

УДК 681.3:004.272

А.А. ЯРОВИЙ

## БАГАТОРІВНЕВІ ПАРАЛЕЛЬНО-ІЄРАРХІЧНІ СИСТЕМИ ТА ЇХ КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

*Вінницький національний технічний університет  
21021, Хмельницьке шосе, 95, Вінниця, Україна  
тел.: +380 (432) 580019, E-mail: axa@vinnitsa.com*

**Анотація.** В проведених дослідженнях здійснено аналіз методів та засобів організації високопродуктивних паралельно-ієрархічних обчислювальних процесів на основі GPU-систем. Розроблено програмний комплекс, призначений для моделювання процесу кодування інформаційних масивів методом прямого ієрарх-ієрархічного перетворення.

**Аннотация.** В проведенных исследованиях осуществлен анализ методов и средств организации высокопроизводительных параллельно-иерархических вычислительных процессов на базе GPU-систем. Разработан программный комплекс, предназначенный для моделирования процесса кодирования информационных массивов методом прямого иерарх-иерархического преобразования.

**Abstract.** The analysis of methods and facilities of organization of high-performance parallel-hierarchical computational processes on the base of GPU-systems is carry out in researches. The software intended for modeling of coding process of information collections by the method of direct hierarch-hierarchical transformation is developed on the base of scientific researches.

**Ключові слова:** паралельні обчислення, паралельно-ієрархічне перетворення, моделювання, системи штучного інтелекту, обробка зображень.

### ВСТУП

Проблема підвищення швидкості обчислень надзвичайно актуальна для галузей, діяльність яких пов'язана з великим обсягом обчислювальних робіт (наукова та освітня діяльність, промислові процеси, IT-менеджмент, макроекономічне прогнозування, розробка стратегій регіонального розвитку, геоінформаційні системи, екологічний та економічний моніторинг, тощо). Але, у вітчизняних університетів та інших освітніх установ найчастіше немає засобів для закупівлі потужних комп'ютеризованих систем типу nCube, Cray або подібних. Однак з розвитком програмного забезпечення й появою нових технологій (паралельно-ієрархічних, GPGPU) стало можливим створити обчислювальний комплекс із ефективною швидкодією порівняно зі швидкодією суперкомп'ютерів, проте з вартістю в десятки разів меншою. Також, необхідно видзначити, що коло завдань, які потребують для свого розв'язання застосування потужних обчислювальних ресурсів, постійно розширюється. Це пов'язане з тим, що відбулися фундаментальні зміни в самій організації наукових досліджень. Внаслідок широкого впровадження обчислювальної техніки, значно підсилюється напрямок комп'ютерного моделювання й чисельного експерименту. Комп'ютерне моделювання, заповнюючи проміжок між фізичними експериментами й аналітичними підходами, дозволило вивчати явища, які є або занадто складними для дослідження аналітичними методами, або занадто дорогими чи небезпечними для експериментального вивчення. При цьому чисельний експеримент дозволив процеси наукового й технологічного пошуку зробити значно доступнішими з точки зору фінансових капіталовкладень. Стало можливим моделювати в реальному часі складні нелінійні процеси, в тому числі економічного й промислового розвитку регіонів, демографічної політики й прогнозування демографічної ситуації регіону, глобальні атмосферні процеси, процеси інтенсивних фізико-хімічних і ядерних реакцій, повноцінно розвивати геоінформаційні регіональні проекти і т.д. Очевидно, що розв'язання таких масштабних завдань потребує значних обчислювальних ресурсів [1-4].

Потужності сучасних кластерних обчислювальних комплексів цілком достатньо для розв'язання елементарних кроків більшості вищенаведених завдань, а об'єднання останніх досягнень паралельно-ієрархічних технологій та GPGPU у межах високопродуктивного обчислювального мережевого комплексу дозволяє швидко й ефективно вирішувати багато вищенаведених завдань, не використовуючи надзвичайно дорогих суперкомп'ютерів та GRID-систем. В даному контексті, для різних прикладних задач, які можна розглядати як галузі можливих ринків збуту, є актуальними наукові розробки спрямовані на побудову та

застосування високопродуктивних обчислювальних мережевих комплексів на основі сучасних багаторівневих паралельно-ієрархічних та GPGPU-технологій для підвищення ефективності діяльності та покращення окремих показників енергоефективності використовуваної апаратури [1,5,6].

Дані дослідження виконуються в межах НДР № GP/F44/051 "Методи та засоби організації високопродуктивних паралельно-ієрархічних обчислювальних процесів в інтелектуальних системах", що здійснюється за рахунок бюджетних коштів МОНМС України, наданих як грант Президента України для підтримки наукових досліджень молодих учених.

### МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є розвиток теоретичних основ паралельно-ієрархічного перетворення інформаційних середовищ шляхом розроблення математичних та структурно-функціональних моделей високопродуктивних багаторівневих паралельно-ієрархічних систем на основі GPGPU-технологій, а також удосконалення методів кодування інформації на основі прямого ієрарх-ієрархічного перетворення.

### ОСОБЛИВОСТІ ОРГАНІЗАЦІЇ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОГО ПРОЦЕСУ В БАГАТОРІВНЕВИХ ПАРАЛЕЛЬНО-ІЄРАРХІЧНИХ СИСТЕМАХ ПІРАМІДАЛЬНОГО ТИПУ

Принцип функціонування багаторівневих паралельно-ієрархічних систем, можна визначити як послідовність операцій над множинами масивів даних, що утворюють множини інформаційного поля (ІП) різноманітних рівнів ієрархії. Взаємодія між вказаними рівнями ієрархії здійснюється в межах пірамідальної ієрархічної структури і реалізується на основі мережевої архітектури паралельно-ієрархічної системи (ПІС). Необхідно відзначити, що вказані мережеві перетворення є нелінійними перетвореннями, ядра яких можна представити у виді мережевої моделі [2,3].

Принципова відмінність пірамідального паралельно-ієрархічного перетворення (ПІП) від розкладання в такі відомі ряди, наприклад, як ряд Тейлора або ряд Фур'є полягає в тому, що в першому випадку розкладання являє собою степеневий ряд із коефіцієнтами, що обчислюються лише за локальними характеристиками (похідними) сигналу, тоді як для другого випадку – члени ряду Фур'є являють собою узагальнені характеристики сигналу, але іншої фізичної природи (наприклад, амплітуди спектральних частот) ніж сам сигнал [2,3,7-9].

Принцип побудови пірамідальної ієрархічної структури даних полягає в такому [2,3,10]: з початкового ІП формують послідовності масивів даних того самого ІП, але на різноманітних ієрархічних рівнях розподілу:  $P=(A_0, A_1, A_2, \dots, A_n)$ , де  $A_i$  – інформаційне поле,  $i$  – номер ієрархічного рівня розподілу,  $i = 0, n$ . Така піраміда ІП, в свою чергу, формує обчислювальну структуру – багаторівневу ПІС. Така структура дозволяє керувати ієрархічними рівнями розподілу оброблюваних даних, а також розмірами області їх аналізу (що є актуальним при аналізі зображень). Розміри аналізованого "вікна" даних можуть бути постійними, але, переміщуючись з одного ієрархічного рівня розподілу на інший, можна здійснювати оброблення того самого елемента ІП з різноманітним ступенем деталізації. При цьому, рішення про необхідність подальшого оброблення можна прийняти на верхньому рівні обробки після аналізу ІП з малим розподілом, кожний елемент якого містить інтегральні оцінки про відповідні фрагменти вихідного ІП на найнижчому рівні. Це приводить до підвищення швидкості обробки ІП. Таким чином, сутність пірамідального підходу полягає в одночасному використанні послідовності масивів даних на різноманітних рівнях ієрархії при аналізі зображення, що дозволяє реалізувати стратегію від "загального до часткового" (подібно до концепції нейроподібної обробки). Кожний елемент піраміди ІП характеризується трьома координатами  $(i,j,k)$ , де  $i$  – рядок,  $j$  – стовпчик,  $k$  – рівень. ПІС пірамідального типу дозволяють подати в кодованому, а також ущільненому вигляді (в якості елементарних) такі числа ІП, що одночасно мають як кількісну, так якісну просторово-часові оцінки – це блоки різноманітних ієрархічних рівнів. Розвиваючи вищеописаний підхід видається можливим в перспективі реалізувати методи інтелектуального сенсорного сприйняття [2-4].

Для виявлення часових закономірностей організації обчислювального процесу в багаторівневих ПІС пірамідального типу розглянемо модель формування багаторівневої мережевої структури. Нехай є  $n$  вхідних каналів, причому всі канали починають роботу одночасно в момент часу  $t_0$ . Отже, у момент часу  $t_0$  на входи надходять  $n$  чисел, що утворюють множину  $M_0 = \{a_{i_0}\}$ ,  $i_0 = \overline{1, n_0}$ ,  $a_{i_0} \in R$ . У момент часу  $t_1$  з множини  $M_0$  за завчасно визначеним критерієм [2,3,10] обирається елемент (конкретне застосування вибору критерію загальної частини залежить від типу розв'язуваної задачі).

Позначимо обраний елемент через операцію диз'юнкції

$$\bigcup_{i_0=1}^{n_0} (a_{i_0})^{t_1};$$

де  $r^{t_1}$  - кратність цього елемента.

У момент часу  $t_2$  утвориться нова множина  $M_2 = \{a_{i_2}\}$   $i_2 = \overline{1, n_2}$ . Елементами цієї множини є (відмінні від нуля) різниці

$$a_{i_0} - \bigcup_{i_0=1}^{n_0} (a_{i_0})^{t_1} = \Delta(a_{i_0})^{t_1}.$$

Кількість елементів множини  $M_2$  дорівнює  $n_2 = n_0 - r^{t_1}$ .

У момент часу  $t_3$  за описаним вище встановленим критерієм з множини  $M_2$  знову вибирається елемент. Позначимо його

$$\bigcup_{i_2=1}^{n_2} (a_{i_2})^{t_3} = \bigcup_{i_0=1}^{n_0} (\Delta(a_{i_0})^{t_1})^{t_3};$$

де  $r^{t_3}$  - кратність цього елемента.

У момент часу  $t_4$  утвориться нова множина  $M_4 = \{a_{i_4}\}$   $i_4 = \overline{1, n_4}$ . Її елементами є відмінні від нуля різниці

$$a_{i_2} - \bigcup_{i_2=1}^{n_2} (a_{i_2})^{t_3} = \Delta(a_{i_0})^{t_1} - \bigcup_{i_0=1}^{n_0} (\Delta(a_{i_0})^{t_1})^{t_3} = \Delta^2(a_{i_0})^{t_1 t_3}.$$

Кількість елементів множини  $M_4$  дорівнює  $n_4 = n_0 - (r^{t_1} + r^{t_3})$ . При утворенні кожної з нових множин у результаті перетворення обертається в нуль підмножина елементів, рівних обраний в попередній момент часу.

Припустимо, що в момент часу  $t = t_{2j}$  була утворена множина  $M_{2j}$  з елементами

$$\Delta^j(a_{i_0})^{t_1 t_3 \dots t_{2j-1}} = \Delta^{j-1}(a_{i_0})^{t_1 t_3 \dots t_{2j-3}} - \bigcup_{i_0=1}^{n_0} (\Delta^{j-1}(a_{i_0})^{t_1 t_3 \dots t_{2j-3}})^{t_{2j-1}}, \quad (1)$$

причому  $(a_{i_0})^{t_1} \equiv a_{i_0}$ ;  $\Delta^0(a_{i_0}) \equiv a_{i_0}$ .

При  $j=1$  та  $j=2$  остання рівність описує перетворення, що відповідають моментам часу  $t = t_2$  та  $t = t_4$ .

У момент часу  $t = t_{2j+1}$  з множини  $M_{2j}$  обирається елемент

$$\bigcup_{i_0=1}^{n_0} (\Delta^j(a_{i_0})^{t_1 \dots t_{2j-1}})^{t_{2j+1}}; \quad (2)$$

де  $r^{t_{2j+1}}$  - кратність цього елемента.

У момент часу  $t = t_{2j+2}$  утвориться нова множина  $M_{2j+2} = \{a_{i_{2j+2}}\}$   $i_{2j+2} = \overline{1, n_{2j+2}}$ . Її елементами є відмінні від нуля різниці

$$\Delta^j(a_{i_0})^{t_1 \dots t_{2j-1}} - \bigcup_{i_0=1}^{n_0} (\Delta^j(a_{i_0})^{t_1 \dots t_{2j-1}})^{t_{2j+1}} = \Delta^{j+1}(a_{i_0})^{t_1 \dots t_{2j+1}}$$

або

$$\Delta^{(j+1)-1}(a_{i_0})_{1 \dots t_{2(j+1)-3}} - \bigcup_{i_0=1}^{n_0} (\Delta^{(j+1)-1}(a_{i_0})_{1 \dots t_{2(j+1)-3}})^{2^{(j+1)-1}} = \Delta^{j+1}(a_{i_0})_{1 \dots t_{2(j+1)-1}}. \quad (3)$$

Далі в момент часу  $t = t_{2j+3}$  з множини  $M_{2j+2}$  за встановленим критерієм обирається елемент

$$\bigcup_{i_{2j+2}=1}^{n_{2j+2}} (a_{i_{2j+2}})_{t_{2j+3}} = \bigcup_{i_0=1}^{n_0} (\Delta^{j+1}(a_{i_0})_{1 \dots t_{2j+1}})^{2^{j+3}}, \text{ його кратність дорівнює } r^{t_{2j+3}}.$$

Також обраний елемент можна записати у виді

$$\bigcup_{i_0=1}^{n_0} (\Delta^{j+1}(a_{i_0})_{1 \dots t_{2(j+1)-1}})^{2^{(j+1)+1}}. \quad (4)$$

Якщо множина  $M_0$  складається з  $m$  різноманітних підмножин, утворених однаковими елементами, то остання дія має номер  $m$ . Тобто в момент часу  $t = t_m$  утвориться множина  $M_{2m} = \emptyset$ . Тим самим процес оброблення інформації завершено. Вихідній множині  $M_0$  розмірності  $n_0$  ставиться у

відповідність множина елементів  $\left\{ r^{t_{2j-1}} \bigcup_{i_0=1}^{n_0} (\Delta^{j-1}(a_{i_0})_{1 \dots t_{2j-3}})^{2^{j-1}} \right\}$  розмірності  $m$ ,  $j = \overline{1, m}$ , де  $m \geq n_0$ .

Отже, із (3) і (4) випливає, що запропоновані вирази (1) і (2) є правильними як для  $j$ -ої дії, так і для  $(j+1)$ -ої дії. Тим самим за методом математичної індукції доведено, що вирази (1) і (2) описують довільну  $j$ -ту дію пірамідального процесу перетворення ПІ.

### РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ КОДУВАННЯ ІНФОРМАЦІЇ МЕТОДОМ ПРЯМОГО ІСРАРХ-ІСРАРХІЧНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ТА ЇЇ КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Розглянемо матрицю чисел розмірністю  $n \times n$ :

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & \dots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & \dots & a_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & a_{n4} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

при чому значення  $n$  має бути кратним 2. В якості довільних чисел візьмемо відсортований масив чисел (6):

$$\begin{bmatrix} a_{11} < a_{12} < a_{13} < a_{14} < \dots < a_{1n} \\ a_{21} < a_{22} < a_{23} < a_{24} < \dots < a_{2n} \\ a_{31} < a_{32} < a_{33} < a_{34} < \dots < a_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} < a_{n2} < a_{n3} < a_{n4} < \dots < a_{nn} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Розбиваємо вхідну матрицю на окремі фрагменти (далі, «вікна») розмірністю  $2 \times 2$ . Таким чином, вихідних «вікон» для оброблення буде  $\left(\frac{n}{2}\right)^2$ .

Позначимо деяке отримане «вікно» через  $A_n$  та введемо додаткову змінну для полегшення запису результату:  $n/2 = m$ . У випадку, коли  $m$  – непарне:

$$A' = \begin{bmatrix} A_1 & A_{\left(\frac{n}{2}+1\right)} & A_n & \dots & A_{\left(\frac{n-2}{4}-\frac{1}{2}\right)n} & A_{\left(\frac{n-2}{4}\right)n+1} \\ A_2 & A_{\left(\frac{n}{2}+2\right)} & A_{(n+1)} & \dots & A_{\left(\frac{n-2}{4}-\frac{1}{2}\right)n+1} & A_{\left(\frac{n-2}{4}\right)n+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ A_{\frac{n}{2}} & A_n & A_{\left(\frac{n}{2}+n\right)} & \dots & A_{\left(\frac{n-2}{4}\right)n} & A_{\left(\frac{n}{2}\right)^2} \end{bmatrix}$$

У випадку, коли  $m$  – парне:

$$A' = \begin{bmatrix} A_1 & A_{(\frac{n}{2}+1)} & A_n & \dots & A_{(\frac{n-2}{4}-\frac{1}{2})n} \\ A_2 & A_{(\frac{n}{2}+2)} & A_{(n+1)} & \dots & A_{((\frac{n-2}{4}-\frac{1}{2})n+1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ A_{\frac{n}{2}} & A_n & A_{(\frac{n}{2}+n)} & \dots & A_{(\frac{n-2}{4})n} \end{bmatrix}$$

Тепер будемо розглядати окремо кожне з отриманих «вікон». Розглянемо  $A_1$ :

$$A_1 = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}$$

Виконаємо пряме безмаскове паралельно-ієрархічне перетворення:

### 1. Ітерація

– G-перетворення

$$\begin{vmatrix} a_{11} & (a_{12} - a_{11}) \\ a_{21} & (a_{22} - a_{21}) \end{vmatrix}$$

– Транспонування

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{21} \\ (a_{12} - a_{11}) & (a_{22} - a_{21}) \end{vmatrix}$$

### 2. Ітерація

– G-перетворення

$$\begin{vmatrix} a_{11} & (a_{21} - a_{11}) \\ (a_{12} - a_{11}) & ((a_{22} - a_{21}) - (a_{12} - a_{11})) \end{vmatrix}$$

– Зсув

$$\begin{vmatrix} a_{11} & (a_{21} - a_{11}) \\ (a_{12} - a_{11}) & ((a_{22} - a_{21}) - (a_{12} - a_{11})) \end{vmatrix}$$

Перший хвостовий елемент:  $a_{11} = k_{11}$

– Транспонування

$$\begin{vmatrix} (a_{21} - a_{11}) & (a_{12} - a_{11}) \\ ((a_{22} - a_{21}) - (a_{12} - a_{11})) & \end{vmatrix}$$

### 3. Ітерація

– G-перетворення

$$\begin{vmatrix} (a_{12} - a_{11}) & ((a_{21} - a_{11}) - (a_{12} - a_{11})) \\ ((a_{22} - a_{21}) - (a_{12} - a_{11})) & \end{vmatrix}$$

– Зсув

$$\begin{vmatrix} (a_{12} - a_{11}) & ((a_{21} - a_{11}) - (a_{12} - a_{11})) \\ & ((a_{22} - a_{21}) - (a_{12} - a_{11})) \end{vmatrix}$$

Другий хвостовий елемент:  $(a_{12} - a_{11}) = k_{21}$

– Транспонування

$$\begin{vmatrix} ((a_{21} - a_{11}) - (a_{12} - a_{11})) & ((a_{22} - a_{21}) - (a_{12} - a_{11})) \end{vmatrix}$$

### 4. Ітерація

– G-перетворення

$$\begin{vmatrix} ((a_{21} - a_{11}) - (a_{12} - a_{11})) & (((a_{22} - a_{21}) - (a_{12} - a_{11})) - ((a_{21} - a_{11}) - (a_{12} - a_{11}))) \end{vmatrix}$$

Третій хвостовий елемент:  $((a_{21} - a_{11}) - (a_{12} - a_{11})) = k_{31}$ .

Відповідно, четвертий хвостовий елемент:

$$(((a_{22} - a_{21}) - (a_{12} - a_{11})) - ((a_{21} - a_{11}) - (a_{12} - a_{11}))) = k_{41}$$

Відповідно, для матриці  $A_n$ :

$$A_n = \begin{bmatrix} a_{(n-1)(n-1)} & a_{(n-1)n} \\ a_{n(n-1)} & a_{nn} \end{bmatrix}$$

отримаємо наступні хвостові елементи:

$$a_{(n-1)(n-1)} = k_{(n-3)n}$$

$$(a_{(n-1)n} - a_{(n-1)(n-1)}) = k_{(n-2)n}$$

$$(((a_{n(n-1)} - a_{(n-1)(n-1)}) - (a_{(n-1)n} - a_{(n-1)(n-1)}))) = k_{(n-1)n}$$

$$\left( \left( (a_{nn} - a_{n(n-1)}) - (a_{(n-1)n} - a_{(n-1)(n-1)}) \right) - \left( (a_{n(n-1)} - a_{(n-1)(n-1)}) - (a_{(n-1)n} - a_{(n-1)(n-1)}) \right) \right) = k_{nn}$$

Таким чином, виконавши пряме безмаскове ППП знаходимо усі хвостові елементи. Після їх знаходження сформуємо нову матрицю і заповнимо її отриманими хвостовими елементами наступним чином (по стовпчиках):

$$B = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & \dots & k_{nn} \end{bmatrix}$$

Всього в матриці  $B$  буде  $n$  стовпчиків та  $n$  рядків.

Далі виконуємо перетворення над отриманою матрицею  $B$  – розбиваємо її на «вікна», але ділимо їх лише по ширині, тобто висота нових сформованих «вікон» буде дорівнювати висоті матриці  $B$ . Кількість обробляємих «вікон» буде рівною  $n/2=m$ .

Позначимо отримані «вікна» через  $B_m$

$$B = [B_1 \quad B_2 \quad \dots \quad B_m]$$

Далі обробляємо кожне «вікно» – виконуємо пряме безмаскове ППП над кожним із них і отримуємо набір хвостових елементів  $c_m$ :

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1m} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2m} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ c_{h1} & c_{h2} & \dots & c_{hm} \end{bmatrix},$$

де  $h$  – кількість елементів в матриці  $B_m$ .

Над отриманою матрицею  $C$  виконуємо пряме безмаскове ППП і отримаємо одновимірних масив хвостових елементів – результат перетворень:

$$F = \{f_1 \quad f_2 \quad \dots \quad f_m\}.$$

Для кращого розуміння структурно-функціональної організації обчислювального процесу в багаторівневих паралельно-ієрархічних системах на рис. 1 наведено його графічне представлення.

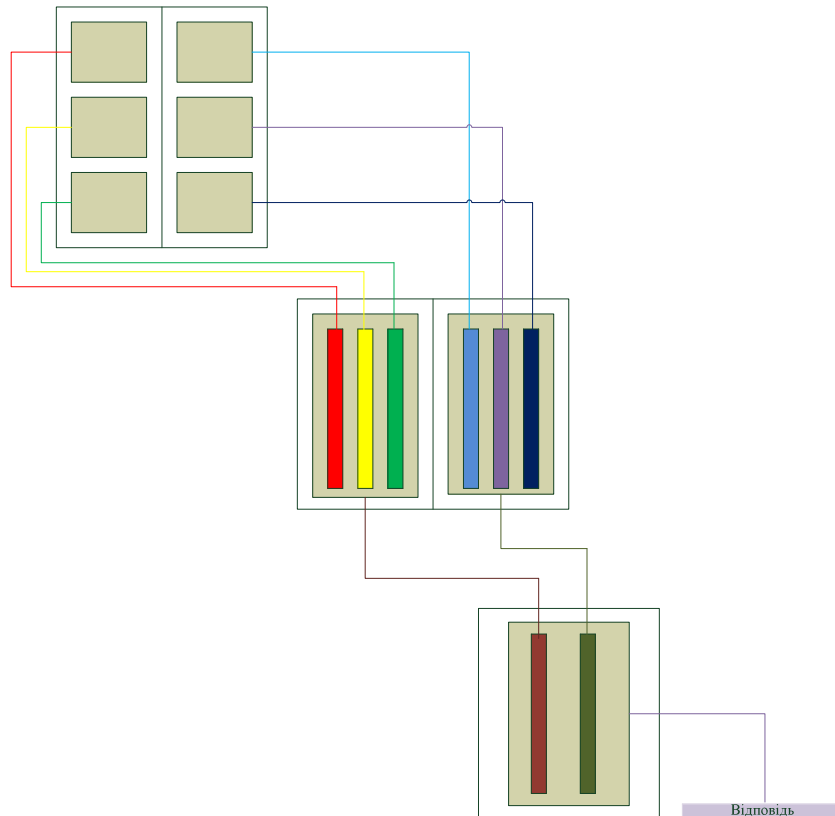


Рис. 1. Структурна схема організації обчислювального процесу в багаторівневих паралельно-ієрархічних системах

Розглянемо узагальнений алгоритм кодування інформації методом прямого ієрарх-ієрархічного перетворення в межах високопродуктивної GPGPU-системи:

1. Завантажується числовий масив даних – матриця першого рівня.
2. Перевіряємо вхідний масив на кратність розмірності «вікна».
3. Розбиваємо вхідний числовий масив на «вікна» відповідної розмірності (стовпці/рядки, яких не вистачає, заповнюємо нулями, що вказує на "пустий елемент").
4. Виділяється необхідна пам'ять графічного адаптера, яка буде використовуватись при перетворенні зображення.
5. Кожному «вікну» присвоюється порядковий номер за принципом «згори донизу, зліва направо».
6. Обираємо перше «вікно».
7. Виконується пряме безмаскове ПІ перетворення [11,12].
8. В результаті після виконання п.6 отримаємо набір хвостових елементів.
9. Отриманий у п.8 набір хвостових елементів записується в стовпець нової матриці.
10. Повертаємося до пп.6-9
11. Якщо обробили всі «вікна» із першого стовпця вікон вхідної матриці, то нова матриця із отриманих хвостових елементів повністю сформована.
12. Виконуємо пп.6-9 для наступного стовпчика із сформованих «вікон». Отримуємо матрицю другого рівня.
13. Матриця другого рівня розбивається на «вікна» за кількістю обробляємих стовпців у матриці першого рівня.
14. Виконуємо із кожним вікном пряме безмаскове ПІ перетворення згідно пп. 6-9. Отримаємо матрицю третього рівня.
15. Над матрицею третього рівня виконуємо п.7.
16. Отриманий результат записується в пам'ять процесора, звільняється пам'ять графічного адаптера.

Розроблений програмний комплекс кодування інформації методом прямого ієрарх-ієрархічного перетворення призначений для реалізації обчислювального процесу в багаторівневих паралельно-ієрархічних системах пірамідального типу на основі GPGPU-технологій.

Вказаний програмний комплекс реалізовано на мові програмування "C++" з використанням бібліотеки CUDA для програмування на платформі GPGPU, що застосовується для досягнення максимальної паралельності при виконанні ієрарх-ієрархічного перетворення. Програмний комплекс реалізує процедури: завантаження вхідних даних у вигляді масиву чисел; виконання ієрарх-ієрархічного перетворення на основі паралельних GPGPU-систем; збереження результату.

Для роботи із програмним комплексом потрібно:

1. Створити масив даних, у який записати інформацію для подальшого перетворення.
2. Викликати метод `void aPIw(int* in, int n, int *out, int &t)`, в який необхідно передати покажчик на масив з інформацією для перетворення; числове значення розмірності вхідного масиву даних; покажчик на масив чисел, який після перетворення буде вказувати на масив хвостових елементів; а також змінну, в яку буде записано час виконання прямого ієрарх-ієрархічного перетворення.

Також, необхідно відзначити, що функції основної програмної бібліотеки, після перекомпіляції, коректно працюють з різними операційними системами: MS Windows, GNU/Linux, Mac OS. Для роботи програмного комплексу необхідна наявність встановленої на комп'ютері операційної системи MS Windows або GNU/Linux, або Mac OS; наявність скомпільованої під відповідну платформу програмної бібліотеки; тактова частота процесора не менше 1 GHz; наявність оперативної пам'яті обсягом від 200 Мб, графічний адаптер NVidia, який підтримує технологію CUDA.

Запропонований програмний комплекс прямого ієрарх-ієрархічного перетворення інформаційних середовищ в багаторівневих ПІС було протестовано на різноманітних наборах даних (у вигляді двовимірної матриці даних різноманітної розмірності, а також зображень різноманітної розмірності). Результати роботи комплексу співпали з результатами математичного та комп'ютерного моделювання на основі CPU (на основі GPGPU-реалізації зафіксовано приріст продуктивності обчислень за рахунок ефективнішої розпаралелізації), що свідчить про коректність та достовірність роботи програмного продукту.

## ВИСНОВКИ

Досліджуваний в роботі спосіб паралельного перетворення надвеликих масивів інформації розглянуто за допомогою високопродуктивного мережного алгоритму прямого ієрарх-ієрархічного

перетворення, основними властивостями якого є паралелізм і ієрархія, синхронність і детермінованість [2,3,13,14]. В роботі здійснено аналіз особливостей організації обчислювального процесу в багаторівневих паралельно-ієрархічних системах пірамідального типу, запропоновано математичну модель кодування інформації методом прямого ієрарх-ієрархічного перетворення, а також проведено експериментальні дослідження на основі розробленого високопродуктивного обчислювального мережевого комплексу. Для доведення адекватності та достовірності отриманих результатів здійснено математичне та комп'ютерне моделювання на великій кількості різноманітних типів наборів даних. Отримані результати математичного та комп'ютерного моделювання співпали. Розроблено програмне середовище для моделювання процесу кодування інформаційних масивів методом прямого ієрарх-ієрархічного перетворення, яке можна використовувати для дослідження існуючих та виявлення нових обчислювальних властивостей ПП перетворення інформаційних масивів та подальшої оптимізації процесу їх кодування. Також варто відзначити, що запропонована система з ієрарх-ієрархічним принципом обробки інформації, що є складовою високопродуктивного обчислювального мережевого комплексу, окрім кращих показників економічної ефективності та показників енергоефективності, також одночасно є зручнішою в сервісному обслуговуванні [5,15,16].

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Аналіз технологій мультичіпової обробки даних на GPU для організації масивно-паралельних обчислень. / Яровий А.А., Мудрик В.В. : тези доповідей Третьої Міжнародної науково-технічної конференції [Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія (ІТКІ-2012)], (Вінниця, 29-31 травня 2012 р.) – Вінниця, ВНТУ, 2012 – с. 50-51.
2. Паралельно-ієрархічне перетворення як системна модель оптико-електронних засобів штучного інтелекту : [Монографія.] / В.П. Кожем'яко, Ю.Ф. Кутаєв, С.В. Свечніков, Л.І. Тимченко, А.А. Яровий – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2003. – 324 с.
3. Кожем'яко В.П. Паралельно-ієрархічні мережі як структурно-функціональний базис для побудови спеціалізованих моделей образного комп'ютера : [Монографія] / В.П. Кожем'яко, Л.І. Тимченко, А.А. Яровий. – Вінниця: Універсум-Вінниця, 2005. – 161 с.
4. Образний відео-комп'ютер око-процесорного типу : [Монографія] / Кожем'яко В.П., Лисенко Г.Л., Яровий А.А., Кожем'яко А.В. – Вінниця: Універсум-Вінниця, 2008. – 215 с.
5. Високопродуктивні гетерогенні обчислювальні комплекси паралельно-ієрархічного оброблення зображень / Тимченко Л.І., Яровий А.А., Мудрик В.В., Кокряцька Н.І. : Proceedings of 2 International Conference [High Performance Computing (HPC-UA'2012)], (Київ, 8-10 жовтня 2012 р.) – Київ, ТОВ "Три К", 2012. – С. 322-327.
6. Перспективи впровадження технологій GPGPU в структуру автоматизованої системи підтримки експлуатації транспортної мережі зв'язку / Яровий А.А., Мудрик В.В. : Збірник тез доповідей Шостої Міжнародної науково-технічної конференції [Фотоніка ОДС-2012)], (Вінниця, 1-4 жовтня 2012 р.) – Вінниця, "ТД Едельвейс і К", 2012. – с. 37-38.
7. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. В 2-х книгах. / У. Прэтт – М.: Мир, 1982. - Т.1.-310 с., Т.2.-790 с.
8. Engelberg S. Digital Signal Processing. An Experimental Approach. 1st Edition / S. Engelberg – Springer, 2008, XVI – 212 p.
9. Применение цифровой обработки сигналов. / Под ред. Э. Оппенгейма. - М.: Мир, 1980. - 545с.
10. А. А. Yarovy Parallel-Hierarchical Computing System for Multi-Level Transformation of Masked Digital Signals / А. А. Yarovy, L. I. Timchenko, N. I. Kokriatskaia // Advances in Electrical and Computer Engineering. – 2012. – vol. 12, no. 3. – pp. 13-20.
11. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 45425. Комп'ютерна програма "Комп'ютерна програма для моделювання процесу кодування інформаційних масивів методом прямого паралельно-ієрархічного перетворення без масок" / Яровий А.А., Трошина А.В., Мурзак І.Д. Дата реєстрації Державною службою інтелектуальної власності України 03.09.2012.
12. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 45426. Комп'ютерна програма "Комп'ютерна програма кодування / декодування інформації модифікованими для GPGPU методами прямого та зворотного паралельно-ієрархічного перетворення з оптимізацією масок" / Яровий А.А., Сугак І.М., Трошина А.В. Дата реєстрації Державною службою інтелектуальної власності України 03.09.2012.
13. Вступ в алгоритмічну теорію ієрархії і паралелізму нейроподібних обчислювальних середовищ та її застосування до перетворення зображень. Основи теорії пірамідально сільового перетворення зображень. / Кожем'яко В.П., Тимченко Л.І., Кутаєв Ю.Ф., Івасюк І.Д. – К: УМК ВО, 1994. – 272 с.
14. A new approach to detection of noise-distorted signals based on the method of S-preparation / S.



Nakonechna, M. Petrovskiy, L. Timchenko, Yu. Kutaev, N. Kokryatskaya, A. Yarovyy : Book of Abstracts [IX International symposium on Telecommunications (ВИНТЕЛ 2012)], (Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, October 25-27, 2012) – Sarajevo, IEEE, 2012 – p.73.

15. Особливості організації паралельних потоків при виконанні паралельно-ієрархічного перетворення на основі GPGPU. / Яровий А.А., Сугак І.М. – [Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія : тези доповідей Третьої Міжнародної науково-технічної конференції (ІТКІ-2012)], (Вінниця, 29-31 травня 2012 р.) – Вінниця, ВНТУ, 2012. – с. 52-53.
16. Структурно-функціональна організація багаторівневих паралельно-ієрархічних систем та аналіз їх обчислювальних властивостей / Яровий А.А., Трошина А.В. : Збірник праць Восьмої Міжнародної науково-практичної конференції [Інтернет-Освіта-Наука (ІОН-2012)], (Вінниця, 1-5 жовтня 2012 р.) – Вінниця, ВНТУ, 2012. – с. 109.

Надійшла до редакції 30.11.2012 р.

**ЯРОВИЙ А.А.** – к.т.н., доцент, докторант кафедри комп'ютерних наук, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.