

## ПАРАЛЕЛЬНО-ІЄРАРХІЧНЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СЕРЕДОВИЩ НА ОСНОВІ ГЕТЕРОГЕННОЇ КЛАСТЕРНОЇ СИСТЕМИ

*На основі проведених досліджень здійснено аналіз методологічних і прикладних аспектів реалізації паралельно-ієрархічного перетворення інформаційних середовищ на основі гетерогенної кластерної системи. Наведено попередні результати розробки кластерного обчислювального комплексу для виконання паралельно-ієрархічного перетворення інформаційних середовищ, зокрема зображень, а також перспективи подальшої розробки моделей інтелектуальних паралельно-ієрархічних та ієрархічних нейроподібних систем.*

### Вступ

Зростаючі обсяги даних та обчислень, необхідних для обробки великих масивів інформації, наприклад, потоків відеоданих, зображень, потребує щораз більшої продуктивності використовуваних для цього систем. Оскільки щільність «упакування» елементів в інтегральних схемах визначається фізичними обмеженнями, швидкодія в результаті обмежується кінцевою швидкістю поширення електромагнітних коливань від одного елемента до іншого. Перебороти цей фізичний бар'єр можна лише розпаралелюванням обчислювальних процесів у системі, що, в свою чергу, призводить до ускладнення її архітектури. Інтелектуальна обробка інформації потребує розгляду кожного елемента в деякому контексті його зв'язків, а це можливо тільки в обчислювальній системі, що має топографічну структуру з тривимірним розташуванням процесорних елементів. Саме така структура системи добре узгоджується з природним нейроподібним сприйняттям сенсорної інформації [1, 2].

В роботі розглядаються прикладні аспекти реалізації паралельно-ієрархічного перетворення інформаційних середовищ на основі гетерогенної кластерної системи, принципи функціонування яких містять високий ступінь паралелізму обробки інформації на основі просторово-часової взаємодії конвергентних та дивергентних структур [3, 4]. Галузі застосування мережного методу паралельно-ієрархічного перетворення різноманітні, зокрема це мережні структури: паралельної пам'яті, цифрових систем прийому-передачі інформації, цифрових пристроїв ущільнення інформації, систем порівняння багаторадаційних зображень, у тому числі кореляційного порівняння, цифрових пристроїв попередньої обробки зображень, сегментації, кодування, формування ознак для розпізнавання, обробки біомедичної інформації, тощо [5, 6].

Принцип побудови пірамідальної ієрархічної структури даних можна визначити як послідовність масивів даних інформаційного поля на різноманітних рівнях дозволу:  $P = (A_0, A_1, A_2, \dots, A_L)$ , де  $A_i$  — інформаційне поле;  $i$  — номер рівня дозволу;  $i = \overline{0, l}$  [4, 5]. Така піраміда інформаційних полів формує обчислювальну структуру, що дозволяє реалізувати методи інтелектуального сенсорного сприйняття. Зокрема, подібна структура дозволяє керувати рівнем дозволу оброблюваних даних, а також розмірами області аналізу. Розміри аналізованого «вікна» даних можуть бути постійними, але переміщуючись з одного рівня розміщення на інший можна здійснювати обробку того самого елемента інформаційного поля з різноманітним ступенем деталізації. При цьому рішення про необхідність подальшої обробки можна прийняти на верхньому рівні обробки після аналізу інформаційного поля з малим дозволом, кожний елемент якого містить інтегральні оцінки про відповідні фрагменти вихідного поля на найнижчому рівні, що приводить до підвищення їх швидкості обробки. Сутність пірамідального підходу полягає в одночасному використанні під час аналізу послідовності масивів даних на різноманітних рівнях ієрархії. Це дозволяє реалізувати стратегію від «загального до часткового», що дає можливість реалізувати концепцію нейроподібної обробки. Кожний елемент піраміди інформаційного поля характеризується трьома координатами  $(i, j, k)$ , де  $i$  — рядок;  $j$  — стовпчик;  $k$  — рівень [4—6].

Принцип побудови паралельно-ієрархічної структури даних можна визначити як послідовність операцій над множинами масивів даних, що утворюють множини інформаційних полів різноманітних рівнів ієрархії, взаємодія між якими здійснюється пірамідалною ієрархічною структурою і реалізується на основі мережної архітектури [4—7].

Актуальність цих досліджень найбільше характерна для задач організації високопродуктивних обчислень надвеликих масивів інформації, у яких необхідно здійснювати багатоетапне сприйняття і обробку, ущільнення і розпізнавання інформації в інформаційних структурах та обчислювальних пристроях. Все вищесказане окреслює різноманітні галузі застосування паралельно-ієрархічного перетворення, на основі якого розробляються обчислювальні структури інтерактивної обробки відеоданих, динамічно змінюваних зображень, з виконанням їх попередньої обробки, кореляційного аналізу, розпізнавання [3—7].

*Метою роботи* є розробка обчислювального комплексу на основі гетерогенної кластерної системи для виконання високопродуктивних паралельно-ієрархічних обчислювальних процесів, пов'язаних з підвищенням швидкодії оброблення інформаційних середовищ.

### **Постановка проблеми. Аналіз підходів до реалізації паралельності при обробці надвеликих масивів даних**

Задачі організації високопродуктивної обробки надвеликих масивів інформації досить успішно розв'язуються за допомогою паралельних та розподілених обчислень. Під розподіленими обчисленнями ми розуміємо спосіб розв'язання трудомістких обчислювальних завдань з використанням двох і більше комп'ютерів, об'єднаних в мережу. Паралельні обчисленнями — спосіб організації обчислень, в яких кілька дій проводяться одночасно. Варто зазначити, що під час організації паралельних та розподілених обчислень не можливо обійтись без використання багатопроекторних обчислювальних систем. У більшості випадків для таких задач використовуються суперкомп'ютери, але в окремих випадках непоганою альтернативою є кластерні обчислювальні системи [8—10].

В переважній більшості кластери використовуються в обчислювальних цілях, зокрема в наукових дослідженнях. Для обчислювальних кластерів істотними показниками є висока продуктивність процесора в операціях над числами з плаваючою крапкою (flops) та низька латентність мережі, і менш істотними — швидкість операцій введення-виведення, яка більшою мірою важлива для баз даних і веб-сервісів. Обчислювальні кластери дозволяють зменшити час розрахунків в порівнянні з одиночним комп'ютером, розбиваючи завдання на гілки, що виконуються паралельно, і обмінюються даними по локальній мережі. Мережева компонента кластера може бути або звичайною локальною мережею, або побудованою на основі спеціальних мережевих технологій, що забезпечують надшвидку передачу даних між вузлами кластера. Мережа кластера призначена для інтеграції вузлів кластера та, звичайно, відокремлена від зовнішньої мережі, через яку здійснюється доступ користувачів до кластера. Окремим типом надпотужних обчислювальних систем виділяють високопродуктивні кластери (позначаються англ. аббревіатурою HPC Cluster — High-performance computing cluster) [8, 9].

Разом з тим паралельно-ієрархічне перетворення в поєднанні з можливостями систем розподіленої обробки інформації та інформаційної оптоелектроніки відкриває гарні перспективи поліпшення характеристик функціонування обчислювальних систем новаторської архітектури у сфері паралельної обробки надвеликих масивів даних [3, 4, 6, 11].

Аналізуючи останні тенденції щодо повсюдного впровадження паралелізму обробки інформації, можна зробити висновок, що ця тематика є досить актуальною та затребуваною. Поєднання інноваційного паралельно-ієрархічного методу обробки інформації та розподілених кластерних обчислень можна розцінювати як логічний та цілком доцільний крок, який дозволить виконувати алгоритм паралельно-ієрархічного перетворення за прийнятний для користувача час [3, 11].

Паралельно-ієрархічне перетворення застосовується для виділення характерних ознак зображень, їх кодування і скорочення розмірності при виконанні обчислень. Добра збіжність паралельно-ієрархічного перетворення використовується в структурах паралельної пам'яті, аналізу і розпізнавання зображень під час кодування та ущільнення даних [4, 6].

### **Аналіз способів перетворення інформаційних середовищ**

Обробка зображень має надзвичайно велике значення у багатьох сферах діяльності людини. Зо-

крема, розпізнавання зображень дозволяє розв'язувати складні інтелектуальні задачі класифікації, ідентифікації, автоматизованого пошуку схожих зображень, доведення автентичності зображення тощо [4, 6]. Виділяють три основних типи перетворень інформаційних полів [4, 7, 12]:

— Повне сприйняття характеризується тим, що або саме інформаційне поле (ІП) використовується в якості внутрішнього представлення інформації, або спосіб його перетворення такий, що дозволяє однозначно відновлювати вихідне поле. При цьому весь обсяг вхідних даних потрібно аналізувати лише в тому випадку, якщо невідомо, яка їх частина достатня для виділення інформації, на основі якої можливе розв'язання задачі кінцевого використання.

— Під час проблемно-орієнтованого сприйняття використовується не взаємно-однозначне, а багато-однозначне відображення ІП у поле сприйняття. Тобто інформація, яка аналізується системою, є узагальненням реальної ситуації. Прикладами обмежених внутрішніх представлень у системах цього класу є контурні препарати зображення, обмежений набір коефіцієнтів двовимірного перетворення тощо.

— Рефлексорні сприйняття характеризуються тим, що заздалегідь задана процедура перетворення ІП у кінцевий набір ознак. Подальша робота відбувається в просторі виділених ознак із використанням теорії рішень. Системи з таким типом сприйняття найпоширеніші в наш час, практично не мають переналадження і розробляються спеціально для визначеної задачі.

Отже, найактуальнішим і трудомістким є пошук структур вторинних (перетворених) даних для проблемно-орієнтованих систем сприйняття, оскільки в системах повного сприйняття ця структура цілком визначається самим ІП, а в системах із рефлексорним сприйняттям — розв'язуваною задачею. У цьому зв'язку здійсимо аналіз існуючих підходів до представлення ІП для організації даних у системах другого типу.

Виділимо чотири основні схеми [4, 6, 7]:

- 1) пряме представлення;
- 2) представлення на основі ортогональних перетворень;
- 3) структурне представлення;
- 4) представлення на основі нейроподібних методів перетворення.

Пряма схема припускає поелементне введення в пам'ять комп'ютерної системи елементів ІП і роботу з ним як із матрицею чисел. Система опрацьовує елементи один за одним, виконуючи визначені операції [4, 6, 7].

Іншою широко використовуваною схемою подання є ортогональні перетворення (кодування з перетворенням) — Фур'є, Адамара, Карунена–Лоева й ін., які описують ІП набором коефіцієнтів розкладання за деяким базисом. Важливою властивістю коефіцієнтів розкладання є те, що кожний із них характеризує все ІП в цілому, тобто є його інтегральною характеристикою. Інтегральність коефіцієнтів приводить до того, що вони виявляються інформативними під час аналізу тільки тих класів ІП, що можна розглядати як «стаціонарні» сигнали [4, 6, 7].

Структурні методи представлення ґрунтуються на описі зображення за допомогою набору деяких стандартних елементів (наприклад, відрізка, кута, перетину відрізків і зв'язків або відношень між ними). Перевагою синтаксичного опису є можливість його лінгвістичної організації, опис зображення в термінах укрупнених, семантично значущих одиниць, що відповідає особливостям людського сприйняття. Під час автоматичного створення опису виникають ті ж труднощі, що і у разі використання прямого подання, — у реальних задачах комп'ютерна система виявляється не в змозі самостійно виділити істотні елементи, узагальнені характеристики [4, 6, 7].

Нейроподібні методи подання інформації засновані на використанні чутливості нейронів у зоровій системі до паралельно-ієрархічного аналізу орієнтації стимулу в поєднанні з роздільною (пофрагментною) пірамідальною обробкою даних. Метод паралельно-ієрархічного перетворення належить саме до класу нейроподібних методів подання інформації [4, 6, 7].

Таким чином, за базовий метод обробки цифрових зображень виберемо метод прямого паралельно-ієрархічного перетворення як найбільш перспективний та гнучкий з точки зору можливостей паралелізації.

Математична модель прямого паралельно-ієрархічного перетворення в порівнянні з відомими числовими методами перетворення (наприклад, розкладання в математичні ряди) простими операціями типу додавання забезпечують складну функціональну обробку сигналів у реальному масштабі часу, а також однозначність і оборотність із гарною збіжністю обчислювального процесу. Причому мережний метод обробки приводить до швидкого ущільнення вхідних масивів інформації [4, 6, 7].

У цьому випадку алгоритм обробки зображень за допомогою паралельно-ієрархічного перетворення дозволяє обробляти зображення частинами, вікнами певної розмірності. При цьому різні вікна обробляються незалежно, що дозволяє виконувати таке перетворення паралельно. Для організації обчислень було вирішено використовувати обчислювальний кластер — групу комп'ютерів, об'єднаних високошвидкісними каналами зв'язку, яка представляє з точки зору користувача єдиний апаратний ресурс [4, 6, 7].

### **Реалізація паралельно-ієрархічного перетворення інформаційних середовищ на основі гетерогенної кластерної системи**

Опишемо узагальнений алгоритм функціонування програмного комплексу. Для цього будемо відштовхуватись від бажаного результату — набору векторів хвостових елементів, які однозначно характеризуватимуть вхідне зображення [3—6]. Загальний алгоритм функціонування програмного комплексу:

I. Користувач завантажує вхідне зображення, яке необхідно обробити, а також вказує множину вузлів у локальній мережі, на яких необхідно здійснювати обчислення.

II. Після ініціалізації початку обчислень комплекс автоматично формує пакет завдань для кожного обчислювального вузла та запускає їх на виконання;

III. Після завершення обчислень комплекс збирає результати окремих вузлів на головному (користувацькому) сервері та демонструє результати користувачу.

Для реалізації цього алгоритму розкладемо структуру обчислювального комплексу на окремі складові:

1. Консоль керування — графічний додаток MS Windows, за допомогою якого виконується управління роботою кластера. Повинна забезпечувати:

а) можливість завантаження зображення у будь-якому форматі;

б) можливість вказати множини вузлів, які складають обчислювальний кластер, або надати автоматизовану можливість просканувати локальну мережу на предмет виявлення множини обчислювальних вузлів;

в) можливість запустити на виконання обробку зображення на обраній множині вузлів та отримати результати обробки.

2. Хост-програма, яка запускається на кожному обчислювальному вузлі та забезпечує таку функціональність:

а) отримання набору завдань по локальній мережі;

б) виконання над кожним набором даних із пакету завдань, які базуються на моделі прямого паралельно-ієрархічного перетворення;

в) формування набору векторів хвостових елементів та передача його на вузол-ініціатор обчислень.

3. Програмна бібліотека, яка забезпечуватиме мережеву взаємодію між вищевказаними компонентами:

а) отримання вхідного зображення, над яким необхідно здійснити перетворення;

б) можливість просканувати локальну мережу на предмет наявності обчислювальних вузлів, або можливість задати їх множину вручну;

в) розбиття вказаного зображення на набір завдань відповідно до множини обчислювальних вузлів та призначення завдання кожному вузлу;

г) функціональність для ініціалізації початку обробки та отримання результатів.

У загальному вигляді, схему взаємодії компонентів програмного комплексу зображено на рис. 1.

Алгоритм кластерної обробки зображень методом прямого паралельно-ієрархічного перетворення можна описати так:

— Вхідне зображення розділяється на множину завдань для кожного із обчислювальних вузлів таким чином:

а) зображення розділяється на набір вікон обробки розмірністю  $128 \times 128$  пікселів кожне;

б) перше вікно обробки призначається першому обчислювальному вузлу, друге — другому вузлу, і т. д. Вікно  $N + 1$  (де  $N$  — кількість обчислювальних вузлів) знову призначається першому вузлу і т. д., із урахуванням того, що кількістю обчислювальних вузлів у загальному випадку значно менша за кількість завдань.

— Кожен обчислювальний вузол проводить обробку власного набору завдань методом прямого

паралельно-ієрархічного перетворення та формує множину наборів хвостових елементів як результатів перетворення.

— Результати обробки із кожного вузла збираються на головному (керуючому) вузлі та формується загальний результат обробки зображення.

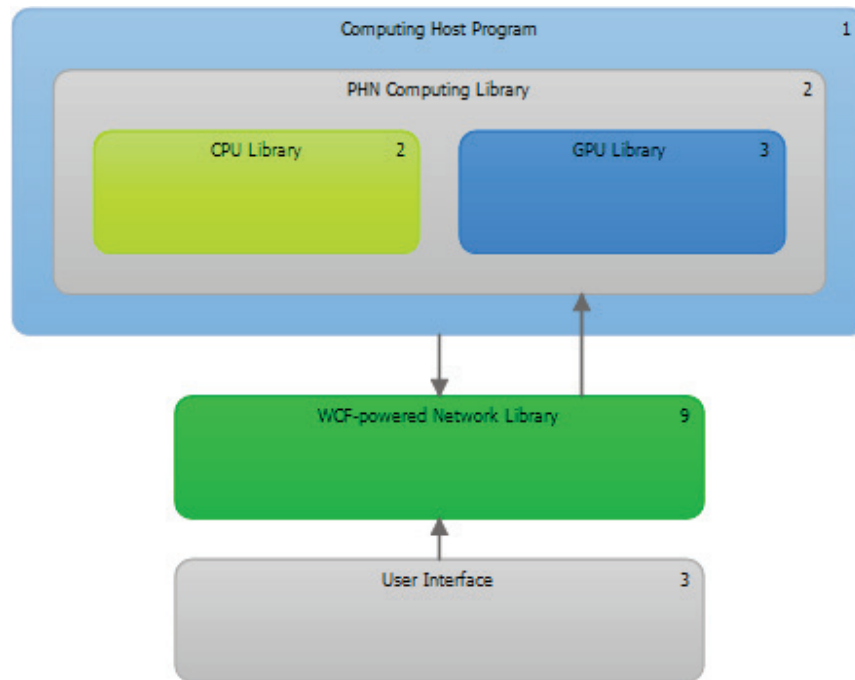


Рис. 1. Схема взаємодії компонентів

Проектування програмного комплексу з урахуванням вищезазначеної схеми взаємодії компонентів відбувалось за такими етапами:

— На найзагальнішому метарівні: програмний комплекс «DirectPHT::Cluster» повинен завантажувати та ідентифікувати зображення довільної розмірності за допомогою прямого паралельно-ієрархічного перетворення, яке виконується на обчислювальному кластері.

— На другому рівні деталізації: програмний комплекс «DirectPHT::Cluster» повинен автоматично виявляти топологію обчислювального кластера, виявляти доступні обчислювальні вузли, призначити їм індивідуальні завдання та збирати результат. Також необхідно визначити та видати відповідний пакет завдань кожному обчислювальному вузлу.

— На третьому рівні деталізації: необхідно експертно визначити оптимальний розмір частин, на які буде розбиватись вихідне зображення, для створення пакету завдань для кожного обчислювального вузла. Також необхідно визначити програмну структуру сервера контролю та обчислювальних вузлів. По можливості програмний комплекс повинен бути незалежним від топології кластера.

— На четвертому рівні деталізації: обирається технологія комунікації між вузлами та сервером. У цьому випадку був вибір між технологією Microsoft.NET Windows Communication Foundation та функціональною мовою програмування Erlang із пакетом бібліотек OTP.NET. Вибір було зроблено на користь першої технології через зручність її інтеграції із вже наявним проектом реалізації прямого паралельно-ієрархічного перетворення на одному обчислювальному вузлі [3, 13, 14].

— На п'ятому рівні деталізації: визначається структура сервісу взаємодії та формат повідомлень, якими будуть обмінюватись сервер та обчислювальні вузли. Відповідно до обраної технології було визначено формат так званого контракту даних, тобто формат повідомлень, якими будуть обмінюватись сервер та обчислювальні вузли кластера. Оскільки кожен обчислювальний вузол матиме власний набір завдань (відповідно час обробки у кожного вузла буде різний), тому вирішено організувати обмін даними між вузлами та серверною програмною бібліотекою асинхронно. Крім того, виклик основного методу цієї бібліотеки із головного додатку — консолі керування — теж було реалізовано асинхронно: бібліотека сигналізуватиме про завершення обчислень головному додатку лише тоді, коли кількість результатів, отриманих від обчислювальних вузлів, буде рівною кількості початкових завдань на обчислення.

— На шостому рівні деталізації: відбувається кодування прийнятих рішень з урахуванням технології комунікації та можливостей мови програмування C#.

Згідно з результатами аналізу та з використанням обраної технології міжкомпонентної мережевої взаємодії розроблено пакет програм для управління обчислювальним кластером [13—15].

Для початку роботи з пакетом програм для керування обчислювальним кластером необхідно виконати певні передумови:

1. По можливості програму для керування обчислювальним вузлом (PHNHost.exe) бажано запускати від імені користувача «Administrator». Якщо ж це через технічні причини неможливо, необхідно у консолі MS Windows виконати таку команду:

```
netsh http add urlacl url=http://+:<порт>/PHNService user=<ім'я користувача >
```

де порт — числове значення порту, через який буде відбуватись взаємодія частин пакету програм. Під час запуску програми «PHNHost.exe» із параметрами за замовчуванням значення порту має бути рівним 54321; ім'я користувача — строкове значення, яке відповідає імені користувача, у чісму сеансі буде запущено цей пакет програм.

2. Для коректного функціонування пакету програм рекомендовано на час роботи відключити на обчислювальних вузлах службу MS Windows Firewall.

Для початку роботи необхідно запустити на кожному із обчислювальних вузлів програму «PHNHost.exe». Цю програму можна запускати з параметрами за замовчуванням або вказати бажаний номер порту, через який буде відбуватись взаємодія складових цього пакету програм. Запуск програми PHNHost.exe із вказаним портом та із параметрами за замовчуванням зображено на рис. 2.

Коли на всіх обчислювальних вузлах кластера буде запущено програму «PHNHost.exe», можна запускати головну програму керування обчислювальним кластером — «ControlConsole.exe».

Для додавання обчислювального вузла у список вузлів, які будуть виконувати обробки, необхідно натиснути на опцію «Add Server», після чого відобразиться вікно додавання обчислювального вузла, зображене на рис. 3. У цьому вікні необхідно вказати IP-адресу обчислювального вузла та порт, по якому відбуватиметься взаємодія. Це значення має збігатися із параметрами запуску програми «PHNHost.exe» на відповідному обчислювальному вузлі (рис. 4).



Рис. 2. Запуск програми «PHNHost.exe»

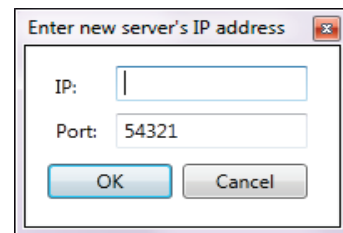


Рис. 3. Екранна форма додавання обчислювального вузла

Після натискання кнопки «OK» відбудеться перевірка доступності цього вузла та вузол буде додано у список обробки (див. рис. 4).

Існує ще один спосіб визначення множини обчислювальних вузлів у локальній мережі кластера, який можна викликати, натиснувши опцію «Rescan local network» (див. рис. 4).

Після додавання необхідної кількості обчислювальних вузлів потрібно завантажити зображення, над яким буде виконуватись обробка. Цю операцію можна виконати двома шляхами: або, скориставшись технологією «Drag and Drop», перетягнути бажане зображення на білий прямокутник у лівій частині екранної форми програми, або натиснути на опцію «Load image» (див. рис. 4).

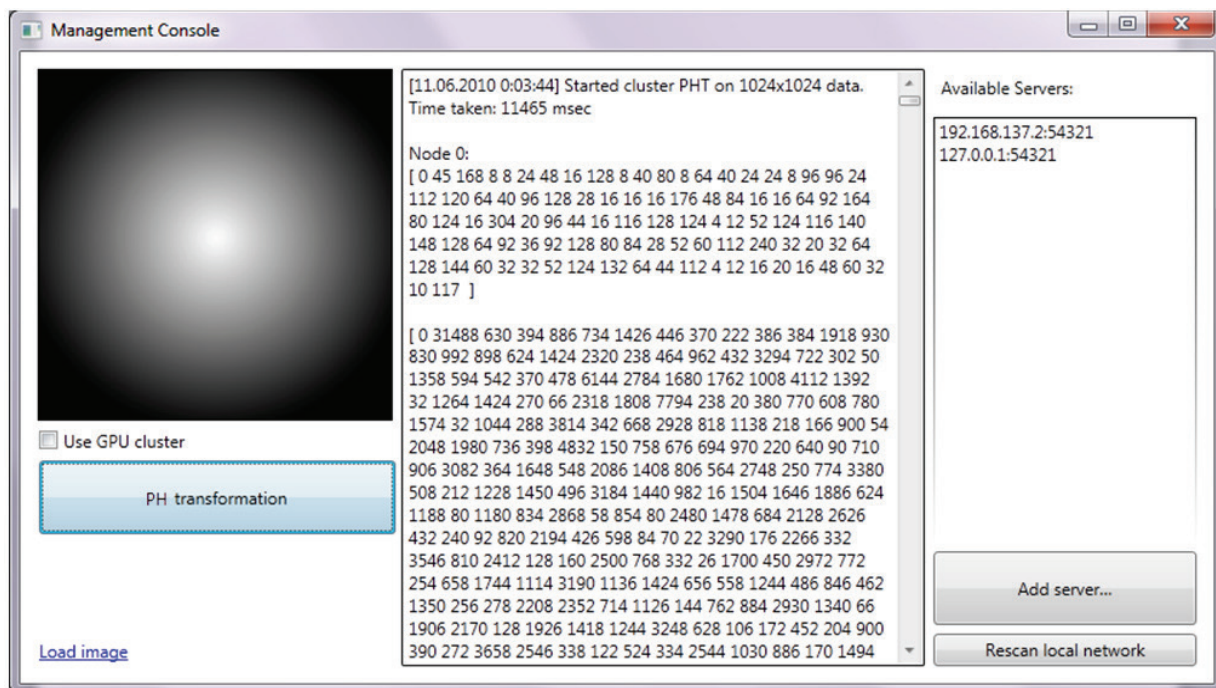


Рис. 4. Екранна форма програми керування обчислювальним кластером «ControlConsole.exe»

Після виконання цих етапів можна ініціювати обробку зображення, натиснувши опцію «PH transformation». У поле виведення у центрі головного вікна програми ControlConsole.exe виведеться час початку обробки та розмір оброблюваних даних (рис. 4).

Коли усі обчислювальні вузли завершать свою роботу, результати у вигляді множини хвостових елементів прямого паралельно-ієрархічного перетворення будуть відображені у полі виведення програми керування кластером, як це показано на рис. 4.

### Висновки

На основі здійсненого аналізу підходів до реалізації паралельності під час обробки надвеликих масивів даних та аналізу способів перетворення інформаційних середовищ визначено платформу, а саме гетерогенну кластерну систему для подальшої реалізації паралельно-ієрархічного перетворення інформаційних середовищ.

Розроблено системні вимоги, структурну організацію обчислювального комплексу на основі гетерогенної кластерної системи, схему взаємодії програмних компонентів та загальний алгоритм функціонування програмного комплексу, що дозволило здійснити програмну реалізацію паралельно-ієрархічного перетворення інформаційних середовищ на основі гетерогенної кластерної системи.

Розроблений пакет програм протестовано на обчислювальному кластері Microsoft IT Academy ВНТУ. Результати тестування дозволяють зробити висновок про достовірність комп'ютерного моделювання, а також правильність та оптимальність проектування. Вказаний обчислювальний комплекс на основі гетерогенної кластерної системи, який застосовано для виконання паралельно-ієрархічного перетворення інформаційних середовищ, можна віднести до гібридних обчислювальних комплексів на основі інтеграції парадигм паралельної та розподіленої обробки інформації, а також технологій GPGPU для подальшої реалізації швидкої та ефективної паралельної обробки надвеликих масивів інформації різної фізичної природи. В свою чергу це відкриває реальні перспективи розробки моделей інтелектуальних паралельно-ієрархічних та високоефективних ієрархієрархічних систем.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Вступ в алгоритмічну теорію ієрархії і паралелізму нейроподібних обчислювальних середовищ та її застосування до перетворення зображень. Основи теорії пірамідально сільового перетворення зображень / В. П. Кожем'яко, Л. І. Тимченко, Ю. Ф. Кутаєв, І. Д. Івасюк. — К. : УМК ВО, 1994. — 272 с.
2. Свечников С. В. Квазиимпульсно-потенциальные оптоэлектронные элементы и устройства логико-временного типа / С. В. Свечников, В. П. Кожемяко, Л. И. Тимченко. — К. : Наукова думка, 1987. — 256 с.

3. Яровий А. А. Методологічні особливості побудови паралельно-ієрархічних та ієрарх-ієрархічних мереж на основі кластерних систем з розподіленою обробкою інформації / А. А. Яровий // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. — 2010. — № 1 (19). — С. 69—79.
4. Паралельно-ієрархічне перетворення як системна модель оптико-електронних засобів штучного інтелекту : моног. / [В. П. Кожем'яко, Ю. Ф. Кутаєв, С. В. Свєчніков, та ін.] — В. : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2003. — 324 с.
5. Яровий А. А. Нейроподібна мережна модель паралельно-ієрархічної обробки цифрової інформації для задач ідентифікації плямових зображень лазерних пучків / А. А. Яровий // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2007. — № 5 (74). — С. 95—102.
6. Кожем'яко В. П. Паралельно-ієрархічні мережі як структурно-функціональний базис для побудови спеціалізованих моделей образного комп'ютера : моног. / В. П. Кожем'яко, Л. І. Тимченко, А. А. Яровий. — Вінниця : Універсум-Вінниця, 2005. — 161 с.
7. Тимченко Л. І. Паралельно-ієрархічне перетворення як системна модель ефективних засобів штучного інтелекту : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук : спец. 05.13.23 «Системи та засоби штучного інтелекту» / Л. І. Тимченко; Держ. науково-дослідний інститут інформаційної інфраструктури. — Львів, 2002. — 36 с.
8. Хьюз К. Параллельное и распределенное программирование на C++ / К. Хьюз, Т. Хьюз ; пер. с англ. — М. : ИД «Вильямс», 2004. — 672 с.
9. Воеводин В. В. Параллельные вычисления / В. В. Воеводин, Вл. В. Воеводин. — СПб. : БХВ-Петербург, 2002. — 608 с.
10. Бройнль Т. Паралельне програмування : навч. посіб. / Т. Бройнль ; пер. з нім. В. А. Святого. — К. : Вища школа, 1997. — 358 с.
11. Яровий А. А. Прикладні аспекти і перспективи побудови кластерів на основі GPU для реалізації паралельної та паралельно-ієрархічної обробки інформації / А. А. Яровий // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. — 2009. — № 2 (18). — С. 119—126.
12. Александров В. В. Представление и обработка изображений: Рекурсивный поход / В. В. Александров, Н. Д. Горский. — Л. : Наука, 1985. — 192 с.
13. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 34123. Комп'ютерна програма «Програмний комплекс для реалізації паралельно-ієрархічного перетворення інформаційних середовищ на основі CPU-орієнтованої кластерної платформи (DirectPHT::Cluster)» / Яровий А. А., Богомолов Ю. С. Дата реєстрації Державним Департаментом інтелектуальної власності України 14.07.2010.
14. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 34122. Комп'ютерна програма «Програмний комплекс для реалізації паралельно-ієрархічного перетворення інформаційних середовищ на основі GPU-орієнтованої кластерної платформи (DirectPHT::GPU-Cluster)» / Яровий А. А., Богомолов Ю. С. Дата реєстрації Державним Департаментом інтелектуальної власності України 14.07.2010.
15. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 33758. Комп'ютерна програма для реалізації паралельно-ієрархічного перетворення інформаційних середовищ на основі CPU (Direct PHT::CPU) / Яровий А. А., Богомолов Ю. С. Дата реєстрації Державним Департаментом інтелектуальної власності України 17.06.2010.

Рекомендована кафедрою комп'ютерних наук

Стаття надійшла до редакції 22.12.10  
Рекомендована до друку 22.02.11

**Яровий Андрій Анатолійович** — доцент кафедри комп'ютерних наук.  
Вінницький національний технічний університет, Вінниця