

А. Луцків, С. Лупенко, В. Пасічник

# Паралельні та розподілені обчислення

Навчальний посібник

Видавництво ПП «Магнолія 2006»

Львів

Л869

УДК 004.032.24+004.272+004.75

Рецензенти: д.т.н., проф. Виклюк Я.І. (Буковинський ун-т), д.т.н., проф. Марценюк В.В. (Тернопільський державний медичний ун-т ім. І.Я. Горбачевського); д.т.н., проф. Соколовський Я.І. (Національний лісотехнічний ун-т України)

**Паралельні та розподілені обчислення:** Навч. посіб.-/ А.М. Луцків, С.А. Лупенко, В.В. Пасічник / - Львів: ПП “Магнолія 2006” - 565 с.

ISBN 978-617-574-110-8

Навчальний посібник присвячено розгляду питань розробки векторних та паралельних алгоритмів, дослідженню їх ефективності, створенню та відлагодженню векторного, паралельного та розподіленого програмного забезпечення для високопродуктивних векторних, паралельних та розподілених комп’ютерних систем. У книзі розглядаються основні парадигми векторного, паралельного та розподіленого програмування: на основі обміну повідомленнями (MPI, PVM), багатопотокового програмування (OpenMP, POSIX Threads), GPGPU-програмування (OpenCL, Nvidia CUDA, OpenACC), базових технологій мережевого програмування (з’єднання на основі сокетів), розглядаються підходи до розв’язання прикладних задач на високопродуктивних обчислювальних системах.

Посібник адресовано студентам та аспірантам вищих навчальних закладів, зокрема тим, які навчаються за напрямками “Комп’ютерна інженерія”, «Комп’ютерні науки» та «Програмна інженерія», зокрема при вивченні курсів “Паралельні та розподілені обчислення” та “Технології розподілених систем та паралельних обчислень” відповідно до галузевих стандартів вищої освіти України.

ISBN 978-617-574-110-8

© Луцків А.М., Лупенко С.А., Пасічник В.В.  
© ПП “Магнолія 2006”, ФОП Марченко Т. В.

## Зміст

Передмова.....	8
Скорочення та аббревіатури.....	11
Частина 1 Вступ у паралельні та розподілені обчислення.....	13
Розділ 1. Поняття обчислювальної складності алгоритму.....	14
Розділ 2. Приклади ресурсоемних обчислювальних задач.....	20
2.1. Імітаційне моделювання технічних систем різного призначення.....	20
2.2. Прогнозування клімату та погоди.....	21
2.3. Хімія та фармакологія.....	23
2.4. Молекулярна динаміка та генетика.....	24
2.5. Опрацювання зображень.....	25
2.6. Керування системами високої готовності.....	26
2.7. Задачі опрацювання надвеликих обсягів даних (Data Mining).....	26
2.8. Криптоаналіз.....	27
Розділ 3. Основні поняття та загальні підходи до організації високопродуктивних обчислень у ПРКС.....	29
3.1. Векторні комп'ютери та векторні обчислення.....	29
3.2. Паралельні комп'ютери.....	35
Розділ 4. Основні поняття паралелізму і векторизації.....	40
4.1. Основні числові міри паралелізму.....	40
4.1.1. Ступінь паралелізму алгоритму.....	40
4.1.2. Прискорення паралельного алгоритму.....	42
4.1.3. Ефективність паралельного алгоритму.....	43
4.1.4. Масштабовність паралельного алгоритму.....	49
4.2. Основні числові міри векторизації.....	50
4.3. Особливості паралельно-векторних комп'ютерів.....	52
4.4. Узгодженість алгоритмів.....	53
4.5. Рекурсивне подвоєння.....	53
4.6. Аналіз потоків даних.....	55
Розділ 5. Розпаралелення обчислювальних задач.....	57
5.1. Види декомпозиції обчислювальних задач.....	58
5.2. Проста декомпозиція.....	59
5.3. Функціональна декомпозиція.....	59
5.4. Декомпозиція даних.....	61
Запитання та завдання для самоконтролю до частини 1.....	67
Частина 2 Апаратне забезпечення паралельних та розподілених комп'ютерних систем.....	69
Розділ 6. Типові способи оптимізації виконання програмного коду на апаратному забезпеченні.....	70
6.1. Конвеєрна обробка команд.....	70
6.2. Суперскалярна обробка команд.....	73

---

6.3. VLIW-процесори.....	74
6.4. Матричні процесори.....	75
6.5. Використання спеціалізованих векторних реєстрів.....	77
6.6. Прямий доступ до пам'яті.....	82
Розділ 7. Архітектури високопродуктивних обчислювальних систем.....	84
7.1. Класифікації обчислювальних систем.....	84
7.2. SMP-системи.....	89
7.3. NUMA-системи.....	91
7.4. ccNUMA-системи.....	92
7.5. COMA-системи.....	93
7.6. MPP-системи.....	93
7.7. Кластерні системи.....	95
7.7.1. Високошвидкісні кластери.....	97
7.7.2. Високонадійні кластери.....	98
7.8. PVP-системи.....	101
7.9. Технологія GPGPU.....	101
7.10. Процесори CELL.....	108
7.11. Системи на базі спеціалізованих мікросхем.....	111
7.12. Грід-обчислення.....	114
7.13. Хмарні обчислення.....	120
Розділ 8. Організація спільного доступу до пам'яті в ПРКС.....	122
Розділ 9. Топології високопродуктивних обчислювальних систем.....	126
9.1. Топологія “спільна шина”.....	126
9.2. Мережі з координатною комутацією.....	127
9.3. Багатоступінчаті мережі.....	128
9.4. Мережі з топологією гіперкуба.....	130
9.5. Мережі з комірчатою топологією.....	132
9.6. Мережі з деревоподібною топологією.....	133
9.7. Мережа з кільцевою топологією.....	134
9.8. Критерії вибору топології.....	135
9.9. Порівняння мереж комірчатої й кільцевої структур.....	136
9.10. Мережі змішаної топології.....	139
Розділ 10. Комунікаційні технології високопродуктивних систем.....	140
10.1. Технологія Ethernet.....	143
10.2. Технологія Myrinet.....	144
10.3. Технологія SCI.....	147
10.4. Технологія Quadrics QsNet.....	151
10.5. Технологія cLAN.....	152
10.6. Технологія InfiniBand.....	153
10.7. Інші спеціалізовані комунікаційні технології.....	161
Розділ 11. Системи зберігання даних для організації високопродуктивних обчислень.....	162
11.1. Загальні підходи до організації систем зберігання даних у ПРКС.....	162

---

11.2.Компоненти систем зберігання даних.....	164
11.3.Мережеві та розподілені файлові системи.....	166
11.4.Системи зберігання даних, що оптимізовані для паралельного та розподіленого опрацювання даних.....	171
Розділ 12. Оцінювання продуктивності ПРКС.....	176
12.1.Оцінювання продуктивності комп'ютерних систем.....	176
12.2.Оцінювання продуктивності мережевих та розподілених файлових систем.....	182
Запитання та завдання для самоконтролю до частини 2.....	184
Частина 3 Системне ПЗ ПРКС: ОС та утиліти.....	186
Розділ 13. Операційні системи паралельних та розподілених комп'ютерних систем.....	187
13.1.Операційна система ALT Linux Skif.....	187
13.2.Операційна система CentOS.....	189
13.3.Microsoft Windows 2008 Server R2 (HPC).....	190
Розділ 14. Утиліти та сервіси забезпечення підтримки роботи ПРКС.....	205
14.1.Програмне забезпечення для розгортання кластера.....	206
14.2.Програмне забезпечення для керування обчислювальним кластером та виконуваними задачами.....	213
14.2.1.СКР Slurm.....	215
14.2.2.СКР TORQUE.....	222
14.3.Програмне забезпечення для моніторингу роботи кластера.....	232
14.4.Особливості організації обчислювальних кластерних та метакластерних систем.....	235
14.5.Тестування працездатності і продуктивності кластерної системи.....	235
14.6.Засоби для роботи користувача з кластерними та метакластерними системами.....	240
Запитання та завдання для самоконтролю до частини 3.....	245
Частина 4 Системне ПЗ ПРКС: засоби розробки загального призначення.....	246
Розділ 15. Моделі паралельного та розподіленого програмування.....	248
Розділ 16. Основні поняття паралельного та розподіленого програмування....	252
Розділ 17. Виконання процесів у ПРКС.....	259
Розділ 18. Засоби розробки паралельного та розподіленого ПЗ.....	265
Розділ 19. Створення багатопроцесних програм у середовищі ОС Linux.....	268
Розділ 20. Створення багатопотокових програм у середовищі ОС Linux.....	284
Розділ 21. З'єднання на основі сокетів.....	296
Розділ 22. Технологія віддаленого виклику процедур.....	312
22.1.Реалізація технології RPC на мові C в UNIX.....	315
22.2.Технологія JAVA RMI.....	322
22.3.Технологія CORBA.....	325
22.4.Розподілені технології Microsoft.....	329
22.5.Технології XML-RPC, SOAP та інші XML-базовані.....	329
Запитання та завдання для самоконтролю до частини 4.....	337

---

Частина 5 Системне ПЗ ПРКС: засоби розробки спеціального призначення....	339
Розділ 23. Технологія MPI.....	340
23.1.Встановлення MPI в середовищі ОС Linux.....	340
23.2.Встановлення MPI в середовищі ОС MS Windows XP/Vista/7.....	343
23.3.Основні принципи MPI.....	348
23.4.Структура MPI-програми.....	351
23.5.Точкові операції.....	353
23.6.Колективна взаємодія процесів.....	365
23.7.Групи і комунікатори.....	374
23.8.Віртуальні топології.....	378
23.9.Пересилання різнотипних даних.....	382
23.10.Поєднання технології MPI та PosixThreads.....	390
Розділ 24. Технологія PVM.....	391
24.1.Базові принципи PVM.....	391
24.2.Середовище виконання програм PVM.....	397
24.3.Концепції розробки програм для PVM.....	401
24.4.Технологія розробки програм для PVM.....	403
Розділ 25. Технологія р4.....	414
Розділ 26. Технологія програмування систем зі спільною пам'яттю OpenMP...	415
26.1.Основні конструкції технології OpenMP.....	420
26.1.1.Властивості середовища виконання OpenMP.....	421
26.1.2.Бібліотечні функції OpenMP.....	423
26.1.3.Директиви препроцесора #pragma.....	428
26.2.Основні принципи технології OpenMP.....	430
26.2.1.Створення паралельних ділянок.....	430
26.2.2.Розподіл роботи.....	432
26.2.3.Синхронізація роботи потоків.....	438
26.2.4.Опис та розподіл даних.....	446
26.3.Особливості виконання програм з OpenMP.....	452
Розділ 27. Технології програмування GPGPU.....	456
Розділ 28. Технологія програмування графічних процесорів Nvidia CUDA....	459
28.1.Модель програмування.....	460
28.1.1.Синтаксичні конструкції (розширення мови C).....	468
28.1.2.Базові принципи роботи з CUDA API.....	472
28.2.Бібліотеки Nvidia CUDA.....	477
28.3.Модель пам'яті у технології CUDA.....	479
28.4.Оптимізація роботи CUDA-програм.....	484
28.4.1.Вирівнювання розмірів типів даних.....	484
28.4.2.Об'єднані запити до пам'яті.....	485
28.4.3.Оптимізація роботи зі спільною пам'яттю.....	489
28.4.4.Математичні функції.....	492
28.4.5.Використання потоків.....	493
28.4.6.Оптимізація розгалужень у коді програми.....	495

---

28.4.7.Зайнятість мультипроцесора.....	496
28.4.8.Використання CUDA-профайлера.....	496
28.4.9.Використання відлагоджувачів і RTX-асемблера.....	499
28.5.Робота з багатьма пристроями.....	499
28.5.1.Отримання інформації про наявні GPU та вибір пристрою.....	499
28.5.2.Єдиний адресний простір.....	500
28.5.3.Декомпозиція області опрацьовуваних даних.....	502
28.5.4.Використання технологій OpenMP та MPI.....	504
Розділ 29. Технологія AMD APP SDK.....	505
Розділ 30. Технологія OpenCL.....	507
30.1.Засоби розробки OpenCL-програм.....	507
30.2.Основні конструкції та принципи роботи OpenCL.....	510
30.2.1.Типи паралелізму в OpenCL.....	511
30.2.2.Керування порядком виконання завдань.....	513
30.2.3.Модель пам'яті OpenCL.....	514
30.2.4.Ідентифікатори потоків (OpenCL-ядер).....	518
30.2.5.Типи даних в OpenCL.....	519
30.2.6.Розширення та макроси мови OpenCL.....	522
30.2.7.Бібліотечні функції OpenCL.....	523
30.2.8.Операції порівняння.....	527
30.3.Приклад простої програми з використанням OpenCL.....	528
30.4.Робота з графічними об'єктами в OpenCL.....	535
Розділ 31. Технологія OpenACC.....	539
31.1.Змінні середовища OpenACC.....	539
31.2.Директиви компілятора OpenACC.....	540
31.3.Набір функцій OpenACC.....	544
Розділ 32. SSI-системи.....	546
32.1.Система OpenMosix.....	548
32.2.Система Kerrighed.....	548
32.3.Система OpenSSI.....	550
Запитання та завдання для самоконтролю до частини 5.....	552
Запитання та завдання для самоконтролю до розділу 23.....	552
Запитання та завдання для самоконтролю до розділу 24.....	554
Запитання та завдання для самоконтролю до розділу 26.....	554
Запитання та завдання для самоконтролю до розділу 28.....	555
Запитання та завдання для самоконтролю до розділу 30.....	556
Запитання та завдання для самоконтролю до розділу 31.....	558
Запитання та завдання для самоконтролю до розділу 32.....	558
Перелік посилань.....	559

А. Луцків, С. Лупенко, В. Пасічник

# Паралельні та розподілені обчислення

Навчальний посібник

Формат 70x100/16. Папір друк. №2.  
Гарнітура Times New Roman  
Умовн. друк. арк. 45,99

ПП “Магнолія 2006”  
Львів-53, 79053, Україна, тел.+380503701957  
e-mail: magnol06@ukr.net

Свідоцтво про внесення суб’єкта видавничої справи  
до Державного реєстру видавців, виготівників і  
розповсюджувачів видавничої продукції:  
серія ДК № 2534 від 21.06.2006 року,  
видане Державним комітетом інформаційної політики,  
телебачення та радіомовлення України

Видавець Марченко Т. В.  
Свідоцтво про внесення суб’єкта видавничої справи  
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і  
розповсюджувачів видавничої продукції:  
серія ДК № 6784 від 30.05.2019 року,  
видане Державним комітетом інформаційної політики,  
телебачення та радіомовлення України

Надруковано у друкарні видавця ФОП Марченко Т. В.