

Високопродуктивні гетерогенні обчислювальні комплекси паралельно-ієрархічного оброблення зображень

Тимченко Л.І.¹, Яровий А.А.², Мудрик В.В.², Кокряцька Н.І.¹

¹ Державний економіко-технологічний університет транспорту, Україна, Київ, вул. Лукашевича, 19

² Вінницький національний технічний університет, Україна, Вінниця, Хмельницьке шосе, 95

a.yarovyy@gmail.com, timchen@list.ru

Анотація. В роботі досліджуються відомі та розробляються нові методи, структури, алгоритми, адекватні програмні моделі та спеціалізовані гібридні апаратні засоби, що інтегрують парадигми паралельного, розподіленого та гетерогенного програмування на основі технологій паралельно-ієрархічної обробки інформації та GPGPU. В контексті розвитку теорії паралельно-ієрархічного перетворення інформації розробляються методи організації високопродуктивних паралельно-ієрархічних обчислювальних процесів в інтелектуалізованих системах. Це дозволяє ефективну реалізацію масивно-паралельних обчислень в межах високопродуктивного гетерогенного обчислювального комплексу для вирішення актуальної науково-технічної задачі багатоетапного сприйняття, ущільнення та розпізнавання динамічних зображень. Дані дослідження мають прикладний характер і за своїми результатами може бути актуальним для декількох суміжних галузей науки, таких як інформатика, математика, кібернетика, астрофізика, телекомунікації.

Ключові слова

Паралельні обчислення, паралельно-ієрархічне перетворення, GPGPU-технології, гетерогенне програмування, цифрова обробка інформації

1 Вступ

Аналізуючи та враховуючи останні тенденції розвитку прикладних задач можна стверджувати, що для того, щоб розробляти сучасні високопродуктивні обчислювальні комплекси, розробникам необхідно мати практичні знання не лише сучасних тенденцій розвитку обчислювальних технологій, але й парадигм паралельного, розподіленого та гетерогенного програмування. При організації паралельних та розподілених обчислень не можливо обійтись без використання багатопроцесорних обчислювальних систем.

У більшості випадків для таких задач використовуються суперкомп'ютери, високопродуктивні кластери (HPC Clusters), GRID-системи, засоби Cloud computing, тощо. Вони непогано освоєні, для них розроблено велику кількість прикладних пакетів, з їх допомогою вирішуються складні обчислювальні задачі. Вони мають багато переваг, за винятком таких важливих характеристик – висока вартість та значне споживання електроенергії, що змушує шукати альтернативу. Таким чином, актуальною є проблема побудови гнучких високопродуктивних гібридних обчислювальних комплексів на основі новітніх технологій із економним споживанням електроенергії, меншою вартістю комплектуючих та подальшого сервісного обслуговування, а також їх компактним виконанням в поєднанні з високою обчислювальною щільністю та високошвидкісними каналами передачі даних [1].

Одним із способів вирішення поставленої проблеми є застосування гетерогенних паралельних обчислень при побудові гібридних обчислювальних комплексів на основі графічних процесорних пристроїв (Graphical Processor Unit – GPU) для створення систем, здатних гідно конкурувати з традиційними суперкомп'ютерами та задовольняти наведеним вище вимогам [2]. Дана робота концентрується на дослідженні архітектури, структури, алгоритмів, адекватних програмних моделей та спеціалізованих гібридних апаратних засобів, що інтегрують парадигми паралельного, розподіленого та гетерогенного програмування на основі технологій паралельно-

ієрархічної обробки інформації та GPGPU. В прикладному аспекті результати роботи планується до впровадження в сфері оптичних систем зв'язку, зокрема при вирішенні задач високопродуктивного оброблення динамічних зображень протяжних лазерних трас та прогнозування їх характеристик з підвищеною точністю.

Принцип побудови високопродуктивних паралельно-ієрархічних систем (ВПІС) для оброблення даних можна визначити як послідовність операцій над множинами масивів даних, що утворюють множини інформаційних полів різноманітних рівнів ієрархії, взаємодія між якими здійснюється пірамідальною ієрархічною структурою і реалізується на основі мережевої багато процесорної архітектури. Сутність паралельно-ієрархічного (ПІ) підходу полягає в одночасному використанні послідовності множин масивів даних, що утворюють множини інформаційних полів на різноманітних рівнях ієрархії, рекурсивному формуванні нових послідовностей інформаційних потоків на різноманітних рівнях ієрархії, що дозволяє реалізувати стратегію багаторівневої взаємодії від "загального до часткового" [3].

На основі аналізу іноземних публікацій, необхідно відзначити, що актуальною також є проблема використання GPU для організації високопродуктивної паралельної та ієрархічної обробки інформації, і, зокрема, динамічних зображень. Зокрема, вказана наукова проблема описана у працях таких вчених: R.J. Meuth ("GPUs surpass computers at repetitive calculations", Potentials, IEEE, vol. 26, no. 6, Nov.-Dec. 2007), Sejun Kim ("A GPU based Parallel Hierarchical Fuzzy ART Clustering"), Andrew Nere ("Optimizing Hierarchical Algorithms for GPGPUs", University of Wisconsin Madison, April 26, 2010), Xueqian Zhao ("Parallel Hierarchical Cross Entropy Optimization for On-Chip Decap Budgeting", Michigan Technological University, 2010), J.M. Li, D.L. Wan, Z.X. Chi and X.P. Hu ("A parallel particle swarm optimization algorithm based on fine-grained model with GPU-accelerating," Harbin Gongye Daxue Xuebao/Journal of Harbin Institute of Technology, vol. 38, no. 12, Dec. 2006) та ін.

Підтвердженням актуальності роботи в прикладному аспекті, зокрема в задачах профілювання лазерних променів, є подібні наукові дослідження та програмно-апаратні розробки деяких провідних корпорацій США, таких як Photon Inc. (San Jose, California, USA), Spiricon Inc. (Logan, Utah, USA), Coherent Auburn Group (Auburn, California, USA), а також наукові публікації: David L. Shealy, John A. Hoffnagle ("Laser beam shaping profiles and propagation" - Applied Optics – 2006); Valerie C. Coffey ("Laser-beam profilers: How to select a beam-profile measurement system" - Laser Focus World – 2009).

Подібні наукові дослідження активно здійснюються науковими школами, які представляють різні країни СНД, наприклад, НВО "Астрофізика", ЗАТ "Космические информационные аналитические системы" (Москва, Росія), ФДУП Всеросійський науково-дослідний інститут оптико-фізичних вимірювань (зокрема, наукові публікації авторів: Абдрахманов К.Ш., Быкова О.Г., Улановский М.В. Стандартизация методов измерений ширин, углов расходимости и коэффициентов распространения пучков лазерного излучения (Измерение расходимости лазерного пучка) - «Метрология» №2 – 2010; Быкова О.Г., Либерман А.А., Улановский М.В. Стандартизованные методики измерений мощности, энергии и временных характеристик лазерного пучка. - «Метрология» №12 – 2009).

2 Аналіз особливостей організації обчислювального процесу в паралельно-ієрархічних системах пірамідального типу

Принцип функціонування багаторівневих ПІ 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 ПІ системи. Необхідно відзначити, що вказані мережеві перетворення є нелінійними перетвореннями, ядра яких можна представити у виді мережевої моделі [3-5].

Принципова відмінність пірамідального ПІ перетворення 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.

Принцип побудови пірамідальної ієрархічної структури даних полягає в такому: з початкового ПІ формують послідовності масивів даних того самого ПІ, 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, $i = \overline{0, n}$. Така піраміда ПІ, в свою чергу, формує обчислювальну структуру – багаторівневу ПІ систему. 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 ПІ з різноманітним ступенем деталізації.

При цьому, рішення про необхідність подальшого оброблення можна прийняти на верхньому рівні обробки після аналізу ПП з малим розподілом, кожний елемент якого містить інтегральні оцінки про відповідні фрагменти вихідного ПП на найнижчому рівні. Це приводить до підвищення швидкості обробки ПП. 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 ПП характеризується трьома координатами (i, j, k) , де i – рядок, j – стовпчик, k – рівень. ПП системи пірамідального типу дозволяють подати в кодованому, а також ущільненому вигляді (в якості елементарних) такі числа ПП, 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 [3,4].

Для виявлення часових закономірностей організації обчислювального процесу в ПП 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 обирається елемент (конкретне застосування вибору критерію загальної частини залежить від типу розв'язуваної задачі) [3,4].

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

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

$$a_{i_4} - \bigcup_{i_2=1}^{n_2} (a_{i_2})^{t_3} = \Delta(a_{i_4})^{t_1} - \bigcup_{i_0=1}^{n_0} (\Delta(a_{i_0})^{t_1})^{t_3} = \Delta^2(a_{i_4})^{t_1 t_3}.$$

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

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

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

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

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

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

або

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

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

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

Також обраний елемент можна записати у вигляді:
$$\bigcup_{i_0=1}^{n_0} (\Delta^{j+1}(a_{i_0}) \uparrow_{1 \dots t_{2(j+1)-1}}) \uparrow^{2(j+1)+1}. \quad (4)$$

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 $\left\{ r^{t_{2j-1}} \bigcup_{i_0=1}^{n_0} (\Delta^{j-1}(a_{i_0}) \uparrow_{1 \dots t_{2j-3}}) \uparrow^{2j-1} \right\}$ 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 П.

Необхідно відзначити, що "пірамідальність" наведеного процесу оброблення є природною. Адже дійсно, у процесі оброблення з кожним кроком кількість чисел зменшується. Якщо множини одержувані після кожного кроку, як би поставити послідовно одна на другу, то утворений ними тривимірний контур буде мати форму піраміди [3,4].

Таким чином, П перетворення пірамідального типу припускає всередині і поза кожним ієрархічним рівнем той самий закон переходу від одного рівня до іншого, причому цей закон формулюється щодо групи множин елементів П (даних або зображення) нижнього рівня і проміжної групи множин елементів перетворених даних усіх наступних рівнів. Тобто, для побудови пірамідальної паралельно-ієрархічної структури на алгоритмічному і структурному рівнях задається лише правило перетворення групи множин елементів даних, що потім поширюються по "горизонталі" – на інші елементи і по "вертикалі" – на елементи інших ієрархічних рівнів розподілу. Це правило описує і схему перетворення вихідних даних, і результуючу структуру даних, і алгоритм оброблення.

Природним способом опису паралельно-ієрархічної структури взаємозв'язків елементів є рекурсія: для побудови вказаної обчислювальної структури достатньо зазначити розмірність множин, закон розподілу ймовірностей величин їх елементів, -перетворення і -критерій. Іншими словами, для побудови структури перетворення зберігається лише деяка основна ознака, своєрідна "хеш-функція" ("інформаційний ген"), і принцип розвитку самої структури ПП, послідовне застосування якого дозволяє поетапно розгортати вихідний опис за ступенем деталізації [3-6].

Високопродуктивну систему обробки інформації можна одержати лише пристосуванням архітектури під відповідну структуру даних. Проте структура даних у процесі пірамідальної обробки змінюється від великого фіксованого масиву на нижньому рівні до невеличкої гнучкої структури на верхньому. Великий інтерес представляють однорідні нерозподілені обчислювальні структури, що відповідають класу мульти-SIMD систем, у яких декілька рівнів ідентичних ПЕ працюють автономно в SIMD-режимі. Кожний рівень містить велику кількість простих ПЕ. Кожному ПЕ відповідає елемент зображення на відповідному ієрархічному рівні розподілу [3,4,6].

У більш складному випадку – формуванні однорідних розподілених пірамідальних обчислювальних структур – декілька потужних ідентичних процесорних блоків об'єднуються в ієрархічну пірамідальну структуру. Кожному процесорному блоку відповідає частина оброблюваних даних. Така пірамідальна система може функціонувати як у SIMD-, так і в MIMD-режимах [3,4,6].

На основі проведеного аналізу технологій GPGPU було обрано в якості апаратної та програмної платформи для подальших досліджень, при організації масивно-паралельних обчислень, технологію NVIDIA SLI. Розроблено високопродуктивний обчислювальний мережевий комплекс, який містить 2 відеоадаптера GeForce GTX590 (кожен з яких працює у 1024 потоки), що є одним із пристроїв останнього покоління NVIDIA. Кожен відеоадаптер GeForce GTX590 (з теоретичною продуктивністю 2488,3 GFLOPS) містить два 512-ядерних GPU GTX 500, що в сукупності становить $512 \times 4 = 2048$ -ядерне апаратне забезпечення.

Таким чином, розроблена SLI система з двох таких відеоадаптерів надаватиме можливість обробляти інформацію у 2048 потоків з граничною теоретичною продуктивністю 4976,6 GFLOPS. Для порівняння, найпотужніші публічно доступні на даний час процесори Intel Core i7 працюють у 4 потоки і забезпечують продуктивність близько 53,28 GFLOPS [2,7].

Для написання основного програмного модуля обрано технологію CUDA. Технологія CUDA являє собою середовище розробки мовою програмування C, яка дозволяє розробляти програмне забезпечення для ефективного вирішення надскладних обчислювальних задач з підвищеною швидкістю завдяки багатоядерній обчислювальній потужності графічних процесорів (GPU). Технологія CUDA є достатньо гнучкою, адже надає розробнику можливість на свій розсуд організувати доступ до набору інструкцій графічного прискорювача і керувати його пам'яттю, організувати на GPU складні паралельні обчислення.

Натепер графічний процесор з підтримкою CUDA є потужною програмованою відкритою архітектурою. Для розробки графічного інтерфейсу було обрано декларативну мову програмування Qml, для реалізації внутрішньої логіки програми, та зв'язку з інтелектуальним модулем використано мову програмування високого рівня C++. Qml (Qt Meta-Object Language) – це декларативна мова для розробки та дизайну інтерфейсу програм, яка є частиною фреймворка Qt. Перевагою є те, що програми написані з використанням Qml можуть працювати на мобільних платформах таких як Android, Maemo, Symbian. Синтаксис мови складається з операторів мови програмування C++, JavaScript та CSS.

Для роботи із основним програмним модулем, який власне реалізує ПІ перетворення на GPU потрібно [8]:

- 1) додати вихідні коди до проекту;
- 2) створити один екземпляр класу `vector<vector<int>>`: заповнити його значеннями пікселів зображення (здійснюється автоматично після процедури завантаження зображення);
- 3) викликати метод PI, параметрами якого потрібно вказати двовимірний масив зображення, змінну типу `int`, в яку буде записано тривалість роботи програми в мілісекундах, та одновимірний масив типу `vector<int>`, в який буде записано результат роботи програми.

Програмний модуль функціонує, виконуючи такі етапи:

- 1) завантаження зображення – у вигляді двовимірного набору чисел;
- 2) виконання паралельно-ієрархічного перетворення з оптимізацією формування масок над інформаційними масивами.

Результатом роботи програмного модуля є вектор результатів кодування ("хвостових елементів"), який в подальшому можна ефективно декодувати без втрат [8,9].

3 Висновки

В дослідженні досліджено принцип розгортання в часі ієрархічних структур, розвинуто теоретичні положення організації високопродуктивних паралельно-ієрархічних обчислювальних процесів. Однією із значних переваг, що було досягнуто, є збільшення швидкості та продуктивності обробки динамічних зображень. Це стало можливим за рахунок розбиття зображення на певні сегменти, над якими паралельно виконуються обчислювальні операції, не перешкоджаючи одна одній і не сповільнюючи процес обробки. Завдяки цьому, досягаються значно кращі результати у порівнянні з тими, які були раніше. Наприклад, на обробку динамічного зображення затрачається значно менше часу, яке вимірюється не у секундному діапазоні, а у мілісекундному [1,2,7].

Запропоновано і досліджено масковий і безмасковий методи паралельно-ієрархічного кодування зображень, у яких враховується корельованість даних усього зображення, що дозволяє добре передавати (із витратами на кодування 1,5-2 біт/ел) як ділянки з плавними перепадами яскравості, так і високодетальні ділянки з різко вираженими контурами [5,7-9].

Удосконалено структурно-функціональну організацію паралельно-ієрархічних мереж, які реалізують різноманітні рівні розпаралелювання в структурах ПІ систем, що дозволяє здійснювати перетворення та оброблення зображень у реальному часі (10,65 мс) [1,5,7-9].

Таким чином, паралельно-ієрархічне перетворення об'єднує властивості просторово-частотного і структурного перетворень. Хвостові елементи мережі ПІ перетворення є основними елементами інформаційного середовища і забезпечують адекватний та ущільнений опис початкових даних. При реалізації перетворення забезпечується паралельно-ієрархічний доступ до даних, який дозволяє сполучити ієрархію і паралелізм обробки даних. Завдяки цьому можлива зміна внутрішньої структури її елементів, висока живучість, надійність, можливість перебудовуваності залежно від зовнішніх умов, пристосованість структури при зміні функцій системи. При реалізації системи забезпечується її функціональна цілісність, тобто виконуються взаємопогоджені дії всіх елементів для ефективного функціонування системи.

Список літератури

- [1] А. А. Яровий: Методологічні особливості побудови паралельно-ієрархічних та ієрарх-ієрархічних мереж на основі кластерних систем з розподіленою обробкою інформації. *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*, №1 (19): 69-79, 2010.
- [2] В. В. Мудрик, О. В. Степанчук, А. А. Яровий: Способи організації масивно-паралельних обчислень на базі апаратної платформи GPU. *Матеріали II міжнародної конференції молодих науковців "Сучасні інформаційні технології – 2012"*. – Одеса, Видавництво ОНПУ, 2012. – С. 98-99.
- [3] В. П. Кожем'яко, Ю. Ф. Кутаєв, С. В. Свечніков, Л. І. Тимченко, А. А. Яровий. Паралельно-ієрархічне перетворення як системна модель оптико-електронних засобів штучного інтелекту. *Монографія* – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2003. – 324 с.
- [4] В. П. Кожем'яко, Л. І. Тимченко, А. А. Яровий. Паралельно-ієрархічні мережі як структурно-функціональний базис для побудови спеціалізованих моделей образного комп'ютера. *Монографія*. – Вінниця: Універсум-Вінниця, 2005. – 161 с.
- [5] A. A. Yarovy, L. I. Timchenko, N. I. Kokriatskaia. Parallel-Hierarchical Computing System for Multi-Level Transformation of Masked Digital Signals. *Advances in Electrical and Computer Engineering*, vol. 12, no. 3: 13-20, 2012.
- [6] А. А. Яровой. Прикладные аспекты программно-аппаратной реализации нейроподобных параллельно-иерархических систем : *Сборник научных трудов. Научная сессия МИФИ. XI Всероссийская научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2009»*. Ч. 2. – М.: МИФИ, 2009. – С. 39-48.
- [7] А. А. Яровий. Особливості організації високопродуктивних паралельно-ієрархічних обчислювальних процесів. *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*, №2 (22): 55-64, 2011.
- [8] Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 39490. "Комп'ютерна програма прямого паралельно-ієрархічного перетворення з оптимізацією формування масок (із множенням мінімального елемента на потужність в операторі перетворення G)" / Яровий А.А., Сугак І.М. Дата реєстрації ДДІВ України 04.08.2011.
- [9] Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 39489. Комп'ютерна програма "Комп'ютерна програма зворотного паралельно-ієрархічного перетворення на основі оптимізованого маскового методу (із множенням мінімального елемента на потужність в операторі перетворення G)" / Яровий А.А., Сугак І.М. Дата реєстрації ДДІВ України 04.08.2011.