

ВІННИЦЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

На правах рукопису

Грещ —

ЗАБОЛОТНА НАТАЛІЯ ІВАНІВНА

**ОРГАНІЗАЦІЯ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ СТРУКТУР
ВИСОКОПРОДУКТИВНИХ ЛІНІЙНО-АЛГЕБРАІЧНИХ
ПРОЦЕСОРІВ ПАРАЛЕЛЬНОЇ ОБРОБКИ МАТРИЦЬ**

Спеціальність 05.13.08 - обчислювальні машини, системи та мережі, елементи і пристрої обчислювальної техніки і систем керування

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Вінниця - 1995



Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі нарисної геометрії і машинної графіки Вінницького державного технічного університету

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Кожем'яко Володимир Прокопович

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Романкевич Олексій Михайлович;
кандидат технічних наук, доцент
Яремчук Володимир Федорович.

Провідна організація: Інститут кібернетики імені
В.М. Глушкова НАН України, м. Київ


Захист відбудеться "17" 11 1995р. о "10" годині
на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 10.01.03 у
Вінницькому державному технічному університеті за адресою:
286021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВДТУ, ГУК.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці ВДТУ.

Автореферат розісланий "13" 10 1995р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради

 Колодний В.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Багаторічні дослідження по паралельній обробці великих інформаційних масивів викликані насущними потребами науки і техніки. Оскільки цілий клас задач в обчислювальній техніці, приладобудуванні, робототехніці, біомедицині формулюється в термінах матричної лінійної алгебри, то необхідність створення високопродуктивного лінійно-алгебраїчного процесору (ЛАП) паралельної обробки матриць, що є спецобчислювачем з досить високим рівнем універсальності для широкого кола задач, не викликає сумніву.

В наш час не створений процесор з функціонально повним набором паралельних матричних операцій, а відомі лише високопродуктивні спецобчислювачі (ЛАП в "вузькому" змісті слова). Група спецобчислювачів, виділених по функціональним ознакам як перемножувачі матриць, відображає найперспективніший напрямок в розвитку ЛАП. Перспективну сукупність характеристик забезпечують систолічні та хвильові розрядні структури цифрових паралельних перемножувачів. Об'єднуючи в двомірну структуру процесорні модулі, при значних розмірностях $N \times N$ та розрядностях L матриць виникають проблеми, пов'язані з обмеженими можливостями сучасних технологій виготовлення великих інтегральних схем. Недоліки електронних цифрових схем усуваються використанням оптичних методів обробки. Продуктивність акустоптичних систолічних (SAOBiC-процесорів), досягаючи рівня 10^9 - 10^{10} біт.опер./с, має обмеження, викликані точністю аналого-цифрових перетворень. Розв'язати проблему підвищення продуктивності дозволить створення цифрових ЛАП паралельної обробки матриць, в яких поєднуються переваги традиційної цифрової обробки зі специфікою техніки оптичних картинних обчислень.

Мета роботи - розробка та дослідження математичних моделей, алгоритмів і структур високопродуктивних лінійно-алгебраїчних процесорів паралельної обробки матриць.

Для досягнення поставленої мети вирішуються такі задачі:

- 1) аналіз матричних операцій лінійної алгебри в паралельних алгоритмах спецпроцесорів реального часу та аргументація набору базових операцій;
- 2) класифікаційний огляд багатофункціональних та спеціалізованих ЛАП паралельної обробки матриць на основі обчислення добутку матриць, визначення комплексу системних вимог до них;
- 3) розробка та дослідження математичних моделей обчислювальних процесів, алгоритмів та структур ЛАП паралельної обробки

матриць на основі обчислення матричного та векторно-матричного добутку: з цифровим часовим інтегруванням (ЦЧІ); з просторово-часовим інтегруванням (ПЧІ) на основі цифрової згортки;

4) оцінка ефективності структурних схем ЛАП в залежності від розмірності та розрядності матриць;

5) проведення машинного моделювання паралельних алгоритмів виконання лінійно-алгебраїчних матричних операцій;

6) дослідження аспектів технічної реалізації ЛАП паралельної обробки матриць на оптоелектронній елементній базі.

Методи дослідження. В роботі використовуються методи математичного аналізу, бульової алгебри, цифрової обробки зображень та методи проектування електронних та оптоелектронних пристроїв.

Наукова новизна роботи.

1. Проведено класифікацію паралельних перемножувачів матриць.

2. Розроблено та досліджено просторово-часові матричні математичні моделі організації обчислень та відображаючи їх структури для паралельного перемноження багаторазрядних матриць: на основі цифрового часового інтегрування та на основі обчислення цифрової згортки.

3. Розроблено та досліджено просторово-часові математичні моделі операції векторно-матричного перемноження та відображаючи їх структури.

4. Розроблено та досліджено просторово-часову математичну модель операції перемноження знакозмінних матриць та структуру для її відображення.

5. Запропоновані та досліджені варіанти структурної реалізації базових вузлів ЛАП.

Практична значимість результатів. Проведені дослідження виконувались відповідно плану Міністерства освіти України (додаток до повідомлення Міністерства освіти України від 19.07.89 N110-20/54-100). Результати досліджень включені до комплексної програми секції "Оптоелектроніка" АН України та "Оптичні процесори" Держкомітету СРСР народної освіти (вказівка до наказу N19-23 від 15.05.90).

Для практичних цілей істотним є те, що в роботі запропоновані математичні моделі, алгоритми та структурна організація ЛАП на основі перемноження матриць при відсутності структурних обмежень на розмірність та розрядність матриць, що обробляються.

1. Розроблені алгоритми роботи та структури паралельних перемножувачів матриць з ЦЧІ, орієнтовані на 4 варіанти законів зміни в часі вагового коефіцієнту, що враховується при накопичу-

ванні сум часткових добутоків.

2. Розроблені алгоритми роботи та структури паралельних перемножувачів (векторно-матричних та матричних) з цифровим ПЧІ на основі цифрової згортки: починаючи з старших розрядів; починаючи з молодших розрядів.

3. Зроблено оцінку ефективності структурних схем перемножувачів матриць, орієнтованих на різні ступіні паралелізму формування часткових добутоків та характеру їх подальшого зваженого часового накопичування, в залежності від розмірності та розрядності матриць.

4. Розроблено алгоритм роботи та структуру ЛАП для паралельного перемноження знакомінних матриць.

5. Розроблено схемотехнічні варіанти реалізації базових вузлів ЛАП на оптоелектронній елементній базі.

Впровадження результатів роботи. Результати теоретичних та практичних досліджень знайшли застосування в держбюджетних темах N 67-Д-7, N 67-Д-28, N 55-ДП-73, при розробці векторно-матричного перемножувача оптичного цифрового процесора обробки радіосигналів в НДІРО НВО "Вега" (м.Москва), передбачається їх використання в учбовому процесі.

На захист вноситься:

1. Методика проектування високопродуктивних ЛАП паралельної обробки матриць.

2. Просторово-часові матричні математичні моделі організації обчислювальних процесів, паралельні алгоритми та відображаючі їх структури для паралельного перемноження матриць: на основі цифрового часового інтегрування та на основі обчислення цифрової згортки.

3. Просторово-часові розрядні математичні моделі операції векторно-матричного перемноження та відображаючі їх структури перемножувачів.

4. Паралельний алгоритм обчислення добутку знакомінних матриць та структурна схема для його реалізації.

5. Технічні рішення базових вузлів ЛАП на оптоелектронній елементній базі.

Апробація роботи. Результати дисертаційної роботи доповідались на науково-технічній конференції "Оптические и оптико-электронные средства обработки информации" (Ленінград, 1989), школі-семінарі "Теория и создание систем технического зрения" (Москва, 1990), на першій та другій Всеукраїнських міжнародних конференціях "Обработка сигналов и изображений та розпізнавання об-

разів" (Київ, 1992, 1994), "Приладобудування - 95" (Львів, 1995).

Публікації. Основні результати роботи викладені в 31 науковій роботі, з яких-6 авторських свідоцтв СРСР, 2 патенти Росії.

Обсяг та структура дисертації. Робота викладена на 144 сторінках машинописного тексту, ілюструється рисунками на 60 сторінках, таблицями на 9 сторінках, складається з вступу, чотирьох розділів, висновку, переліку використаної літератури з 124 назв на 13 сторінках та 6 додатків на 95 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність роботи, сформульовані мета роботи та основні положення, що виносяться на захист, наведені відомості про обсяг та апробацію роботи.

В першому розділі проведено аналіз основних матричних операцій лінійної алгебри в паралельних алгоритмах рельного часу з метою обґрунтування набору базових операцій ЛАП паралельної обробки матриць. В пошуках компромісу між багатофункціональними та спеціалізованими ЛАП розглянута концепція створення ЛАП на основі обчислення добутку матриць, як універсальної операції розв'язку широкого кола задач.

Проведено класифікаційний огляд відомих багатофункціональних ЛАП та спецобчислювачів для перемноження матриць за такими аспектами, як загальна характеристика, архітектурний, алгоритмічний, структурний аспекти, реалізація. Кожен з аспектів розглянуто за відповідними ознаками, серед яких найбільш вагомі тип даних, метод обчислення в просторі та часі, тип паралелізму, спосіб вводу-виводу інформації.

Сформульовано системні вимоги до ЛАП на основі обчислення добутку матриць: 1) продуктивність $10^9 - 10^{12}$ біт.опер./с; 2) цифрова точність обробки; 3) тактова частота 100 МГц-1ГГц; 4) поєднання паралельної обробки з організацією паралельного вводу-виводу матриць; 5) відповідність структури і фізичної форми представлення вхідної інформації і вихідної інформації; 6) відсутність обмежень на параметри розмірності $N \times N$ матричних операндів та розрядність L їх елементів.

Встановлена відсутність відомих ЛАП, що задовольняють комплексу вимог та обґрунтована необхідність розробки нових високопродуктивних ЛАП.

Сформульовано ціль та задачі досліджень.

У другому розділі згідно запропонованої методики проектування цифрових ЛАП паралельної обробки матриць побудовані матема-

тичні моделі операції паралельного перемноження матриць.

Операція представляється в вигляді просторово-часового розрядного рівняння в матричній формі або в вигляді системи розрядних рівнянь, які описують процес обчислення на рівні паралельного формування в просторі та часі всіх елементів набору бінарних розрядних зрізів шуканого масиву. Розрядний зріз (РЗ) - це бінарна матриця (картина), складена із значень (0 або 1) одноимених розрядів кодів елементів матриці.

Математичним моделям відповідають фізичні моделі, сукупність яких являє однорідні обчислювачі з паралельною (картинною) логічною структурою, на вхід якої паралельно поступають, проходять обробку, а на виході формування всі елементи РЗ вхідних масивів. Моделі та відображаючи їх структури враховують специфіку оптичних паралельних обчислень, що зумовлює реалізацію спецобчислювачів на елементній базі оптики та оптоелектроніки.

Представляючи вхідні $A_{[N \times N]}$, $B_{[N \times N]}$ та вихідну $C_{[N \times N]} = AxB$ числові матриці відповідними наборами РЗ

$$A = \sum_{\alpha=0}^{L-1} 2^{\alpha} A_{(\alpha)}, \quad B = \sum_{\beta=0}^{L-1} 2^{\beta} B_{(\beta)}, \quad C = \sum_{\gamma=0}^{P-1} 2^{\gamma} C_{(\gamma)}, \quad (1)$$

$$P = \text{int}[\log_2(N+1)], \quad (2)$$

(int[R]-ціла частина числа з округленням до більшого цілого), матрицю результат C отримують в процесі накопичування часткових добутків :

$$C = \sum_{\alpha=0}^{L-1} \sum_{\beta=0}^{L-1} 2^{(\alpha+\beta)} (A_{(\alpha)} \times B_{(\beta)}), \quad (3)$$

де $2^{(\alpha+\beta)}$ -ваговий коефіцієнт; $(A_{(\alpha)} \times B_{(\beta)}) = C^{(\alpha,\beta)}$ - частковий добуток.

Частковий добуток (ЧД) - це матриця багаторазрядних чисел, сформованих під час перемноження бінарних матриць, що представляється набором з

$$K = \text{int}[\log_2(N+1)] \quad (4)$$

розрядних зрізів $C^{(\alpha,\beta)}_{(k)}$, де $k = 0, (K-1)$:

$$C^{(\alpha,\beta)} = \sum_{k=0}^{K-1} 2^k C^{(\alpha,\beta)}_{(k)}. \quad (5)$$

Математична модель перемноження бінарних матриць має вигляд:

$$C^{(\alpha,\beta)}(t) = \sum_{t=0}^{N-1} Z(t), \quad (7)$$

$$Z(t) = (R(\Psi \leftarrow^{m-t} (A_{(\alpha)})) \wedge E) \wedge \Psi \uparrow^{m-t} (B_{(\beta)}), \quad (8)$$

де $Z(t)$ - бінарний базовий компонент ЧД; Φ - і Φ^\dagger - матричні оператори циклічного паралельного зсуву вліво та вгору; E - одинична матриця; R - оператор тиражування елементів до розміру строк; t - час.

Серед алгоритмів перемноження матриць, синтезованих на основі аналізу законів $\alpha(t), \beta(t)$ в (3), виділяються дві групи: з цифровим часовим інтегруванням (ЦЧІ); з просторово-часовим інтегруванням (ПЧІ) на основі цифрової згортки.

Перша група алгоритмів передбачає організацію підсумування L^2 ЧД в вигляді цифрового часового накопичування (інтегрування) послідовності $L^2 K$ бінарних РЗ, які представляють відповідні ЧД, з урахуванням їх вагового коефіцієнту $2^{(\alpha(t)+\beta(t))}$ та вагового коефіцієнту 2^k , що відповідає позиції РЗ в представленні ЧД. Різновидність алгоритмів обумовлена ступенем паралелізму на рівні формування (послідовного, паралельного, паралельно-групового) ЧД та характером їх подальшого накопичування в часі, що однозначно визначається законами $2^{(\alpha(t)+\beta(t))}$.

Математична модель алгоритмів з послідовним формуванням часткових добутків слідує:

$$C(t) = \sum_{t=0}^{L-N-1} \Delta T_1 2^{(\alpha(t)+\beta(t))} Z(t), \quad (9)$$

де ΔT_1 - такт підсумування; $Z(t)$ визначається згідно (8).

В роботі розглянуті 4 різновидності математичної моделі (9), орієнтовані на 4 варіанти залежності $2^{(\alpha(t)+\beta(t))}$, та моделі з паралельним та з паралельно-груповим формуванням ЧД.

Група алгоритмів з ПЧІ на основі цифрової згортки передбачає паралельно-групове формування L ЧД в кожній групі (число груп- L), що мають однакові значення вагових коефіцієнтів $2^{(\alpha(t)+\beta(t))}$ в часі, які забезпечуються за рахунок "захисних" часових проміжків шляхом обробки додатково введених в представлення матриці A нульових РЗ

$$A_{(\alpha(t))} = \begin{cases} A_{(\alpha(t))}, & \text{якщо } \alpha(t) = 0, (L-1); \\ 0, & \text{якщо } \alpha(t) < 0, \alpha(t) = -L, (2L-2). \end{cases} \quad (10)$$

Виконуючи цифрову згортку зваженої послідовності L бінарних базових компонент $Z_{(\beta=0, (L-1))}$ ЧД шляхом ПЧІ формується Q -розрядна матриця з ваговим коефіцієнтом $2^{(\alpha(t)+\beta(t))}$

$$\sum_{\beta=0}^{L-1} Z_{(\beta)}(t) = \sum_{\alpha=0}^{Q-1} 2^{\alpha} Z_{(\alpha)}^*(t), \quad (11)$$

$$Q = \text{int}[\log_2(N+1)] \quad (12)$$

Накопичування зваженої послідовності згорток, представлених наборами РЗ (11), триває на протязі часу T_2 формування результату

$$C = \sum_{t=1}^{(2^L-1)N\Delta T_2} 2^{(\alpha(t)+\beta(t))} \sum_{\beta=0}^{L-1} Z_{(\beta)}(t), \quad (13)$$

де ΔT_2 - такт накопичування.

В роботі приводяться математичні моделі векторно-матричного перемноження на основі обчислення згортки, починаючи як з молодших, так і з старших РЗ.

Враховуючи переваги ЦЧІ перед ПЧІ, пов'язані з можливістю ефективної обробки знакозмінних матриць, розроблено математичну модель перемноження знакозмінних матриць з ЦЧІ.

Розпаралелювання обчислень на рівні обробки розрядних зрізів представлення вхідних операндів з розглядом параметру часу t є тими новими відомостями, що вносяться в теорію розпаралелювання обчислювальних процесів лінійно-алгебраїчних спецобчислювачів.

У третьому розділі згідно системного підходу розроблено структурну організацію паралельних перемножувачів матриць, які входять до складу багатофункціональних ЛАП паралельної обробки матриць. Структура останніх передбачає використання пристроїв вводу з паралельними входами-виходами, що перетворюють числові матриці в набори бінарних РЗ (аналого-цифрові картинні перетворювачі), та стекової сторінкової пам'яті бінарних картин. Таким чином, структурна організація ЛАП дозволяє організувати обчислення в темпі вводу інформації.

По кожній з розглянутих в главі 2 математичній моделі перемножувачів багаторозрядних матриць, векторно-матричних перемножувачів та перемножувачів знакозмінних матриць запропоновані конкретні структури для реалізації.

Їх базовим вузлом є перемножувач бінарних матриць (ПБМ).

Бінарні зрізи $A_{(\alpha)}$ та $B_{(\beta)}$ записують в двомірні реєстри зсуву ДРЗ1 та ДРЗ2. Картинний множувальний блок "I" формує на виході бінарні базові компоненти Z ЧД, які накопичуються в часі за допомогою картинного накопичувального блоку КНБ. Кожен такт роботи ПБМ супроводжується паралельним зсувом інформації вліво в ДРЗ1 та вгору в ДРЗ2.

Оцінюючи такт ΔT роботи ПБМ, виходячи із значення коефіцієнта "глибини" схеми КНБ (кількість РЗ) та внутрішнього такту (τ) обчислень, що визначається часом повного бітового сумування з урахуванням картини переносу, час обробки ПБМ складає

$$T = N \text{int}[\log_2(N+1)]\tau. \quad (14)$$

Структура перемножувача багаторозрядних матриць з ЦЧІ з послідовною обробкою бінарних РЗ часткових добутоків (рис.1) базується на ПЕМ з використанням КНБ зі зваженням, який організує накопичування $Z(t)$ з попереднім домноженням на ваговий коефіцієнт $2^{(\alpha(t)+\beta(t))}$. Шляхом апаратного розпаралелювання кількості ПЕМ до L^2 та L синтезуються структури перемножувачів з ЦЧІ з паралельним та паралельно-груповим формуванням ЧД.

Для визначення впливу законів $2^{(\alpha(t)+\beta(t))}$ на характеристики перемножувачів з ЦЧІ синтезовано структурні схеми КНБ. Установлено, що структура перемножувача з КНБ на основі бітового картинного суматора та двох регістрів, що орієнтована на використання "захисного" часового проміжку, є найшвидкодійною при мінімальних апаратурних затратах.

$$T_{1,4} = 2 \cdot (NL(L+K)+L)\tau. \quad (15)$$

Структура перемножувача матриць з ЦЧІ на основі цифрової згортки містить (рис.2) регістр асуву RG картинного типу з просторовим асувом на 1 РЗ в бік молодших РЗ, що використовується для організації вводу РЗ матриці **A**; сторінкову пам'ять для паралельного запису РЗ матриці **B**; L векторних блоків (сукупність ДРЗ1, ДРЗ2 та блоку "І" з відповідними зв'язками) для формування $Z(\)$, картинний блок КНБ1 для формування Q-розрядної згортки, картинний блок КНБ2 зі зваженням для формування Р-зрізового результату **C**.

Час обробки перемножувача з ЦЧІ на основі згортки оцінюється $T_{2-} = N \cdot \text{int}[\log_2(L+1)](2L-1)(3L + \text{int}[\log_2(N+1)])\tau. \quad (16)$

Таким чином, в роботі розглянуто 8 структур перемножувачів багаторозрядних матриць. На основі критерію ефективності

$$E' = \frac{0}{3 \times S}, \quad [\text{біт.оп./}\tau \times \text{ум.вузлів}], \quad (17)$$

який враховує кількість бітових операцій за час обробки T , кількість S внутрішніх тактів τ за час обробки T , апаратурні затрати Z , проведено порівняльний аналіз варіантів та досліджено зміну ефективності в залежності від параметрів N та L .

При $L=32$, $N=32$, $\tau=30$ нс продуктивність найефективнішої з розроблених структур перемножувачів (з ЦЧІ на основі використання "захисних" обчислювальних проміжків) складає $P_{1,4}=10^{11}$ біт.оп./с, в той час, як продуктивність одного з найкращих аналогів - SAOBiC-процесору, не перевищує рівня 8×10^9 біт.оп./с. за рахунок обмежень аналого-цифрового методу перетворень, що використовується. Зняття структурних обмежень на параметри N та L в запропонованих структурах перемножувачів, що досягається використанням

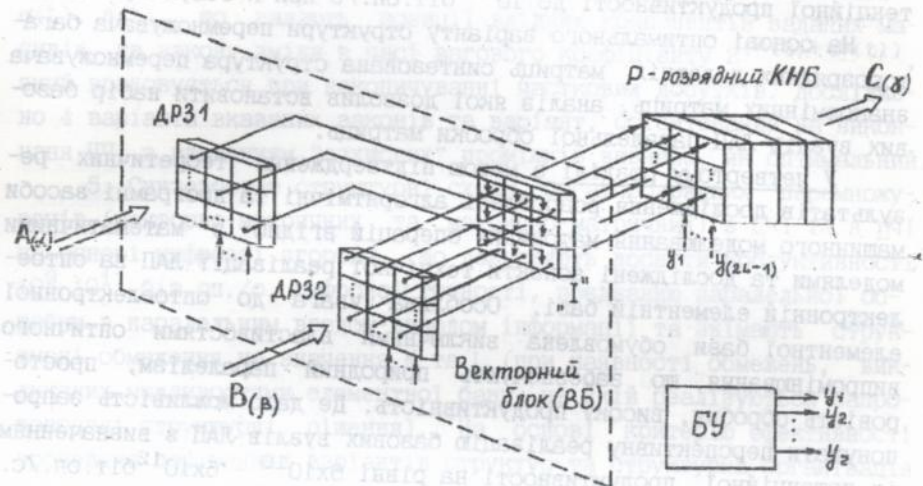


Рис.1. Структурна схема паралельного перемножувача матриць з ПЧІ

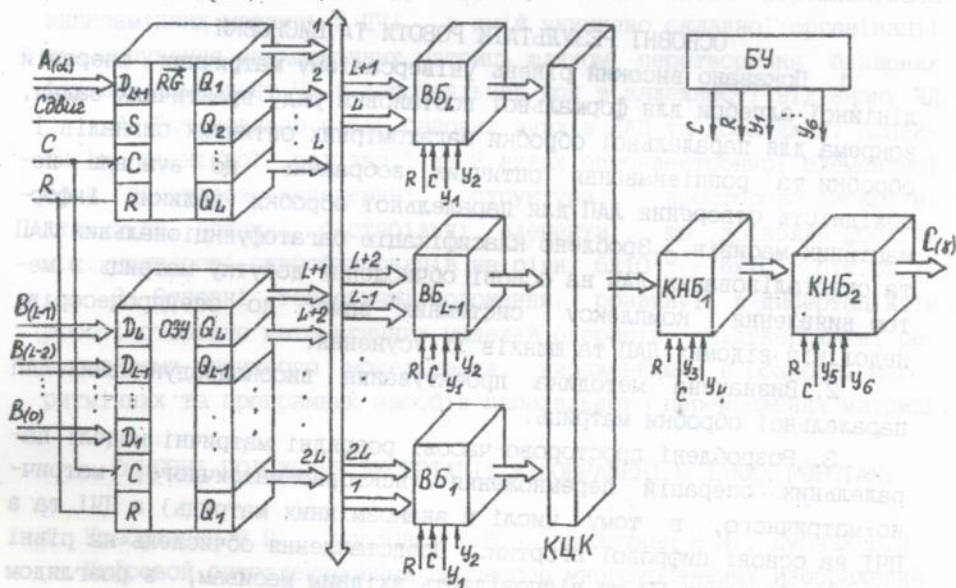


Рис.2. Структурна схема паралельного перемножувача з ПЧІ на основі цифрової згортки

принципів поарізової обробки та ЦЧІ, сприяє збільшенню потенційної продуктивності до 10^{13} біт.оп./с при $N > 512, L > 8, \tau = 10$ нс.

На основі оптимального варіанту структури перемножувача багаторозрядних додатніх матриць синтезована структура перемножувача знакозмінних матриць, аналіз якої дозволив встановити набір базових вузлів ЛАП паралельної обробки матриць.

У четвертому розділі з метою підтвердження теоретичних результатів дослідження розроблені алгоритмічні та програмні засоби машинного моделювання матричних операцій згідно з математичними моделями та досліджені аспекти технічної реалізації ЛАП на оптоелектронній елементній базі. Особлива увага до оптоелектронної елементної бази обумовлена виключними властивостями оптичного випромінювання, що забезпечують природний паралелізм, просторовість обробки, високу продуктивність. Це дало можливість запропонувати перспективну реалізацію базових вузлів ЛАП з визначенням їх потенційної продуктивності на рівні $6 \times 10^{10} - 6 \times 10^{12}$ біт.оп./с. Але для використання переваг оптичних цифрових обчислень та реалізуючих їх структур необхідно вирішення ряду фізичних та технологічних проблем, пов'язаних з розробкою та створенням оптоелектронних трьохмірних 3-D інтегральних схем.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ТА ВИСНОВКИ

1. Показано високий рівень універсальності матричних операцій лінійної алгебри для формальної постановки ряду практичних задач, зокрема для паралельної обробки багатомірних оптичних сигналів і обробки та розпізнавання оптичних зображень, що зумовив необхідність створення ЛАП для паралельної обробки великих інформаційних масивів. Зроблено класифікацію багатofункціональних ЛАП та спеціалізованих ЛАП на основі обчислення добутку матриць з метою виявлення комплексу системних вимог до спецпроцесорів, недоліків відомих ЛАП та шляхів їх усунення.

2. Визначена методика проектування високопродуктивних ЛАП паралельної обробки матриць.

3. Розроблені просторово-часові розрядні матричні моделі паралельних операцій перемноження (векторно-матричного, матрично-матричного, в тому числі й знакозмінних матриць) з ЦЧІ та з ПЧІ на основі цифрової згортки. Представлення обчислень на рівні обробки бінарних РЗ, що відповідають вхідним масивам, з розглядом параметру часу, що відображено в моделях, є тими новими відомостями, які вносяться в моделювання паралельних обчислювальних процесів.

4. Як на один із шляхів синтезу нових алгоритмів паралельного цифрового перемноження матриць вказано на визначення законів $\alpha(t)$, $\beta(t)$, що задають позиції вхідних компонентів заданих масивів, та закону зміни в часі вагового коефіцієнту $2^{(\alpha(t)+\beta(t))}$, який враховується при накопичуванні часткових добутків. Досліджено 4 варіанти вказаних законів та варіант, орієнтований на виконання ПЧІ з введенням "захисних" проміжків, визнано, як оптимальний.

5. Синтезовано структурні схеми багаторозрядних перемножувачів (векторно-матричних та матрично-матричних) з ПЧІ та з ПЧІ на основі цифрової згортки, що дозволяють досягти продуктивності 10^9-10^{11} біт.оп./с, цифрової точності, поєднанню паралельної обробки з паралельним вводом-виводом інформації та знімають структурні обмеження на значення N та L (при наявності обмежень, викликаних можливостями елементної бази, на якій реалізуються запропоновані структурні рішення). На основі критерію ефективності проведено порівняння варіантів структур та структурна організація перемножувача з ПЧІ з послідовним формуванням ЧД та організацією їх зваженого накопичування з використанням "захисного" часового проміжку визначена як оптимальна (потенційне значення продуктивності досягає рівня 10^{13} біт.оп./с).

6. Розроблена структурно-функціональна схема перемножувача знакозмінних матриць з ПЧІ, в якій уникнено складної організації накопичування знакозмінних матриць шляхом перетворення бінарних базових компонент ЧД в доповняльний код в залежності від знаку ЧД.

7. Встановлено набір базових вузлів ЛАП та досліджені аспекти їх технічної реалізації на 3 видах оптоелектронної елементної бази (просторово-неперервні структури, просторово-дискретні структури, оптичні бістабільні елементи), що дозволяє досягти продуктивності спецобчислювачів на рівні $6 \times 10^{10} - 6 \times 10^{12}$ біт.оп./с.

8. Основні теоретичні положення, розвинуті в дисертаційній роботі стосовно математичних моделей операцій, підтвердженні результатами машинного моделювання, вираженими в розробці алгоритмічних та програмних засобів паралельного перемноження матриць.

ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ДИСЕРТАЦІЇ ВІДОБРАЖЕНІ В ТАКИХ РОБОТАХ:

1. Красиленко В.Г., Мартынюк Т.Б., Заболотная Н.И., Дубчак В.Н. Цифровой оптоэлектронный процессор многоуровневых изображений // Электронное моделирование, 1993. - №3. - Том 15. - С.13-18.
2. Красиленко В.Г., Заболотная Н.И., Евтихийев Н.Н., Долгий В.А., Савицкий А.В. Варианты реализации векторного блока для перем-

- ножителя матриц // Радиотехника, 1993. - N10-12. - С.64-70.
3. Красиленко В.Г., Заболотная Н.И., Савицкий А.В. Моделирование параллельных операций векторно-матричного перемножения на основе вычисления свертки с пространственно-временным интегрированием // Электронное моделирование, 1994. - N3. - Т.16. - С.26-31.
 4. Красиленко В.Г., Заболотная Н.И., Етихийев Н.Н. Эффективность многоканального блока накапливающих сумматоров со взвешиванием в цифровом векторно-матричном перемножителе // УСИМ, 1995. - N1. - С.31 - 37.
 5. Кожемяко В.П., Мартынюк Т.Б., Заболотная Н.И. Системный анализ параллельных оптоэлектронных процессоров / Препринт АН Украины. - Львов, Ин-т ШММ. - 1992. - N100. - 300 с.
 6. Заболотна Н. Теоретичні основи розробки лінійно-алгебраїчних процесорів для паралельної обробки зображень / В кн.: Обробка сигналів і зображень та розпізнавання образів. - Тези другої Всеукраїнської конференції. - Київ, 1994. - С.231-233.
 7. Заболотная Н.И. Цифровой оптоэлектронный умножитель знакопеременных матриц : Деп. в ГНТБ Украины / Винниц. гос. техн. ун-т. N 2005. - Ук94.- Винница, 1994. - 39 с.
 8. Исследование принципов построения и разработка оптоэлектронного векторно-матричного перемножителя оптического процессора радиосигналов / Промеж. отчет о НИР, гос. рег. NO1900065692. - Винница, 1991.
 9. Кожем"яко В. , Заболотна Н. Цифровий оптоелектронний процесор для перемноження знакозмінних матриць - картин зображень / В кн.: Обробка сигналів і зображень та розпізнавання образів. - Тези другої Всеукраїнської конференції. - Київ, 1994. - С.228 - 231.
 10. Красиленко В.Г., Заболотная Н.И. Матричный линейно-алгебраический процессор обработки изображений / В кн.: Оптические и оптикоэлектронные средства обработки информации. - Сб. трудов АН СССР ФТИ. - Ленинград, 1989. - С.97-108.
 11. Красиленко В.Г., Заболотная Н.И., Савицкий А.В. Реализация систем технического зрения на базе параллельных спецпроцессоров векторно-матричной обработки изображений / В кн.: Теория и практика создания систем технического зрения. - Материалы семинара. - М., 1990. - С.24-29.
 12. Красиленко В., Заболотна Н. Лінійно-алгебраїчні процесори для паралельної обробки зображень / В кн.: Обробка сигналів і зображень та розпізнавання образів.- Тези першої Всеукраїнської

конференції. Київ, 1992. - С.203-205.

13. Мартынюк Т.В., Заболотная Н.И., Дубчак В.Н. О возможностях реализации цифровых оптоэлектронных процессоров обработки много-разрядных матричных операндов: Деп. в УкрИНТЭИ / Винниц. поли-техн. ин-т. - №31. - Винница, 1992. - 34 с.
14. Разработка теории и принципов создания параллельных оптоэлектронных процессоров, их архитектур и элементной базы. - Заключ. отчет о НИР, гос. рег. NO193U027463, инв.NO394U002103, Винница, 1994.

Авторські свідоцтва та патенти на винаходи:

1. А.с. N1603334 (СССР). Оптическое устройство для логической обработки информации / Красиленко В.Г., Заболотная Н.И., Одинокоев С.В. - Оpubл. в БИ N 40, 1990.
2. А.с. N1635252 (СССР). Оптоэлектронная бистабильная ячейка / Красиленко В.Г., Михальниченко Н.Н., Кнаб О.Д., Шмеркин Й.А., Заболотная Н.И. - Оpubл. в БИ N 10, 1991.
3. А.с. N1691859 (СССР). Оптоэлектронное устройство для логической обработки изображений / Красиленко В.Г., Заболотная Н.И., Морозов В.Н. - Оpubл. в БИ N42, 1991.
4. А.с. N1702429 (СССР). Способ записи и хранения изображений и устройство для их осуществления / Красиленко В.Г., Заболотная Н.И., Колесницкий О.К., Одинокоев С.В. - Оpubл. в БИ N 48, 1991.
5. А.с. N1709289 (СССР). Оптоэлектронное суммирующее устройство / Красиленко В.Г., Заболотная Н.И., Морозов В.Н. - Оpubл. в БИ N4, 1992.
6. А.с. N1781679 (СССР). Устройство для умножения квадратных матриц картин-изображений / Красиленко В.Г., Заболотная Н.И. - Оpubл. в БИ N46, 1992.
7. Патент N2018919 (Россия). Устройство для умножения матриц картин - изображений / Красиленко В.Г., Заболотная Н.И., Ев-тихийев Н.Н. - Оpubл. в БИ N16, 1994.
8. Патент N2022334 (Россия). Устройство для перемножения число-вых матриц / Красиленко В.Г., Заболотная Н.И. - Оpubл. в БИ N20, 1994.

Автор вважає своїм обов'язком висловити подяку к.т.н. Красиленко В.Г., к.т.н. Мартинюк Т.В., які поряд з науковим керівником надавали допомогу у вирішенні поставлених задач.

Zabolotnaya N.I. Structure calculating organization of liner algebra processors of parallel matrix treating.

Thesis for obtaining Candidate of technical sciences degree on speciality 05.13.08 - Computer, Computation system and Networks, Elements and Computation technique devices and control systems, Vinnitsa State Technical University, Vinnitsa, 1995.

31 scientific works, wich contain theoretical and experimental researches mathematical models, algorithms and calculating structures of high productivity linear algebra processors (LAP) of parallel matrix treating, are defended. New projecting method of LAP, digital structures of parallel vector-matrix and matrix-matrix multipliers, optoelectronic version realization of basic unit LAP are proposed. The suggested specialized linear algebra processor of parallel matrix treating has been introduced in industry.

Заболотная Н.И. Организация вычислительных структур высокопроизводительных линейно-алгебраических процессоров параллельной обработки матриц.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.08 - вычислительные машины, системы и сети, элементы и устройства вычислительной техники и систем управления; Винницкий государственный технический университет, Винница, 1995.

Защищается 31 научная работа, которая содержит теоретические и экспериментальные исследования математических моделей, алгоритмов и структур высокопроизводительных линейно-алгебраических процессоров (ЛАП) параллельной обработки матриц. Предлагается новая методика проектирования ЛАП, эффективные структуры параллельных перемножителей матриц, варианты оптоэлектронной реализации базовых узлов ЛАП. Осуществлено промышленное внедрение предложенного процессора.

Ключові слова: лінійно-алгебраїчний процесор, розрядний зріз, цифрове часове інтегрування, просторово-часове інтегрування, цифрова згортка.

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

Віддруковано фірмою "КОНТИНЕНТ"
зам. 1792-01 тир. 100 прим.

4451814

AB 33.295