційних схем	≈ 1	≈ 1
Продуктивність $V_k(n)$ з урахуванням кількості n ступенів конвеєра, млн оп./с	18,5	36,5
Коефіцієнт Ψ_2 ефективності	0,045	0,056
Продуктивність $V(n, N)$ з урахуванням кількості N операндів масиву даних, млн оп./с	0,8	1,9
Коефіцієнт Ψ_3 завантаженості конвеєра	0,91	0,89
Продуктивність $V(\tau_s, N)$ з урахуванням витрат, що пов'язані з τ_s , млн оп./с	0,43	1,04
Коефіцієнт Ψ_4 використання конвеєра	0,488	0,485

Висновки

Аналіз отриманих показників і коефіцієнтів ефективності для конвеєрного процесора з різницево-зрізовим обробленням даних підтвердив характерний для всіх конвеєрних процесорів принцип, що зі збільшенням розмірності вхідного масиву даних збільшується продуктивність роботи конвеєра, про що свідчить наближення відповідних коефіцієнтів ефективності до свого максимального значення.

Разом з тим, особливості оброблення даних за РЗ, на відміну від класичного конвеєрного оброблення даних, впливають на величину коефіцієнта використання конвеєра Ψ_4 , яка не може перевищити величину 1/2. З іншого боку, саме близькі значення величин часу S запуску і такту τ_k конвеєра дозволяють, починаючи з другого циклу, сумістити найбільш тривалі послідовні процедури: накопичення поточної часткової суми і визначення мінімального значення елементів поточного РЗ, у виконанні яких задіяно всі базові комірки КП.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кун С. Матричные процессоры на СБИС: пер. с англ. / С. Кун — М.: Мир, 1991. — 672 с.
2. Кухарев Г. А. Систолические процессоры для обработки сигналов / Г. А. Кухарев, А. Ю. Тропченко, В. П. Шмерко. — Мн.: Беларусь, 1988. — 127 с.
3. Кухарев Г. А. Алгоритмы и систолические процессоры для обработки многозначных данных / Г. А. Кухарев, А. Ю. Шмерко, В. П. Шмерко — Мн.: Наука і техніка, 1990. — 296 с.
4. Аксенов В. П. Систолические алгоритмы и процессоры / В. П. Аксенов, П. Я. Красинский, Г. В. Спиридонов // Зарубежная радиоэлектроника. — 1987. — № 7. — С. 7—33.
5. Никонов В. В. Систолическая обработка информации: элементная база и алгоритмы / В. В. Никонов, С. Г. Кравцов, В. Н. Самошин // Зарубежная радиоэлектроника. — 1987. — № 7. — С. 34—51.
6. Каневский Ю. С. Систолические процессоры. / Ю. С. Каневский — К.: Техніка, 1991. — 173 с.
7. Джагадиш Х. В. Матричные структуры для реализации итерационных алгоритмов / Х. В. Джагадиш, С. К. Рао, Т. М. Кайлат // ТИИЭР. — 1987. — Т. 75, № 9. — С. 184—203.
8. Вишенчук И. М. Алгоритмические операционные устройства и суперЭВМ. / И. М. Вишенчук, Н. В. Черкасский. — К.: Техника, 1990. — 197 с.
9. Феселов В. Ф. Высокоскоростные вычисления: Архитектура, производительность, прикладные алгоритмы и программы для суперЭВМ / В. Ф. Феселов. — М.: Радио и связь, 1988. — 432 с.
10. Ортега Дж. Введение в параллельные и векторные методы решения линейных систем: пер. с англ. / Дж. Ортега. — М.: Мир, 1991. — 367 с.
11. Самофалов К. Г. Основы построения конвейерных ЭВМ / К. Г. Самофалов, Г. М. Луцкий. — К.: Вища шк., 1981. — 224 с.

12. Мартинюк Т. Б. Оцінювання структурно-інформаційної складності паралельних алгоритмів додавання / Т. Б. Мартинюк, Н. І. Заболотна, В. В. Шолота // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 1996. — № 4. — С. 21—26.
13. Мартинюк Т. Б. Аналіз моделей паралельного підсумовування елементів числового масиву / Т. Б. Мартинюк, В. В. Хом'юк, Л. М. Куперштейн, Є. С. Матвєєв // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2002. — № 6. — С. 65—70.
14. Мартинюк Т. Б. Оцінювання ефективності алгоритмів мультиобробки масивів даних / Т. Б. Мартинюк, В. В. Хом'юк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2005. — № 5. — С. 76—82.
15. Мартинюк Т. Б. Рекурсивні алгоритми багатооперандної обробки інформації / Т. Б. Мартинюк. — Вінниця: «УНІВЕРСУМ-Вінниця», 2000. — 216 с.
16. Васюра А. С. Исследование процесса конвейерной обработки массива чисел / А. С. Васюра, Т. Б. Мартинюк, А. В. Кожем'яко // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. — 2002. — № 1(3). — С. 85—94.
17. Мартинюк Т. Б. Особливості реалізації ітераційних алгоритмів багатооперандної обробки на систолічних масивах / Т. Б. Мартинюк, А. В. Кожем'яко, Л. М. Куперштейн // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. — 2002. — № 2 (4). — С. 123—132.
18. Мартинюк Т. Б. Відображення процесу обчислення оператора групового підсумовування на систолічні структури / Т. Б. Мартинюк, А. С. Васюра, А. В. Кожем'яко [та ін.] // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2003. — № 3. — С. 53—60.
19. Мартинюк Т. Б. Методи та засоби паралельних перетворень векторних масивів даних / Т. Б. Мартинюк, В. В. Хом'юк. — Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. — 203 с.
20. Мартинюк Т. Багатофункціональна регулярна структура для обробки векторних даних / Т. Мартинюк, А. Буда, В. Хом'юк [та ін.] // Оброблення сигналів і зображень та розпізнавання образів: «УкрОБРАЗ'2004»: VII Всеукр. міжнар. конф., 11—15 жовтня 2004 р.: праці. — Київ, 2004. — С. 33—36.
21. Мартинюк Т. Б. Организация конвейерного процессора для порогового суммирования элементов векторного массива / Т. Б. Мартинюк, А. Г. Буда, Л. М. Куперштейн [та ін.] // «ПРИБОРОСТРОЕНИЕ—2004»: Междунар. науч. — техн. конф., 18—21 сент. 2004 г.: сб. тр. — Винница—Ялта, 2004. — С. 40—44.
22. Мартинюк Т. Б. Модель порогового нейрона на основе параллельной обработки по разностным срезам / Т. Б. Мартинюк // Кибернетика и системный анализ. — 2005. — № 4. — С. 78—89.
23. Кожем'яко А. В. Систолічні структури для багатооперандної обробки векторних даних: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.13.13 «Обчислювальні машини системи та мережі» / А. В. Кожем'яко. — Вінниця, 2004. — 20 с.
24. Куперштейн Л. М. Методи та засоби нейроподібної обробки даних для систем керування: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.13.05 «Елементи та пристрої обчислювальної техніки та систем керування» / Л. М. Куперштейн. — Вінниця, 2007. — 20 с.

Рекомендована кафедрою лазерної та оптоелектронної техніки

Надійшла до редакції 16.09.08
Рекомендована до друку 1.10.08

Мартинюк Тетяна Борисівна — доцент кафедри лазерної та оптоелектронної техніки.

Вінницький національний технічний університет;

Куперштейн Леонід Михайлович — доцент кафедри економічної кібернетики.

Вінницький фінансово-економічний університет