

Лекція 8. Паралельні обчислювальні системи нетрадиційної архітектури (ч. 1).

План лекції.

1. Систолічні обчислювальні системи:
 - поняття систолічної системи та її особливості;
 - класифікація систолічних систем;
 - топологія систолічних систем;
 - структура процесорних елементів (ПЕ);
 - обчислювальні системи з обробкою за принципом хвильового фронту.
2. Квасисистолічні обчислювальні системи та їх застосування.

1. Поняття систолічної системи. У традиційних послідовних ЕОМ (ПК) дані, що зчитуються з пам'яті, обробляються в процесорному елементі (процесорі) і пізніше результат обробки записується знову у пам'ять (див. рис. 1). Автори ідеї систолічної системи **Кунг і Лейзерзон** (Kung H.T., Leiserson Charles E.) запропонували організувати обчислення так, щоб дані на своєму шляху від зчитування із пам'яті до запису результату обчислень у пам'ять проходили через якнайбільшу кількість процесорних елементів (див. рис. 2).



Рис. 1

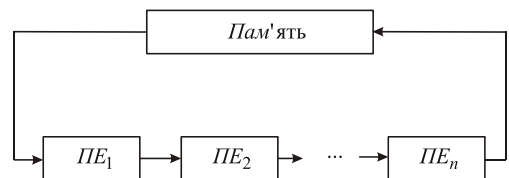


Рис. 2

Якщо порівняти структуру такої обчислювальної системи з структурою живого організму, то за аналогією пам'яті можна відвести роль серця, множині ПЕ – роль тканин, а потік даних розглядати як циркуляцію крові. Звідси і походить назва систолічна система (або масив, матриця). Термін «сistolічна» (systolic) вказує на синхронність, неперервність і хвилеподібність просування оброблюваних даних від однієї границі масиву до іншої. **Систола** – це серцевий м'яз, який працює також синхронно, ритмічно і без зупинок протягом усього життя людини. Систолічна обчислювальна система «прокачує» через себе оброблювані дані.

Систолічна обчислювальна система – це однорідне обчислювальне середовище із ПЕ. Вона суміщає в собі властивості конвеєрної і паралельної обробки та має такі **особливості**:

- обчислювальний процес в систолічних системах є **неперервною та регулярною** передачею даних від одного ПЕ до іншого без запам'ятовування проміжних результатів обчислень;

- кожна компонента вхідних даних вибирається із пам'яті **один раз** і використовується стільки разів, скільки необхідно згідно з алгоритмом; ввід даних здійснюється в крайні ПЕ системи;
- ПЕ, які утворюють систолічну систему (СС), є **однотипними** і кожен з них може бути менш універсальним, ніж процесори звичайних багатопроцесорних обчислювальних систем;
- потоки даних і керуючих сигналів є регулярними, що дозволяє об'єднувати ПЕ **локальними зв'язками** мінімальної довжини;
- функціонування таких систем дозволяє сумістити **паралелізм з конвеєрною** обробкою даних;
- продуктивність системи можна покращити завдяки **долученню** до неї певної кількості ПЕ, до того ж коефіцієнт підвищення продуктивності при цьому є лінійним;
- кожен ПЕ і кожна компонента (проміжна) даних на кожному такті приймає участь в **корисній** (такій, що впливає на кінцевий результат) операції;
- структура СС є **інваріантною** відносно розмірності задачі.

Пояснимо останній пункт. Під час оброблення даних СС можна виділити два типи розмірностей задачі: головну і другорядну. Неформально, головна розмірність – це «довжина» оброблюваного потоку даних, а другорядна – це його «ширина». На рис. 3 наведено СС для реалізації одного переобчислення під час розв'язання сформульованої на практичному занятті № 2 задачі цифрової фільтрації (ЗЦФ) для $m = 1$ за синхронною схемою. У даному разі головною розмірністю є n , а другорядною – m , де $(2m + 1)$ – розмір рухомого вікна.

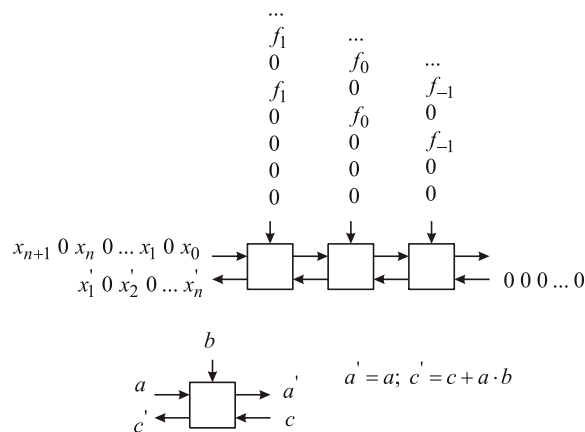


Рис. 3

Класифікація систолічних систем. Аналіз різних типів СС дозволяє їх класифікувати за декількома ознаками.

За **ступенем гнучкості** до застосування вони поділяються на:

- спеціалізовані;
- алгоритмічно орієнтовані;
- програмовані.

Спеціалізовані системи є орієнтованими для виконання певного алгоритму. Ця орієнтація відображається не лише в конкретній геометрії СС, статичності зв'язків між ПЕ і кількості ПЕ, але і у виборі типу операції, яку мають виконувати

всі ПЕ. Прикладами таких систем є системи, орієнтовані на рекурсивну та нерекурсивну фільтрацію, виконання швидкого перетворення Фур'є для заданої кількості точок тощо.

Алгоритмічно орієнтовані системи володіють можливістю програмування або конфігурації зв'язків, або самих ПЕ. Можливість програмування дозволяє виконувати на таких структурах деяку множину алгоритмів, які зводяться до однотипних операцій над векторами, матрицями і іншими числовими множинами.

У **програмованих** СС є можливість програмування як самих ПЕ, так і конфігурацій зв'язків між ними. При цьому ПЕ можуть мати локальну пам'ять для збереження програми і хоча вони мають одну і ту ж структуру, в один і той же момент часу дозволяється виконання різних операцій із деякого набору. Команди або керуючі слова, що зберігаються в пам'яті програм таких ПЕ, можуть змінювати і напрям передачі операндів.

За **розрядністю** ПЕ СС поділяються на:

- однорозрядні;
- багаторозрядні.

В **однорозрядних** структурах ПЕ в кожен момент часу виконують операцію над одним двійковим розрядом, а в **багаторозрядних** – над словами фіксованої довжини.

За **характером локально-просторових зв'язків** СС поділяють на:

- одновимірні;
- двовимірні;
- тривимірні.

На рис. 4 зображено двовимірну СС для розв'язання одновимірної ЗЦФ у разі, коли $m=1$, $k=6$, де k – це кількість виконуваних переобчислень за синхронною схемою.

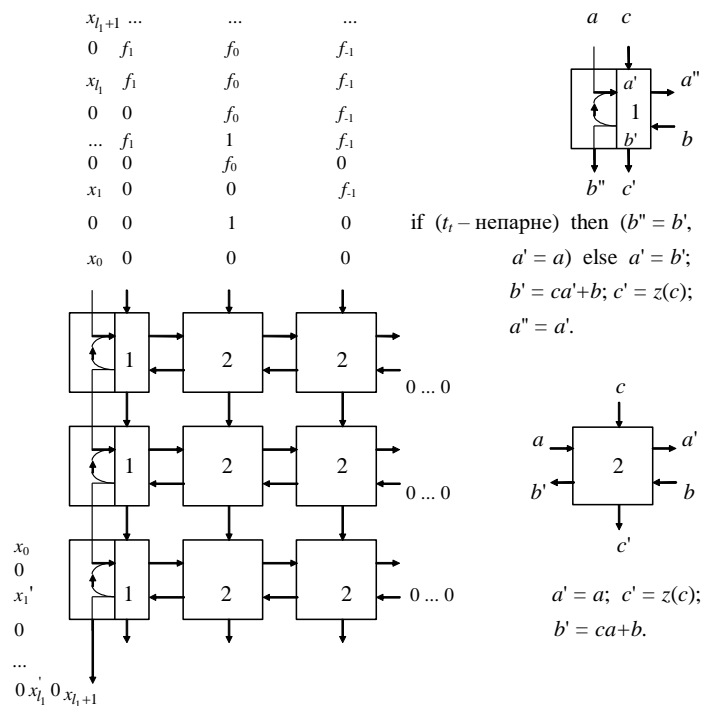


Рис. 4

Вибір структури залежить від вигляду оброблюваної інформації. Наприклад, одновимірні системи застосовують зазвичай для оброблення векторів, двовимірні – матриць, а тривимірні – об'єктів іншого типу.

Топологія систолічних систем. Зараз розроблено СС з різною геометрією зв'язків: лінійні, квадратні, гексагональні, трьохвимірні тощо. Перераховані перші три конфігурації таких систем наведені на рис. 5.

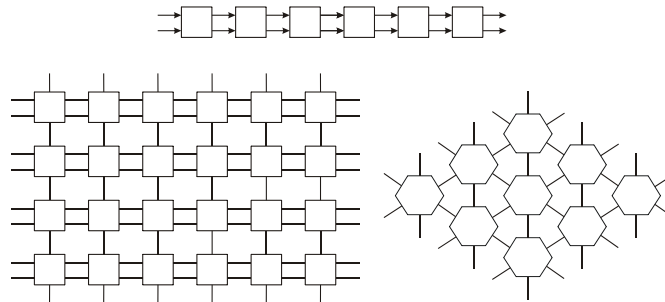
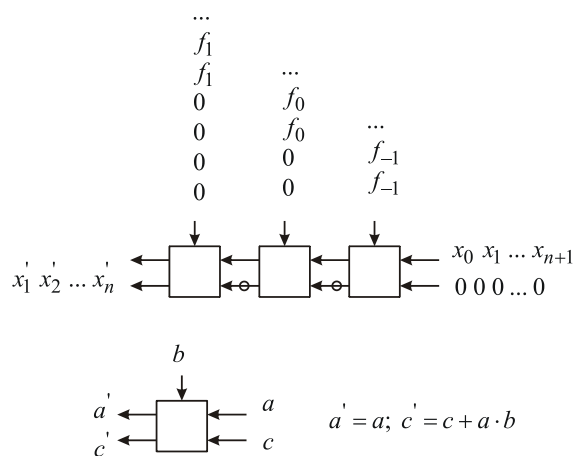


Рис. 5

Кожна конфігурація системи найбільш пристосована для виконання певних функцій: лінійна є оптимальною для реалізації фільтрів у реальному масштабі часу; гексагональна – для виконання операцій обернення матриць, а також дій над матрицями спеціального вигляду (множення трьохдіагональних матриць, наприклад); трьохвимірна – для знаходження розв'язків нелінійних диференціальних рівнянь з частинними похідними або для оброблення сигналів антенної решітки. Найбільш універсальними та поширеними є лінійні СС.

Для розв'язання складних задач може використовуватись СС, яка є набором окремих систем такого типу або складною мережею взаємозв'язаних систем.

СС зазвичай реалізуються на підставі використання НВІС. Обмеження, що при цьому виникають, призвели до того, що найбільш розповсюдженими стали структури з одним, двома та трьома трактами даних і з однаковим або протилежним напрямком передачі. На рис. 6 зображено СС, що реалізує виконання одного переобчислення в ЗЦФ за синхронною схемою, коли $m = 1$. Тут використовуються два тракти даних з однаковим напрямком передачі.



○ – означає, що потік затримується на один такт

Рис. 6

Структура процесорних елементів. Тип ПЕ вибирається у відповідності з призначенням СС і структурою просторових зв'язків. Найбільш поширеними є процесорні елементи, орієнтовані на множення з накопиченням. На рис. 7 показані ПЕ двох типів: гексагональний (а) і прямокутний (б).

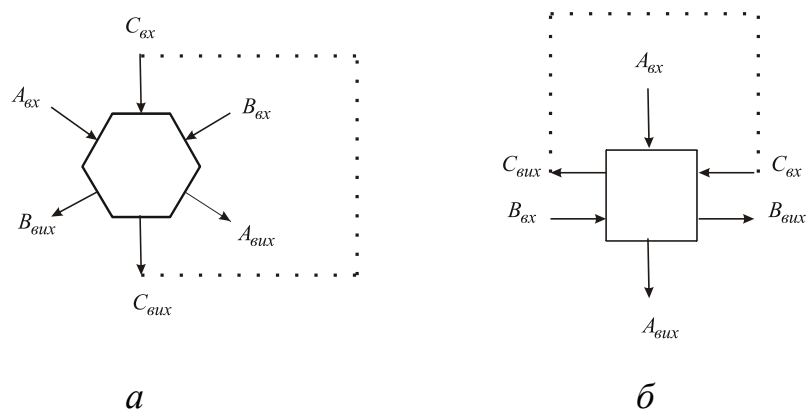


Рис. 7

В обох випадках на вхід ПЕ подаються операнди $A_{вх}$, $B_{вх}$, $C_{вх}$, а на вихід операнди $A_{вих}$, $B_{вих}$ і часткова сума $C_{вих}$. На n -му такті роботи СС ПЕ виконує операцію

$$C_{вих}^{(n)} = C_{вх}^{(n-1)} + A_{вх}^{(n-1)} \cdot B_{вх}^{(n-1)},$$

використовуючи операнди, одержані на $(n-1)$ -му такті, при цьому два операнди на вході та виході ПЕ є однаковими:

$$A_{вих}^{(n)} = A_{вх}^{(n-1)}, \quad B_{вих}^{(n)} = B_{вх}^{(n-1)}.$$

Часткова сума поступає на вхід ПЕ або з даного ж елементу системи (пунктирна лінія), або з сусіднього.

Обчислювальні системи з обробкою за принципом хвильового фронту. Цікавим різновидом СС є матричні процесори хвильового фронту (wavefront array processor), які інколи називають ще **хвильовими** або **фронтальними**.

Розробка СС ґрунтується на глобальній синхронізації масиву процесорів (ПЕ), яка передбачає наявність мережі розподілу синхронізуючих сигналів по всій системі. У системах з великою кількістю ПЕ спостерігається запізнювання тактових сигналів. Ця обставина особливо відчутна під час використання СС на базі НВІС, де зв'язки між ПЕ є дуже тонкими фізично і тому мають **підвищену ємність** ($C = q/\phi$, де q – заряд, а ϕ – потенціал, який залежить від розмірів провідника). Унаслідок цього виникають серйозні проблеми з синхронізацією. Для вирішення цих проблем необхідно використовувати **самосинхронізаційні схеми** керування ПЕ. Самосинхронізація полягає в тому, що моменти початку чергової операції кожен елемент системи визначає автоматично на підставі готовності відповідних операндів. Тому зникає необхідність глобальної синхронізації, зникають непродуктивні часові затрати і зростає загальна продуктивність усієї системи, хоча при цьому і ускладнюється апаратна реалізація кожного ПЕ.

Хвильові процесорні масиви поєднують систолічну обробку даних з асинхронним характером їх потоку. Механізмом координації міжпроцесорного обміну в таких системах є асинхронна процедура зв'язку з підтвердженням (handshake). Якщо який-небудь ПЕ закінчує свої обчислення і готовий передати дані сусіду, то він зможе це зробити лише тоді, коли сусід буде готовим до їх прийому. Для перевірки готовності сусіда передаючий процесор спочатку посилає йому запит, а дані висилає лише після одержання підтвердження про готовність їх прийняти. Такий механізм забезпечує дотримання заданої послідовності обчислень і робить проходження фронту обчислень через масив ПЕ плавним, до того ж проблема дотримання послідовності обчислень вирішується безпосередньо, а у СС для цього потрібна синхронізація.

2. Під квазісистолічними обчислювальними системами будемо розуміти системи, які, наприклад, не задовольняють одній властивості систолічності, а саме – дозволяють передачу даних між ПЕ від однієї «інстанції» одразу в декілька «точок прийому», дещо порушуючи при цьому локальність зв'язків (див. рис. 8).

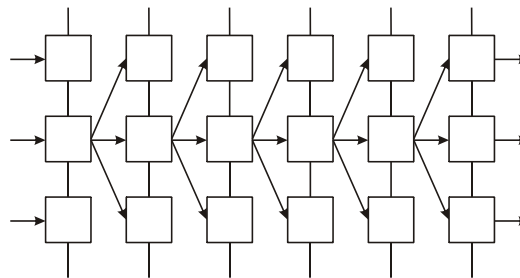


Рис. 8

Зараз технічно цю проблему досить легко можна усунути на підставі використання у системах комутації та зв'язку таких обчислювальних засобів оптоелектронних елементів. Квазісистолічні системи можуть використовуватись для реалізації паралельноконвеєрних алгоритмів розв'язання задач фільтрації різної вимірності.

Виникнення ідей щодо розробки таких обчислювальних систем тісно пов'язане із реалізацією оптимальних за швидкістю паралельноконвеєрних алгоритмів.