

УДК 681.3, 621.3

А.О. Мельник, В.А. Голембо, О.Ю. Бочкар'юв  
Національний університет "Львівська політехніка",  
кафедра "Електронні обчислювальні машини"

## НОВІ ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ВИМІРЮВАЛЬНО- ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ МЕРЕЖ НА ОСНОВІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ АГЕНТІВ

© Мельник А.О., Голембо В.А., Бочкар'юв О.Ю., 2003

**Розглянуто актуальне питання побудови конфігурованих вимірювально-обчислювальних мереж на основі інтелектуальних автономних агентів, призначених для вирішення задач моніторингу та дослідження екологічних процесів навколишнього середовища.**

**Actual problem of designing configurable sensos networks based on intelligent autonomous agents for solving tasks of environmental ecological process monitoring and research is considered.**

### 1. ВСТУП

Останнім часом все більшої актуальності набуває питання побудови конфігурованих вимірювально-обчислювальних мереж (ВОМ) інтелектуальних автономних агентів, призначених для вирішення задач моніторингу та дослідження екологічних процесів навколишнього середовища [1,2,3,4,5]. Обговорюються нові принципи, на основі яких ми пропонуємо вирішувати це питання. Ці принципи передбачають розробку та дослідження нових способів використання ресурсу децентралізованого управління (колективна поведінка інтелектуальних автономних агентів) [6,7,8] та нових технологій проектування комп'ютерних пристроїв (конфігуровані ядра комп'ютерних пристроїв) [9,10,11,12,13,14]. Використання цих принципів дозволить піднести моніторинг навколишнього середовища на новий якісний рівень, який передбачає самоорганізацію інтелектуальних автономних агентів для збирання просторово-розподіленої інформації з більшою достовірністю та оперативністю, включаючи обробку великих масивів даних в реальному часі. Підхід до побудови конфігурованих ВОМ, що ґрунтується на запропонованих принципах, поєднує нові алгоритми колективної поведінки (моделі колективної поведінки інтелектуальних автономних агентів), нові можливості реалізації цих алгоритмів у вигляді спеціалізованих обчислювальних структур (проектування ядер комп'ютерних пристроїв) та нові можливості організації інформаційних зв'язків з достатньою пропускну здатністю та необхідним рівнем захищеності (мережеві технології та захист інформації). Узгодженість та збалансованість цих трьох складових дозволяє отримувати фундаментальні результати, які можна широко використовувати для побудови ВОМ довільного, зокрема промислового і військового застосування. Нові принципи побудови ВОМ, що розглядаються у статті, містять нові принципи колективної поведінки мережі інтелектуальних автономних агентів та нові принципи реалізації алгоритмів їх самоорганізації у вигляді конфігурованих ядер комп'ютерних пристроїв. З практичної точки зору, використання запропонованих принципів дозволить створювати ВОМ на рівні світових аналогів, які будуть мати унікальні можливості щодо моніторингу та дослідження екологічних процесів.

## 2. МЕТА І ОСНОВНІ ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

Метою досліджень є розробка теоретичних принципів побудови та функціонування конфігурованих вимірювально-обчислювальних мереж інтелектуальних автономних агентів, які б дозволили підняти моніторинг навколишнього середовища на новий якісний рівень. Цього планується досягти вдосконаленням принципів самоорганізації мережі інтелектуальних автономних агентів стосовно досліджуваних ними процесів навколишнього середовища [7] та подальшої розробки принципів проектування конфігурованих ядер комп'ютерних пристроїв [10], які б зробили можливим втілення розроблених принципів самоорганізації у реальні вимірювально-обчислювальні мережі.

Внаслідок досягнення поставленої мети з'явиться можливість самостійного вирішення колективом інтелектуальних автономних агентів наперед невідомих задач моніторингу навколишнього середовища в реальному масштабі часу (цілеспрямоване ефективне реагування на непередбачувані зміни у навколишньому середовищі). До основних типів таких задач можна віднести: автономні довготривалі багатофакторні експериментальні дослідження синергетичних процесів навколишнього середовища (наприклад, процесів відновлення екологічної рівноваги); автономне виявлення та попередня оцінка небезпечності джерел забруднення навколишнього середовища (наприклад, джерел радіаційного чи хімічного забруднення); виявлення, локалізація та маркування забруднених областей навколишнього середовища (наприклад, нафтових плям) та ін. Основними критеріями якості вирішення цих задач, які беруть до уваги, є збільшення кількості інформації, отриманої про об'єкт дослідження (наприклад, підвищення точності інформаційного портрета досліджуваного об'єкта [15]) та зменшення вартості моніторингу (наприклад, зменшення часу отримання інформаційного портрета досліджуваного об'єкта [15] або зменшення кількості просторових кроків інтелектуальних автономних агентів – зменшення енерговитрат на роботу мережі).

Основні завдання досліджень полягають у:

- створенні та дослідженні нових моделей колективної поведінки інтелектуальних автономних агентів, спрямованої на збирання та попередню обробку великих масивів просторово-розподілених вимірювальних даних та вдосконаленні принципів самоорганізації узгоджених дослідницьких дій інтелектуальних автономних агентів у межах цих моделей;
- розвитку концепції конфігурування моделей програмованих та апаратно-орієнтованих комп'ютерних пристроїв, а також методик та засобів проектування ядер комп'ютерних пристроїв, які б дозволили суттєво спростити та прискорити проектування вимірювально-обчислювальних мереж інтелектуальних автономних агентів;
- розробці методів організації захищених швидкісних каналів зв'язку між інтелектуальними автономними агентами вимірювально-обчислювальної мережі, виходячи зі специфіки автономного довготривалого моніторингу навколишнього середовища (наприклад, з врахуванням можливості тимчасової втрати інформаційної зв'язності окремих частин вимірювально-обчислювальної мережі), а також із врахуванням специфіки застосування (наприклад, використання криптографічного захисту у випадках, коли розголошення інформації, здобутої вимірювально-обчислювальною мережею, є небажаним).

### 3. СТАН ПРОБЛЕМИ

Дослідження поведінки однорідних та різнорідних колективів інтелектуальних автономних агентів, охоплених мережею динамічно змінних локальних інформаційних зв'язків, є одним з найбільш перспективних напрямків теорії багатоагентних систем (multi-agent systems) або теорії колективної поведінки, яка сьогодні знаходиться в стані бурхливого розвитку [16,17,18]. Одночасно в декількох провідних наукових групах, які займаються проблематикою розподілених вимірювально-обчислювальних систем, виникла ідея застосувати технології теорії колективної поведінки для побудови нового класу розподілених вимірювально-обчислювальних мереж, в основу яких покладено концепцію інтелектуального автономного агента, якому делегується деяка частина повноважень щодо прийняття рішень про дії всієї системи і який володіє деякою обмеженою ініціативою щодо вибору та реалізації власних індивідуальних дій [2,3,19,20]. У цьому випадку в ролі інтелектуального автономного агента, як правило, виступають мобільні або стаціонарні автономні дослідницькі станції (наземні, надводні, підводні, повітряні, космічні).

З іншого боку, суттєве погіршення екологічного стану довкілля вимагає більш глибокого та комплексного дослідження екологічних процесів, яке є неможливим без відповідних вимірювально-обчислювальних інструментів. Особливо гострою є проблема розробки інтелектуальних інструментів автономного довготривалого моніторингу навколишнього середовища в реальному часі [3,4,6] як одного з основних джерел оперативної та достовірної інформації про стан навколишнього середовища. Так, наприклад, у Вірджинському політехнічному інституті та Державному університеті (Virginia Polytechnic Institute and State University, США) при підтримці Американського національного наукового фонду та Дослідницького агентства ВМФ США розробляється вимірювально-обчислювальна мережа автономних підводних апаратів, головним завданням якої буде екологічний моніторинг прибережних вод східного узбережжя США [21]. Схожі задачі при підтримці Оборонного агентства перспективних дослідницьких проектів (DARPA, Defense Advanced Research Projects Agency, США) вирішують дослідники фірми Nekton Research [22]. Створювана ними вимірювально-обчислювальна мережа автономних підводних апаратів буде здатна охоплювати великі тривимірні об'єми водних мас з метою збору океанологічної, екологічної та військової інформації. Ще в одній програмі досліджень, яка проводиться під егідою DARPA і має назву "Програмне забезпечення для розподілених робототехнічних систем" (SDR, Software for Distributed Robotics), в першу чергу вирішуються питання збирання інформації колективом автономних мобільних роботів, охоплених мережею безпроводного зв'язку [23]. Участь в цій програмі беруть сім компаній, університетів та національних лабораторій, які пройшли жорсткий конкурсний відбір. Серед них: Carnegie Mellon University (Pittsburgh), Idaho National Engineering and Environmental Laboratory (Idaho Falls, Idaho), Sandia National Laboratories (Albuquerque, N.M.), University of Massachusetts (Amherst, Mass.) та інші. Питаннями побудови та функціонування вимірювально-обчислювальних мереж інтелектуальних автономних агентів також активно займаються групи дослідників з Центру цільових досліджень Національного космічного агентства (NASA Ames Research Center, США), Массачусетського технологічного інституту (Massachusetts Institute of Technology, США), Каліфорнійського університету в Берклі (University of California, Berkeley, США), Кіотського університету (Kyoto University, Японія), Австралійського національного університету (Australian National University) та ін.

#### 4. ВИХІДНІ ІДЕЇ, ФАКТИ ТА ГІПОТЕЗИ

У межах подальшого розвитку концепції про схожість природи об'єкта дослідження (синергетичні прояви навколишнього середовища) та інструменту дослідження (конфігурована вимірювально-обчислювальна мережа) [6,7,8], яка полягає у здатності такої вимірювально-обчислювальної мережі до самоорганізації, розглядається такий сценарій подій. У деякому просторі розміщується колектив інтелектуальних автономних агентів, здатних самостійно приймати і реалізовувати локальні (індивідуальні) рішення (наприклад, про напрямок та швидкість свого руху або генерування зондуючого імпульсу). Колектив агентів здатний працювати цілеспрямовано та ефективно без центрального органу управління за рахунок використання ресурсу повністю або частково децентралізованого управління (теорія колективної поведінки, алгоритми самоорганізації узгоджених дій). Перед колективом ставиться завдання самостійно знаходити та застосовувати найкращі за низкою критеріїв розв'язки поставлених перед ними задач моніторингу навколишнього середовища. Тобто досліджуються не конкретні розв'язки, а методи знаходження цих розв'язків колективом інтелектуальних автономних агентів (самоорганізація).

Людина-дослідник вимірювально-обчислювальної мережі здатна знайти деякий загальний розв'язок, який буде більш-менш ефективно працювати на наборі різних, але однотипних задач. Проблема полягає в тому, що цей дослідник не володіє повною інформацією про умови кожної конкретної задачі, внаслідок чого не може досягнути ефективності рішення, більшої ніж деяке фіксоване значення, що відповідає рівню нестачі інформації про конкретну задачу (його можна вирахувати, користуючись відповідним математичним апаратом). При цьому дослідник не може подолати цю нестачу інформації, якщо мова йде про задачі автономного довготривалого моніторингу навколишнього середовища в реальному часі.

Тому є доцільним використання штучних дослідників (інтелектуальних автономних агентів), які знаходяться безпосередньо в процесі вирішення конкретної задачі і мають можливість зменшувати рівень нестачі інформації про неї в реальному масштабі часу. Порівняно з людиною-дослідником деякого загального ("універсального") розв'язку, колектив агентів знаходиться у виграшному стані, оскільки може цілеспрямовано зменшувати рівень нестачі інформації про конкретну задачу і, володіючи методикою знаходження розв'язків, знаходити близький до найкращого ("спеціалізований") розв'язок цієї задачі. У цьому випадку колектив обмежений лише швидкістю, з якою він долає нестачу інформації про конкретну задачу. Чим швидше він це робить, тим ефективніший знайдений ним розв'язок порівняно з розв'язком, що знайдений людиною. Методи найшвидшого подолання цієї нестачі інформації є одним з ключових елементів в алгоритмах самоорганізації, які є предметом досліджень.

З точки зору обчислювальної техніки розглянутий підхід вимагає складної реалізації окремого агента із застосуванням передових технологій мікропроцесорної техніки та технологій її проектування. Обчислювальна складність агента опосередковано обмежує рівень його інтелектуальності, зокрема, згадану вище швидкість подолання нестачі інформації про задачу, яку вирішує колектив. Виникає проблема втілення розроблених принципів самоорганізації в апаратні та програмно-апаратні засоби вимірювально-обчислювальних мереж.

Розробка вимірювально-обчислювальної мережі інтелектуальних автономних агентів, яка б могла самостійно розв'язувати складні задачі, якщо провадити її звичайним загальновідомим шляхом, може розтягнутись на довгі роки і до того ж не гарантує позитивного результату. Іншими словами, без відповідних засобів самоорганізації та методів їх швидкої і надійної розробки і конфігурування не можна вести розмову і про самоорганізацію. Вирішити цю проблему покликана нова технологія проектування ядер

комп'ютерних пристроїв та запропонована концепція конфігурування моделей програмованих та апаратно-орієнтованих комп'ютерних пристроїв. Завдяки використанню методів та засобів проектування ядер комп'ютерних пристроїв, розроблених у межах цієї концепції, стає можливим суттєве спрощення та прискорення процесу проектування, практично виключається можливість помилок та досягаються високі рівні інтеграції. При цьому за рахунок властивості конфігурування з'являється можливість розробляти необхідні засоби самоорганізації для найширшого спектра застосувань вимірювально-обчислювальних мереж.

## 5. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Результатом досліджень є нові принципи побудови та функціонування конфігурованих вимірювально-обчислювальних мереж інтелектуальних автономних агентів, зокрема:

1. Нові методи самоорганізації інтелектуальних автономних агентів у межах розроблених та досліджених моделей їх колективної поведінки [6,7,8];

2. Нові методи та засоби проектування конфігурованих ядер комп'ютерних пристроїв [10,11,12,13,14];

3. Нові методи організації захищених швидкісних каналів зв'язку між інтелектуальними автономними агентами вимірювально-обчислювальної мережі [5,24].

На основі розроблених принципів побудови та функціонування конфігурованих вимірювально-обчислювальних мереж стане можливим створювати системи автономного довготривалого моніторингу за навколишнім середовищем, які будуть володіти новими унікальними властивостями, зокрема мобільні безпроводні вимірювально-обчислювальні мережі (mobile wireless sensor nets) інтелектуальних автономних агентів. Серед нових властивостей можна виділити такі:

- вимірювально-обчислювальна мережа інтелектуальних автономних агентів буде здатна самостійно виявляти нові задачі моніторингу навколишнього середовища (наприклад, задачі, пов'язані з появою нових джерел забруднення навколишнього середовища, або задачі, пов'язані з зародженням, розгортанням та згоранням нового синергетичного процесу в навколишньому середовищі);

- вимірювально-обчислювальна мережа інтелектуальних автономних агентів буде здатна знаходити та застосовувати високоефективні розв'язання виявлених задач шляхом самоорганізації узгоджених колективних дій та цілеспрямованого подолання нестачі інформації про виявлену задачу (наприклад, швидко локалізувати нове джерело забруднення та встановити границі і значення необхідних параметрів забрудненої території);

- буде реалізовано можливість швидкої та надійної побудови вимірювально-обчислювальної мережі інтелектуальних агентів за рахунок використання нової технології проектування ядер комп'ютерних пристроїв;

- з'явиться можливість легко конфігурувати розроблену вимірювально-обчислювальну мережу на виконання широкого класу задач моніторингу навколишнього середовища за рахунок розвитку концепції конфігурування моделей апаратно-орієнтованих комп'ютерних пристроїв;

- стане можливою організація захищених швидкісних каналів зв'язку між інтелектуальними автономними агентами вимірювально-обчислювальної мережі та між вимірювально-обчислювальною мережею і користувачами системи моніторингу навколишнього середовища.

Результати досліджень відповідають світовому рівню, про що свідчить незавершеність, а в багатьох випадках початковий стан аналогічних досліджень у провідних закордонних наукових установах. Одна з основних відмінностей проекту від світових аналогів полягає у комплексному підході до вирішення вищезазначених проблем, який

охоплює та систематизує всі основні рівні та напрямки необхідних досліджень. Такий підхід дозволяє знаходити фундаментальні універсальні рішення, які виходять за межі вузькоспеціалізованих підходів та дозволяють поширювати їх на більш широкий клас складних систем без суттєвих змін.

## 6. ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Очікувані результати можуть бути використані для створення конфігурованих вимірювально-обчислювальних мереж моніторингу навколишнього середовища на базі наявних у замовника засобів обчислювальної техніки, засобів зв'язку та робототехнічних засобів, зокрема наявних платформ мобільних автономних дослідницьких станцій (колесних роботів, автономних підводних апаратів, беспілотних літальних апаратів тощо). Внаслідок децентралізованої архітектури та властивості конфігурованості процес впровадження вимірювально-обчислювальних мереж інтелектуальних автономних агентів значно спрощується і полягає лише у встановленні на наявних засобах замовника програмної або програмно-апаратної реалізації інтелектуальних автономних агентів та налагодження їх взаємозв'язку з використанням можливостей наявних засобів мережевого зв'язку. Окремі вимірювально-обчислювальні мережі моніторингу навколишнього середовища можуть бути об'єднані у єдину глобальну мережу моніторингу навколишнього середовища України та прилеглих регіонів.

## 7. ВИСНОВКИ

Розглянуто актуальне питання побудови конфігурованих вимірювально-обчислювальних мереж інтелектуальних автономних агентів, призначених для вирішення задач моніторингу та дослідження екологічних процесів навколишнього середовища. Обґрунтовано необхідність дослідження нових способів використання ресурсу децентралізованого управління (колективна поведінка інтелектуальних автономних агентів) та нових технологій проектування комп'ютерних пристроїв (конфігуровані та параметризовані ядра комп'ютерних пристроїв) для піднесення моніторингу навколишнього середовища на новий якісний рівень, який передбачає самоорганізацію інтелектуальних автономних агентів для збирання просторово-розподіленої інформації з більшою достовірністю та оперативністю, включаючи обробку великих масивів даних в реальному часі.

Новий підхід до побудови конфігурованих ВОМ ґрунтується на поєднанні нових алгоритмів колективної поведінки (моделі колективної поведінки інтелектуальних автономних агентів), нових можливостей їх реалізації у вигляді спеціалізованих обчислювальних структур (проектування ядер комп'ютерних пристроїв) та нових можливостей організації інформаційних зв'язків з достатньою пропускну здатністю та необхідним рівнем захищеності (мережеві технології та захист інформації). Узгодженість та збалансованість цих трьох складових дозволяє отримувати фундаментальні результати, які можна широко використовувати для побудови ВОМ довільного, зокрема й промислового і військового застосування.

1. Sameer Tilak, Nael B. Abu-Ghazaleh and Wendi Heinzelman, *A taxonomy of Wireless Micro-Sensor Network Models*, *ACM Mobile Computing and Communications Review (MC2R)*, Volume 6, Number 2, April 2002. 2. A. LaMarca, D. Koizumi, M. Lease, S. Sigurdsson, G. Borriello, W. Brunette, K. Sikorski, D. Fox, *Making Sensor Networks Practical with Robots*, *Intel Research, IRS-TR-02-004*, Jul. 22, 2002. 3. Turner R. M. and Turner E. H. *Organization and reorganization of autonomous oceanographic sampling networks*, *Proceedings of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Leuven, Belgium, May 1998*, pp. 2060-7. 4. Curtin T. B., Bellingham J. G., Catipovic J., and Webb D. *Autonomous oceanographic sampling networks*, *Oceanography*, Vol. 6, № 3, pp. 86–94, 1993. 5. Голембо В.А., Зоря Д.І., Котлярів В.Л.

- Організація підсистеми екологічного моніторингу в локальній мережі // Вісник НУ “Львівська політехніка”. – 2001. – № 437. – С.49–54. 6. Бочкарьов О.Ю., Голембо В.А. Система розподілених контактних вимірювань на основі автономних мобільних інтелектуальних агентів // Вісник НУ “Львівська політехніка”. – 2001. – № 437. – С.14–20. 7. Бочкарьов О.Ю., Голембо В.А. Моделі колективної поведінки вимірювальних агентів // Вісник НУ “Львівська політехніка”. – Львів, 2002. № 463. – с.19–27. 8. Botchkariov A., Golemba V., Lysak T. Self-organization of collective of mobile intelligent sensor network agents // Proceedings of the VII International Conference “The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics” (CADSM’2003), 18–22 February, Lviv-Slavske, 2003. – P.208. 9. Мельник А.О. Програмовані процесори обробки сигналів. – Львів, Видавництво Національного університету “Львівська політехніка”, 2000. – 55с. 10. Мельник А.О., Мельник В.А. Технологія проектування ядер комп’ютерних пристроїв // Вісник НУ “Львівська політехніка”. – 2002. – №463. – С.3–8. 11. Дунець Б.Р., Мельник А.О. Дослідження характеристик контролера доступу до багатоблокової пам’яті // Вісник НУ “Львівська політехніка”. – 2002. – №463. – С.46–51. 12. Мельник А.О., Ахмад Аль-Кхатіб. Процесорні ядра ортогональних перетворень на основі дискретного косинусного перетворення // Збірник праць наукового симпозиуму “Сучасні проблеми в комп’ютерних науках в Україні” (Contemporary Computing in Ukraine, CCU’2000), Львів-Славсько, 2000. – С.45–52. 13. Мельник А.О., Дунець Б.Р. Транслятор з SMP-опису алгоритму в VHDL-модель НВІС // Збірник праць наукового симпозиуму “Сучасні проблеми в комп’ютерних науках в Україні” (Contemporary Computing in Ukraine, CCU’2000), Львів-Славсько, 2000. – С.84–88. 14. Melnyk A., Dunets B. FFT Processor IP Cores synthesis on the base of configurable pipeline architecture // Proceedings of the VII International Conference “The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics” (CADSM’2003), 18–22 February, Lviv-Slavske, 2003. – P.211. 15. Темников Ф.Е., Афонин В.А., Дмитриев В.И. Теоретические основы информационной техники. – М.: Энергия, 1971. 16. Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence, by Gerhard Weiss (Editor), MIT Press, 2000. 17. Michael Woolridge, An Introduction to MultiAgent Systems, John Wiley & Sons, 2002. 18. Бочкарьов О.Ю. Вирішення задачі механічного врівноваження колективом мобільних агентів // Вісник НУ “Львівська політехніка”. – 2002. – №463. – С.14–18. 19. Sibley, G.T., Rahimi, M.H. and Sukhatme, G.S. Robomote: A Tiny Mobile Robot Platform for Large-Scale Sensor Networks, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2002. – pp. 1143–1148. 20. Jorge Cortes, Sonia Martinez, Timur Karatas, Francesco Bullo, Coverage control for mobile sensing networks: variations on a theme, Proceedings of the Mediterranean Conference on Control and Automation, July 9–13, 2002, Lisbon, Portugal. Electronic Proceedings. 21. Stilwell, D. J., Bishop, B., E., Platoons of underwater vehicles: Communication feedback, and decentralized control, Special issue on autonomous unmanned vehicles in the IEEE Control Systems Magazine, organizer, D. A. Schoenwald, Vol. 20, №. 6, pp. 45–52, 2001. 22. Witson J.R., New models of unmanned underwater vehicles are set for testing this year, Military&Aerospace Electronics, V.13, №.5/May 2002. – pp.7–8. 23. Keller John. Military scientists investigate networks of tiny robots for counter terrorism and special operations, Military&Aerospace Electronics, V.13, №.5/May 2002. – pp.1,5. 24. Мельник В.А., Коркішко Т.А., Мельник А.О., Байсіг Юрген, Порівняльний аналіз варіантів структурної організації процесора захисту інформації за алгоритмом DES // Збірник праць наукового симпозиуму “Сучасні проблеми в комп’ютерних науках в Україні” (Contemporary Computing in Ukraine, CCU’2000), Львів-Славсько, 2000. – С.100–109.