

## КОЛЕКТИВНА ПОВЕДІНКА МОБІЛЬНИХ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ АГЕНТІВ У ЗАДАЧАХ АВТОНОМНИХ РОЗПОДІЛЕНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

© Бочкарьов О.Ю., 2005

**Розглянуто проблему самоорганізації колективу мобільних вимірювальних агентів (дослідницьких станцій) в задачах автономних розподілених досліджень. Обґрунтована необхідність використання принципів самоорганізації для забезпечення якісного переходу на вищий рівень автономних досліджень (з погляду кількості та якості інформації, яку збирає колектив вимірювальних агентів про об'єкт дослідження).**

**The problem of self-organization of collective of mobile explorer stations (explorer agents) in the context of distributed exploration task is examined. The necessity of using self-organization principles for raising the autonomous explorations to the new level in the view of quality and quantity of gathered by explorer agents information is proved.**

**Вступ.** В роботі розглянуто проблему самоорганізації колективу мобільних вимірювальних агентів (дослідницьких станцій) в задачах автономних розподілених досліджень. Обґрунтована необхідність використання принципів самоорганізації для забезпечення якісного переходу на вищий рівень автономних досліджень (з погляду кількості та якості інформації, яку збирає колектив вимірювальних агентів про об'єкт дослідження). Наводиться огляд сучасного стану цієї проблеми, зокрема .

**Огляд сучасного стану проблеми.** Задача автономних розподілених досліджень [1, 2] стає все актуальнішою із зростанням можливостей із створення відповідних систем автономних довготермінових досліджень в інтересах різних наук (океанологія, метеорологія), вирішення екологічних проблем (екологічний моніторинг, виявлення та контроль забруднень довкілля), а також промислових та військових застосувань. Загальний сценарій розподілених контактних досліджень передбачає розміщення безпосередньо в просторі об'єкта дослідження деякої обмеженої кількості функціонально автономних вимірювачів, кожний з яких здатний збирати вимірювальну інформацію і передавати її в центр збирання та обробки (глобальний користувач). В іншому варіанті сценарію споживач вимірювальної інформації (локальний користувач) також міститься в просторі об'єкта дослідження і використовує цю інформацію, наприклад, для синтезу прямих керівних впливів на об'єкт. Залежно від можливостей вимірювачів і задач, що стоять перед ними, можна розрізняти системи різного рівня складності, починаючи від безпроводних сенсорних мереж і закінчуючи глобальними системами збирання гідрометеорологічних даних.

На окрему увагу заслуговують системи автономних довготермінових досліджень, в яких вимірювачі здатні переміщуватись в просторі об'єкта дослідження. Здатність до переміщення відкриває широкі можливості глибшого вивчення об'єкта, оскільки з'являється можливість керувати розміщенням і (або) переміщенням вимірювачів в просторі досліджуваного об'єкта. Як приклад таких систем можна навести мобільні безпроводні сенсорні мережі [3, 4] або автономні системи океанологічних досліджень [5, 6]. У такому разі носієм, який забезпечує можливість переміщувати вимірювач у просторі, можуть, наприклад, бути мобільний робот, безпілотний літальний апарат або автономний підводний апарат. Отже, можна говорити про мобільну автономну дослідницьку станцію, до складу якої, крім всього іншого, входять сенсорна система, система зв'язку та навігації, система переміщення, система енергозбереження та блок прийняття рішень. Надалі будемо

називати таку станцію мобільним вимірювальним агентом, а систему станцій, що одночасно функціонують, – колективом мобільних вимірювальних агентів.

**Постановка задачі автономних розподілених досліджень.** З функціонуванням систем автономних довготермінових досліджень на основі мобільних вимірювальних агентів пов'язана низка проблем [7]. Серед них можна виділити дві – найістотніші на наш погляд – проблеми. Перша проблема – проблема розміщення – викликана обмеженням на кількість вимірювальних агентів, що розміщуються в просторі об'єкта дослідження. Це обмеження є природним відображенням принципу мінімізації впливу вимірювального інструменту на об'єкт дослідження [8] і призводить до того, що в один момент часу можна отримати обмежену кількість інформації про цей об'єкт. Можна зробити припущення, що різним розміщенням вимірювальних агентів в просторі об'єкта досліджень відповідають різні з погляду кількості інформації відображення цього об'єкта. Внаслідок цього виникає проблема розміщення: як розмістити задану кількість вимірювальних агентів в просторі, щоб отримати найінформативніше у межах природних обмежень відображення досліджуваного об'єкта?

Друга проблема – проблема управління – викликана “віддаленістю” користувача (глобального або локального) від системи автономних довготермінових досліджень, що здебільшого, не дає можливості користувачу ефективно (точно і своєчасно) вирішувати проблему розміщення. Специфікою роботи систем автономних довготермінових досліджень є повна або часткова відсутність у користувача апіорних відомостей про характер досліджуваних процесів, що розгортаються в об'єкті. Тому ефективність тих рішень проблеми розміщення, які може запропонувати користувач, завжди буде обмежена деяким фіксованим значенням, яке відповідає рівню нестачі інформації про поточні умови розв'язання цієї проблеми. Повністю подолати цю нестачу інформації (невизначеність) користувач внаслідок своєї “віддаленості” не може. Отже, виникає проблема управління: як і наскільки передати “ініціативу” із вирішення проблеми розміщення самій системі автономних довготермінових досліджень?

**Розв'язання задачі на основі принципів самоорганізації.** Розглядаючи вказані проблеми разом, можна прийти до ідеї про прямий зв'язок між способом функціонування системи автономних досліджень і характеристиками тих процесів, що розгортаються в об'єкті досліджень. Іншими словами, можна вести мову про задачу розроблення такого інструменту досліджень, який би самостійно (проблема управління) знаходив найкращий згідно із заданою системою критеріїв спосіб дослідження цільового об'єкта (проблема розміщення). У найскладнішому варіанті цієї задачі процеси, які розгортаються в об'єкті дослідження, підпорядковуються законам нелінійної динаміки (тобто є синергетичними процесами). З урахуванням цього в [7] висунуто гіпотезу: якщо синергетичним процесам, що розгортаються в середовищі, поставити у відповідність можливості самоорганізації системи автономних довготермінових досліджень, то така опосередкована подібність об'єкта та інструменту дасть змогу підняти автономні дослідження на новий якісний рівень (з погляду кількості та якості отримуваної інформації).

З погляду можливостей підтвердити або спростувати цю гіпотезу, а також з урахуванням функціональної автономності окремої дослідницької станції (вимірювального агента) для розв'язання поставленої задачі найдоцільніше, на наш погляд, використовувати методи теорії колективної поведінки (багатоагентних систем) [9–11]. Цей вибір передовсім зумовлений тим, що у межах теорії колективної поведінки досліджується питання передачі “ініціативи” в прийнятті рішень автономним технічним системам (див. Визначення інтелектуального агента в [10]). Крім цього, у такому разі можна провести пряму аналогію між процесом самоорганізації системи автономних досліджень та виникненням складних форм колективної поведінки на основі сумісної реалізації порівняно простих поведінкових актів окремими вимірювальними агентами [9], тобто, іншими словами, розглядати функціональну емерджентність, де елементами системи (колективу) є вимірювальні агенти.

Отже, загальна задача полягає у розробці таких алгоритмів колективної поведінки вимірювальних агентів, які б дали змогу з'ясувати “порядок”, притаманний досліджуваним процесам, і, зважаючи на це, організували б таку колективну поведінку (спосіб функціонування системи), яка

б найкраще відповідала цьому “порядку”. Тобто у такому разі передбачається, що колектив вимірювальних агентів буде здатний асимілювати “порядок” середовища в такий спосіб, щоб колективна поведінка, яка виникає, відповідала найкращому способу дослідження цього середовища. До розроблених алгоритмів ставлять три основні вимоги: децентралізація (вимірювальні агенти самостійно приймають рішення в умовах відсутності єдиного центру управління), однорідність (всі вимірювальні агенти однакові з погляду алгоритмів індивідуальної поведінки) і локальність інформаційної взаємодії (вимірювальні агенти приймають рішення в умовах обмежень на обсяг та швидкість обміну інформацією між собою). Треба підкреслити, що виконання цих вимог гарантує високу надійність роботи системи автономних досліджень (передовсім з погляду її живучості). У такому разі система буде продовжувати виконувати свої функції доти, доки в її складі буде лишатися хоча б один працюючий вимірювальний агент. Зміна кількості вимірювальних агентів як у бік зменшення, так і у бік збільшення, не потребує ніяких спеціальних “зовнішніх” процедур, що коригують роботу системи. Водночас питання про залежність якості роботи системи від кількості вимірювальних агентів потребує дослідження.

**Алгоритми колективної поведінки мобільних вимірювальних агентів.** Основною проблемою під час розроблення алгоритмів колективної поведінки є перехід від загальної цільової функції колективу (багатоагентної системи) до індивідуальних цільових функцій окремих агентів [9, 10]. Універсальних узагальнених методів вирішення цієї проблеми нині немає. Внаслідок цього в кожному окремому випадку ця проблема вирішується із урахуванням специфіки тієї задачі, яка ставиться перед колективом (багатоагентною системою). У разі автономних розподілених досліджень є декілька важливих аспектів відповідної задачі, кожний з яких заслуговує окремого дослідження. З цією метою нами розроблено низку моделей колективної поведінки вимірювальних агентів [12], у межах яких пропонують розв’язання загальної задачі розроблення системи автономних розподілених досліджень. Запропоновані рішення базуються на теорії колективної поведінки автоматів, що навчаються, деяких методах теорії ігор та методах навчання з підкріпленням (reinforcement learning).

*Алгоритмічна модель.* У межах алгоритмічної моделі колективної поведінки мобільних вимірювальних агентів досліджується проблема децентралізації управління процесом вимірювання. Назва моделі відображає взаємозв’язок з алгоритмічною теорією вимірювань [13], в якій узагальнений алгоритм вимірювання подано як процес урівноваження вимірюваної величини за допомогою набору “вагових гирь” (модель зважування на терезах) і ставиться питання про синтез оптимального алгоритму вимірювання. У разі децентралізованого управління вимірюванням можливість централізовано маніпулювати “гирами” різної ваги відсутня. Іншими словами, ситуацію можна подати в такий спосіб, що вимірювану величину урівноважує колектив “вагових гирь”, кожна з яких може самостійно вибирати свою вагу в деякому заданому проміжку значень. Після кожного зважування “ваговим гирям” повідомляють результат (наприклад, більше, менше чи дорівнює), на основі якого вони мають вибрати свою вагу для наступного зважування.

В алгоритмічній моделі ця ситуація відображена у такий спосіб [14]. Розглядається деяка обмежена площа (наприклад, плаский диск) з однією точкою опори, яка суміщена з центром ваги цієї площини. На ній у випадковий спосіб розміщуються мобільні вимірювальні агенти, кожний з яких має одиничну вагу. В результаті цього розміщення площа нахилиться (її центр ваги зміститься). Перед колективом вимірювальних агентів ставиться задача знайти таке взаємне розміщення на площині, яке б повернуло її в горизонтальне положення (тобто знайти “урівноважувальне” розміщення, яке б сумістило новий центр ваги з точкою опори). У такому разі роль невизначеності замість невідомої “ваги” вимірюваної величини відіграють невідомі координати (положення) точки опори. У базовому варіанті алгоритмічної моделі усім вимірювальним агентам повідомляється значення поточного кута нахилу площини (або поточна різниця моментів). Задачу вважають розв’язаною, коли кут нахилу дорівнює нулю. Основним критерієм якості розв’язання задачі вибрано швидкість урівноваження з урахуванням початкового кута нахилу.

Основна проблема, з якою стикається кожний з агентів, що розв'язують цю задачу – це інтерпретація відгуку на свої дії [11]. Оскільки кут нахилу площини змінюється в результаті дії всіх агентів колективу, окремий агент, який не володіє повною інформацією про дії всіх інших агентів, не може зробити однозначного висновку про успішність своїх індивідуальних дій в попередніх тактах урівноваження (наприклад, дії агента можуть бути “правильними”, але за рахунок “неправильних” дій більшості інших агентів ситуація погіршиться і агент отримає негативний відгук на свої дії). Так невизначеність є прямим наслідком децентралізації управління, і вона тим більша, чим жорсткіші обмеження на інформаційну взаємодію вимірювальних агентів (тобто чим менше у агентів можливостей повідомляти один одному про свої дії). Отже, можна припустити, що найкращим алгоритмом колективного урівноваження є той алгоритм, який в найкращий спосіб усуває цю невизначеність. Зважаючи на це припущення, нами розроблено ряд алгоритмів колективної поведінки вимірювальних агентів, що розв'язують задачу урівноваження [14]. Алгоритми основані на ідеях навчання з підкріпленням та демонструють можливість успішної організації спільних колективних дій в умовах невизначеності, яка спричинена децентралізацією управління. В ході обчислювальних експериментів встановлено залежності показників ефективності розроблених алгоритмів від основних параметрів алгоритмічної моделі. До основних висновків можна зарахувати те, що із зростанням інформаційної зв'язності агентів швидкість урівноваження зростає, а із зростанням кількості агентів в колективі швидкість урівноваження падає.

*Інтерполяційна модель.* У межах інтерполяційної моделі колективної поведінки вимірювальних агентів досліджуються можливості вирішення проблеми розміщення вимірювальних агентів в просторі об'єкта дослідження (як різновид загальнішої проблеми знаходження найкращого способу дослідження об'єкта), а також способи її сумісного вирішення з проблемою управління [15]. В базовому варіанті моделі розглядається обмежена область простору, в якій реалізована деяка функція від часу та координат (далі функція середовища, яка може являє собою, наприклад, температурне поле). В цій області розміщується задана кількість мобільних вимірювальних агентів, кожний з яких може вимірювати значення функції в тій точці області, де він розміщений, і передавати його разом зі своїми координатами в центр збирання та обробки. В результаті таких дій всіх вимірювальних агентів в центрі будується зображення функції середовища за допомогою вибраного методу інтерполяції (звідси і назва моделі). У такому випадку вимірювальні агенти виступають в ролі вузлів інтерполяції, які можуть самостійно переміщуватись в обмеженій області значень аргументів функції середовища. Внаслідок обмеженої кількості агентів зображення завжди буде відрізнятися від функції середовища, і цю різницю можна оцінити з погляду зовнішнього спостерігача, використовуючи вибраний критерій розходжень (наприклад, найбільшого відхилення, середньоквадратичний або інтегральний [16]). Природно припустити, що для кожного конкретного випадку (для кожної функції середовища) існують такі розміщення вузлів інтерполяції, які дають глобальний мінімум вибраного критерію розбіжності. Отже, у межах інтерполяційної моделі можна досліджувати способи знаходження колективом вимірювальних агентів таких розміщень (статика) або способи організації сходимості переміщень вимірювальних агентів до таких розміщень (динаміка).

У межах теорії наближення функцій питання про існування і знаходження найкращих розміщень вузлів (базисів) інтерполяції переважно досліджено лише для функцій одного аргументу [17, 18]. Вже для функцій двох аргументів в цьому питанні багато незрозумілих моментів [17]. Водночас у такому разі як корисні для розв'язання поставленої задачі евристики можуть знайти застосування деякі методи обчислювальної геометрії та методи пошуку екстремумів функції (за аналогією зі способами активного сканування [1]). Нині нами розроблено ряд алгоритмів колективної поведінки вимірювальних агентів, що розв'язують задачу пошуку найкращого за вказаним критерієм базису [15]. Серед них можна виділити три групи. В першу групу входять порівняно прості “релаксаційні” алгоритми колективної поведінки, які відрізняються мінімальними вимогами до рівня інформаційної зв'язності вимірювальних агентів (наприклад, алгоритм “розміщення за Темніковим”, в якому використана ідея квантового критерію відліків для адаптивної дискретизації з некрatними інтервалами [16]). В другу групу входять алгоритми колективної поведінки, розроблені на основі S-перетворення базисів (алгоритм Вале-Пусена) і R-перетворення базисів (R-алгоритм)

[18] для випадку чебишовської інтерполяції (критерій найбільшого відхилення) функції одного аргумента. В третю групу входять порівняно складні алгоритми колективної поведінки, в яких використано низку евристик, згідно з якими, крім всього іншого, допускається функціональна спеціалізація вимірювальних агентів (формування взаємодоповнювальних груп стратегій). В алгоритмах другої і третьої груп реалізована ідея самоорганізації інструмента розподілених досліджень. В ході обчислювальних експериментів встановлено залежності показників ефективності розв'язання поставленої перед колективом задачі. Окремо можна відзначити достатньо успішні дії колективу (алгоритми другої і третьої групи) із дослідження синергетичних процесів.

*Ентропійна модель.* У межах ентропійної моделі колективної поведінки вимірювальних агентів безпосередньо досліджується взаємозв'язок самоорганізації колективу і кількості інформації про довкілля, яку він збирає [12]. В базовому варіанті моделі розглядається набір повністю або частково незалежних джерел подій з деякого обмеженого алфавіту, які охоплені довільним графом з'єднань. В першому наближенні вважають, що всі джерела стаціонарні. У вузлах цього графа (в кожному з яких знаходиться відповідне джерело подій) розміщується обмежена кількість мобільних вимірювальних агентів (передбачається, що кількість агентів набагато менша від кількості джерел подій (вузлів графа) і кожний агент може вільно пересуватися по графу). Кожний агент може визначити подію в тому джерелі, в якому він в поточний момент часу знаходиться, і разом з ідентифікатором ("координатами") джерела повідомляти про це центр збору та обробки. В результаті таких дій усіх агентів в центрі накопичується статистична інформація у вигляді ймовірностей реалізації різних подій у джерелах. Відповідно для статистичного портрета кожного джерела в центрі може бути розраховано значення його ентропії (з урахуванням того, що в початковий момент часу згідно з "принципами недостатнього обґрунтування" Лапласа для всіх статистичних портретів встановлюється максимальне значення ентропії). Отже, перед колективом вимірювальних агентів ставиться задача побудувати статистичний портрет усіх джерел подій. Як основний критерій якості розглядають швидкість розв'язання поставленої задачі.

Згідно з логікою ентропійної моделі агенту не вигідно знаходитись в джерелі подій, справжня ентропія якого максимальна, оскільки цей факт вже відображено в центрі, і нової інформації в загальний статистичний портрет у такому разі агент не привносить. Відповідно чим ближче справжня ентропія джерела до максимальної, тим менше часу має проводити в ньому агент. Проблема полягає в тому, що справжні ентропії джерел подій невідомі агентам заздалегідь. Нами розроблено декілька алгоритмів колективної поведінки вимірювальних агентів, які розв'язують задачу побудови статистичного портрета. Алгоритми основані на ідеї імовірного автомата та на ідеях навчання з підкріпленням. В результаті обчислювальних експериментів встановлено залежності між кількісною оцінкою самоорганізації та кількістю інформації, яку збирає колектив.

**Висновки.** В роботі розглянуто проблему самоорганізації колективу мобільних вимірювальних агентів (дослідницьких станцій) в задачах автономних розподілених досліджень. Обґрунтована необхідність у використанні принципів самоорганізації для забезпечення якісного переходу на вищий рівень автономних досліджень (з погляду кількості та якості інформації, яку збирає колектив вимірювальних агентів про об'єкт дослідження). Розглянуто три моделі колективної поведінки, в яких розкрита проблематика автономних розподілених досліджень колективом мобільних автономних дослідницьких станцій (алгоритмічна модель, інтерполяційна модель, ентропійна модель). У межах алгоритмічної моделі колективної поведінки вимірювальних агентів досліджено проблему децентралізації управління процесом вимірювання. У межах інтерполяційної моделі колективної поведінки вимірювальних агентів досліджено шляхи вирішення проблеми розміщення вимірювальних агентів в просторі об'єкта дослідження, а також способи її сумісного вирішення з проблемою управління. У межах ентропійної моделі колективної поведінки вимірювальних агентів досліджено взаємозв'язок самоорганізації колективу і кількості інформації про довкілля, яку він збирає.

1. Цапенко М.П. Измерительные информационные системы: Структуры и алгоритмы, системотехническое проектирование. – М.: Энергоатомиздат, 1985. 2. Бочкарьов О.Ю., Голембо В.А. Система розподілених контактних вимірювань на основі автономних мобільних інтелектуальних

- 617/1 а.
- агентів // Вісн. Нац. ун-ту "Львівська політехніка". – 2001. – № 437. – С. 14–20. 3. Cortes J., Martinez S., Karatas T., Bullo F. Coverage control for mobile sensing networks: variations on a theme // Proceedings of the Mediterranean Conference on Control and Automation, 9–13 July 2002. – Lisbon, Portugal. Electronic Proceedings. 4. Andrew Howard, Maja J. Mataric, Gaurav S. Sukhatme, Mobile Sensor Network Deployment using Potential Fields: A Distributed, Scalable Solution to the Area Coverage Problem // Proceedings of the 6th International Symposium on Distributed Autonomous Robotics Systems (DARS'02) Fukuoka, Japan, 25–27 June 2002. 5. 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. – P. 2060–2067. 6. Curtin T.B., Bellingham J.G., Catipovic J., and Webb D. Autonomous oceanographic sampling networks // Oceanography. – 1993. – Vol. 6, N 3. – P. 86–94. 7. Бочкарьов О.Ю., Голембо В.А., Мельник А.О. Нові принципи побудови вимірювально-обчислювальних мереж на основі інтелектуальних агентів // Вісн. Нац. ун-ту "Львівська політехніка". – 2003. – № 492. – С. 100–107. 8. Орнатский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники. – К.: Вища шк., 1983. 9. Цетлин М.Л. Исследования по теории автоматов и моделированию биологических систем. – М.: Наука, 1969. 10. Woolridge M. An Introduction to MultiAgent Systems, John Wiley & Sons, 2002. 11. Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence, by Gerhard Weiss (Editor), MIT Press, 2000. 12. Бочкарьов О.Ю., Голембо В.А. Моделі колективної поведінки вимірювальних агентів // Вісн. Нац. ун-ту "Львівська політехніка". – 2002. – № 463. – С. 19–27. 13. Стахов А.П. Введение в алгоритмическую теорию измерения. – М.: Сов. радио, 1977. 14. Бочкарьов О.Ю. Вирішення задачі механічного зрівноваження колективом мобільних агентів // Вісн. Нац. ун-ту "Львівська політехніка". – 2002. – № 463. – С. 14–18. 15. Бочкарьов О.Ю., Голембо В.А. Інтерполяційна модель колективної поведінки мобільних агентів вимірювально-обчислювальної мережі // Вісн. Нац. ун-ту "Львівська політехніка". – 2003. – № 492. – С. 21–27. 16. Темников Ф.Е., Афонин В.А., Дмитриев В.И. Теоретические основы информационной техники. – М.: Энергия, 1971. 17. Бабенко К.И. Основы численного анализа. – М.: Наука, 1986. 18. Демьянов В.Ф., Малоземов В.Н. Введение в минимакс. – М.: Наука, 1972.

УДК 681.3, 621.3

О.Ю. Бочкарьов, В.А. Голембо, Х. Р. Попадюк  
Національний університет "Львівська політехніка",  
кафедра електронних обчислювальних машин

## РОЗРОБКА ТА РОЗВ'ЯЗАННЯ ТЕСТОВИХ ЗАДАЧ ПРОСТОРОВОЇ САМООРГАНІЗАЦІЇ БАГАТОАГЕНТНОЇ СИСТЕМИ

© Бочкарьов О.Ю., Голембо В.А., Попадюк Х.Р., 2005

Розглянуто проблему самоорганізації колективу автономних мобільних агентів (багатоагентної системи) у деякому просторі з погляду узгодженого цілеспрямованого переміщення та взаєморозташування агентів колективу. Запропоновано декілька тестових задач для розробки та оцінки розподілених алгоритмів просторової самоорганізації (формування багатокутника, автономне розгортання в обмеженому просторі, гра у поглинання).

The problem of spatial self-organization of mobile agents' team (multi-agent system) in an environment in the view of coordinated task-oriented movement and inter-allocation is examined. A number of task problems for developing and estimating distributed algorithms of spatial self-organization (polygon formation, autonomous allocation, gobble game, etc.) are proposed.

Вступ. У роботі розглянуто проблему самоорганізації колективу автономних мобільних агентів (багатоагентної системи) у деякому просторі з погляду узгодженого цілеспрямованого

