

комп'ютерних та телекомунікаційних системах потребує глибокого дослідження їх системних характеристик, інформативності та оптимальних умов застосування в конкретних задачах цифрової обробки сигналів.

1. Грибанов Ю.И., Веселова Г.П., Андреев В.Н. Автоматические цифровые корреляторы. – М.: Энергия, 1971. – 240с. 2. Nikolaychuk Y., Krutckevych N., Zastavniy O. Multibases Processors of Two-dimensional Correlation for Noise Immunity of Transfer Information Proc. Of the IEEE International Workshop on Intelligent Data Acquistion and Advanced Computing Systems(IDAACS'2007): Dortmund, Germany. – 2007. – P. 315–317. 3. Николайчук Я.Н. Программные модели распараллеливания измерения, кодирования и передачи сообщений унитарным преобразованием СОК / Я.Н. Николайчук, Б.М. Шевчук, А.А. Попов // Материалы VI Всесоюзной школы-семинара. – Львов, 1987. 4. Николайчук Я.М., Крикун З.Н., Божнев В.П. Представление измерительной информации в нормализованной системе исчисления остаточных классов // Известия ВУЗов “Нефть и газ”. 1976. – № 6. 5. Николайчук Я.М., Волинський О.І., Кулина С.В. Теоретичні основи побудови та структура спец процесорів в базисі Крестенсона // Вісник Хмельницького національного університету. – 2007. – № 3. – Т. 1. – С. 85–90. 6. Акушский И.Я. Машинная арифметика в остаточный классах / И.Я. Акушский, Д.И. Юдицкий – М.: Сов. радио, 1978. – 256. 7. Албанський І.Б., Заведюк Т.О. Спецпроцесори кореляційної обробки сигналів // Праці міжнародного симпозіуму “Питання оптимізації обчислень (поо-хххv)” Т. 1. – К., 2009. – С. 8–13.

УДК 681.3, 621.3

О.Ю. Бочкарьов

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електронних обчислювальних машин

СТРУКТУРНА АДАПТАЦІЯ АВТОНОМНИХ РОЗПОДІЛЕНИХ ВИМІРЮВАЛЬНО-ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ

© Бочкарьов О.Ю., 2010

Розглянуто проблему структурної адаптації автономних розподілених вимірювально-обчислювальних систем. Запропоновано узагальнений опис задачі автономних розподілених досліджень та розроблено відповідний метод структурної адаптації.

The problem of structural adaptation of autonomous distributed sensing and computing networks is considered. The generalized approach to description of the problem is proposed. The method of structural adaptation is developed.

Вступ. Сьогодні проблема дослідження та розроблення автономних розподілених вимірювально-обчислювальних систем набуває все більшої актуальності. Враховуючи сучасний стан розвитку обчислювальних технологій та технологій безпроводних мереж (wireless networks), можна зробити висновок про різке збільшення можливостей щодо практичної реалізації автономних розподілених вимірювально-обчислювальних систем [1–12]. Разом з тим останнім часом різко зросла потреба у системах цього класу у зв'язку із загальним зростанням областей та масштабів застосування інформаційних технологій і технологій штучного інтелекту. Тому в статті розглядається актуальна проблема структурної адаптації автономних розподілених вимірювально-обчислювальних систем, вирішення якої дасть змогу підняти їх функціональність на новий якісний рівень.

Стан проблеми. Автономна розподілена вимірювально-обчислювальна система призначена для збирання та попередньої обробки вимірювальної інформації в автономному режимі (без участі людини-оператора) в умовах просторової розподіленості об'єкта дослідження [1, 4, 5]. Зібрана нею інформація передається у віддалений центр збирання та обробки інформації чи використовується "на місці" відповідними виконавчими системами (наприклад, автономними мобільними системами розподіленої робототехніки [8]). Внаслідок відсутності людини-оператора та віддаленості центру збирання та обробки при побудові таких систем виникає проблема оперативності управління [5,6]. Для вирішення цієї проблеми автономній розподіленій вимірювально-обчислювальній системі делегується частина повноважень щодо вибору та аналізу своїх дій. У зв'язку з цим під час дослідження та розроблення таких систем інтенсивно застосовуються концепції та технології штучного інтелекту, зокрема концепція інтелектуального автономного агента (intelligent autonomous agent) та багатоагентних систем (multi-agent systems) [13, 14]. У межах цього підходу окремий вузол автономної розподіленої вимірювально-обчислювальної системи отримав назву вимірювальний агент [1–6], яскравим прикладом якого може бути автономна мобільна дослідницька станція [7]. Відповідно множина вимірювальних агентів, об'єднаних у єдину цілісну систему, в межах цього підходу називається колективом вимірювальних агентів $K=\{a\}_n$, де n – кількість вимірювальних агентів у колективі. Прикладом колективу вимірювальних агентів може бути мобільна безпроводна сенсорна мережа (mobile wireless sensor network) [8, 10–12]. Дослідженню різних проблем розроблення та оптимізації колективної поведінки вимірювальних агентів присвячено багато зусиль різних наукових груп та шкіл [1–6, 9–12]. На особливий інтерес серед усіх цих досліджень заслуговують спроби забезпечити можливість самостійного пошуку колективом вимірювальних агентів найкращих (згідно з заданими критеріями) способів дослідження деякого об'єкта O (рис. 1). У статті розглянуто підхід до узагальненого опису цих спроб та запропоновано схему вирішення відповідної проблеми за допомогою механізму структурної адаптації автономної розподіленої вимірювально-обчислювальної системи.

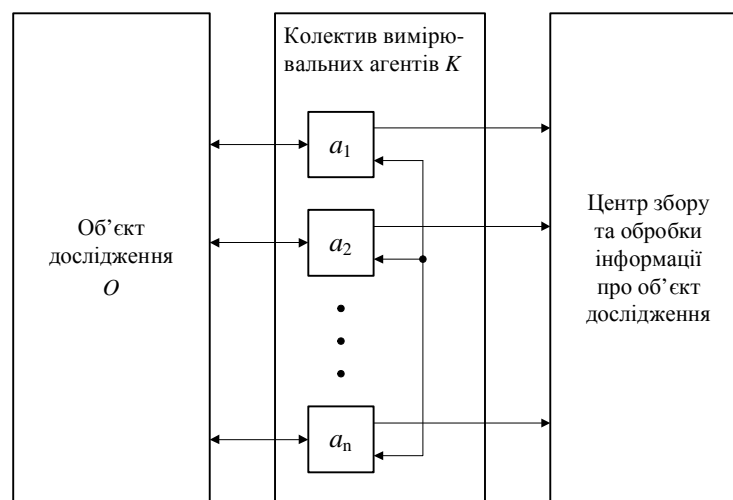


Рис. 1. Схема організації роботи колективу вимірювальних агентів (автономної розподіленої вимірювально-обчислювальної системи)

Постановка задачі. Розглянути проблему структурної адаптації автономних розподілених вимірювально-обчислювальних систем. Розробити узагальнений опис задачі автономних розподілених досліджень, які виконуються за допомогою автономної розподіленої вимірювально-обчислювальної системи. Розглянути відповідну процедуру дослідження як процес прийняття рішень в умовах невизначеності. Розробити механізм структурної адаптації автономної розподіленої вимірювально-обчислювальної системи.

Розв'язання задачі. Узагальнений опис задачі автономних розподілених досліджень. Узагальнюючи підходи до опису моделі досліджуваного явища (об'єкта дослідження) [1–6, 9–12], введемо поняття джерела інформації d про об'єкт дослідження O . Під джерелом інформації розумітимемо деякий відмінний від інших способів дослідження об'єкта, тобто спосіб отримання інформації про нього. У випадку, коли об'єкт O можна досліджувати декількома різними способами (наприклад, змінюючи режими роботи інструменту дослідження), різні джерела інформації утворюють множину $D=\{d\}_m$, де m – загальна кількість доступних джерел інформації. Кожному джерелу інформації d відповідає один або декілька показників, які відображають різницю між джерелами інформації в тому чи іншому розумінні. Наприклад, у [15] запропоновано поняття достовірності джерела інформації про поточний стан системи у вигляді матриці умовних ймовірностей правильної та помилкової ідентифікації поточного стану. Узагальнюючи цей та багато інших підходів [16] до оцінювання характеристик джерел інформації, будемо характеризувати кожне джерело інформації d кількістю інформації $I(d,t)$ про об'єкт дослідження, яка зберігається в джерелі d в момент часу t , та швидкістю отримання інформації $V(d,t)$ про об'єкт дослідження за допомогою джерела d в момент часу t . За різних підходів до визначення загальної кількості інформації I_Σ , яку можна отримати про об'єкт дослідження, доцільно розрізняти два класи задач: 1) “потоків” задачі, в яких I_Σ розглядається як нескінченна величина $I_\Sigma = \infty$; та 2) “ємнісні” задачі, в яких I_Σ розглядається як деяка обмежена величина $I_\Sigma = I_{\max}$. Відповідно в задачах другого класу додатково беруть до уваги питому кількість інформації $\rho(d,t) = I(d,t) / I_{\max}$, що міститься в джерелі d , та відповідну питому швидкість отримання інформації $v(d,t)$ з джерела d .

Множина джерел інформації D , як правило, характеризується деякою структурою внутрішніх зв'язків (взаємозалежностей між джерелами інформації) $C(D)$, яка відображає природу об'єкта дослідження та закони процесів, які в ньому розгортаються. Спосіб визначення та представлення $C(D)$ залежить від конкретної дослідницької задачі, яка ставиться перед автономною розподіленою вимірювально-обчислювальною системою (колективом вимірювальних агентів). Якщо насамперед орієнтуватись на способи кількісного оцінювання зібраної інформації, то як $C(D)$ доцільно використовувати поняття взаємної інформації (mutual information). Тоді для кожної пари джерел інформації визначають величину “перекриття” інформації $c(d_i, d_j)$, яка міститься в джерелах d_i та d_j . При цьому треба зауважити, що можливі також інші, іноді доволі складні, способи визначення та представлення $C(D)$, зокрема комбіновані способи, в яких одночасно відображається декілька різних за змістом уявлень про характер внутрішніх зв'язків між джерелами інформації [17].

Враховуючи специфіку задачі автономних розподілених досліджень, введемо поняття композитного (складеного) джерела інформації, яке відображає той факт, що кожний вимірювальний агент у складі автономної розподіленої вимірювально-обчислювальної системи взаємодіє з об'єктом дослідження незалежно від інших агентів (рис.1). Відтак композитне джерело інформації можна подати у вигляді:

$$d = g(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

де x_i – конфігураційний параметр, який знаходиться під незалежним управлінням i -го вимірювального агента, а $g()$ – спосіб об'єднання значень конфігураційних параметрів у межах заданої схеми взаємодії колективу вимірювальних агентів з об'єктом дослідження. При цьому декартів добуток множини усіх джерел $\{d\}_m$ та множини усіх допустимих наборів значень конфігураційних параметрів утворить множину субджерел:

$$D' = \{d'\}_k = \{d\} \times \{g(x_1, x_2, \dots, x_n)\}.$$

Надалі для зручності, виходячи з еквівалентності понять “джерело” і “субджерело”, будемо називати субджерела інформації просто джерелами інформації, тобто вважати, що $d' \rightarrow d$, $D' \rightarrow D$, $k \rightarrow m$. Отже, кожний вимірювальний агент a в кожний момент часу t отримує інформацію про об'єкт дослідження з деякого “власного” джерела $d(a)$, рішення про вибір якого він прийняв на цьому часовому кроці (рис. 2). Будемо також вважати, що ситуація, коли два чи більше вимірювальні агенти отримують інформацію з одного і того самого джерела, неможлива (заборонена внаслідок її очевидної нерациональності). Крім того, вважатимемо, що кількість

вимірювальних агентів завжди менша за кількість джерел інформації: $n < m$. Відповідно на кожному кроці процедури дослідження формується множина “обраних” вимірювальними агентами джерел інформації $D_a \subseteq D$ у кількості n (за кількістю вимірювальних агентів). Окремо слід вказати на можливість використання в постановці задачі поняття “прихованих” джерел інформації (рис.2), які стають доступними вимірювальним агентам лише після отримання всієї інформації (або деякої заданої кількості інформації) з відповідних інших джерел.

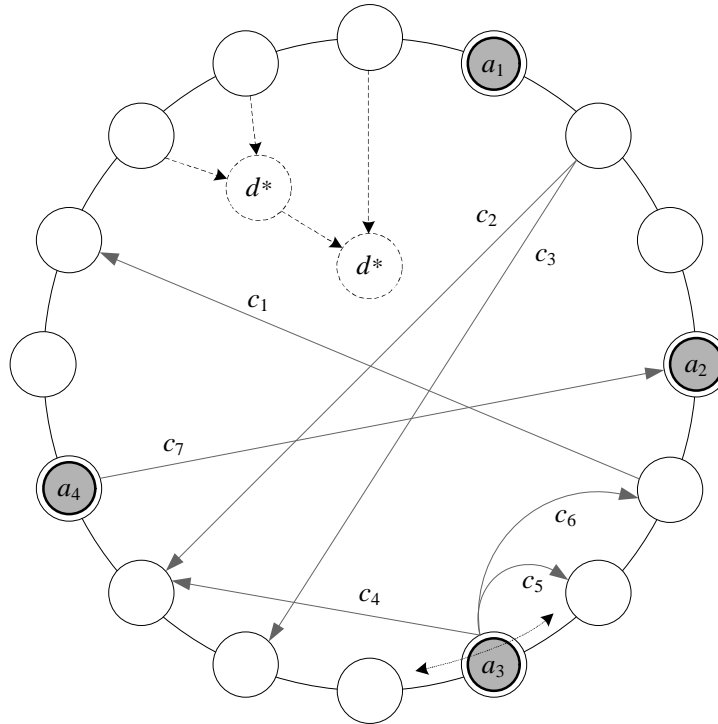


Рис. 2. Множина джерел інформації ($m=16$), об'єднаних графом-кільцем схеми припустимих перемикань (d^* – приховане джерело інформації, $\{c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7\} \in C(D)$ – зв'язки між джерелами інформації, $\{a_1, a_2, a_3, a_4\}$ – вимірювальні агенти, $n=4$)

Вибір вимірювальним агентом джерела інформації в наступному часовому кроці називатимемо перемиканням джерела інформації. Відповідно поведінка окремого вимірювального агента визначається його локальною функцією перемикань:

$$d_{t+1} = f_a(d_t, t),$$

яка визначає послідовність перемикань джерел інформації цим агентом. Сукупність дій вимірювальних агентів з перемикання джерел інформації формує колективну поведінку, результатом якої є послідовність різних (за складом) конфігурацій множини D_a .

Можливість переходу від одного джерела інформації до іншого за один часовий крок задається схемою припустимих перемикань джерел інформації (рис.2) у вигляді матриці $G_{m \times m}$ (та відповідного графу переходів). Крім того, для кожного переходу між джерелами задаються витрати вимірювального агента на цей перехід (так, наприклад, моделюються витрати енергії автономної дослідницької станції на пересування у просторі). Для цього використовують функцію витрат $f_q(d_i, d_j), i \neq j$.

Так можна сформулювати наступні два варіанти задачі автономних розподілених досліджень: 1) зібрати максимальну кількість інформації протягом виділеного на дослідження проміжку часу (кількість часових кроків) T , мінімізувавши сукупні витрати на перемикання між джерелами ($I_T \rightarrow \max, T = \text{const}, \Sigma f_q \rightarrow \min$); 2) зібрати всю інформацію про об'єкт дослідження в повному

обсязі за якомога меншу кількість часових кроків, мінімізувавши сукупні витрати на перемикання між джерелами ($I_T = I_{\max}$, $T \rightarrow \min$, $\sum f_q \rightarrow \min$).

Слід зауважити, що використовуючи як спосіб визначення та представлення $C(D)$ поняття взаємної інформації, узагальнений принцип розв'язання сформульованих вище задач полягає у наступному. Знайти підмножину $D_a^* \subseteq D$ таких n джерел інформації, інформація з яких найменше перекривається між собою і водночас максимально перекривається з інформацією усіх інших (не обраних вимірювальними агентами) джерел [18].

Процедура дослідження як процес прийняття рішень. Процес розв'язання задачі автономних розподілених досліджень доцільно представити у вигляді набору незалежних процесів прийняття рішень окремими вимірювальними агентами (як реалізацій локальних функцій перемикання $\{f_a\}$) у складі автономної розподіленої вимірювально-обчислювальної системи. Тоді процедуру дослідження об'єкта O колективом вимірювальних агентів K (рис.1) можна представити як цілеспрямовану колективну поведінку вимірювальних агентів [1–6], у межах якої кожний агент: 1) оцінює успішність своїх власних дій з перемикання джерел інформації на основі деякої заданої функції оцінки $R(a)$; 2) обмінюється координаційною та іншою службовою інформацією з іншими вимірювальними агентами за обраним способом інформаційної взаємодії $J(a)$; 3) приймає рішення про вибір наступного джерела інформації за заданим алгоритму прийняття рішень $U(a)$, враховуючи успішність своїх дій та інформації, що надійшла від інших агентів. При цьому для оцінки успішності колективних дій вимірювальних агентів, доцільно використовувати розподілену службову модель об'єкта дослідження $M(O)$, яка зберігається в пристроях пам'яті вимірювальних агентів та поступово уточнюється під час процедури досліджень. З використанням такої моделі можна збільшити ефективність оцінювання успішності колективних дослідницьких дій за рахунок об'єднання вимірювальної інформації, отриманої різними агентами. Способи організації роботи таких службових моделей та підходи до їх практичної реалізації потребують додаткових досліджень.

Окремо слід підкреслити, що головним елементом розглянутої задачі автономних розподілених досліджень з погляду побудови процедури дослідження як процесу прийняття рішень є відомості про взаємозалежність джерел інформації D , тобто структуру їх внутрішніх зв'язків $C(D)$. За наявності повної інформації про $C(D)$, розробник системи розподілених досліджень може заздалегідь визначити найкращу процедуру дослідження об'єкта O [18] у вигляді незмінної програми з вибору відповідної конфігурації джерел інформації (або відповідної послідовності їх перемикання) за тих чи інших умов роботи системи згідно з особливостями конкретної постановки задачі розподілених досліджень. У цьому випадку процедура дослідження (в частині її залежності від $C(D)$) реалізується як процес прийняття рішень в умовах повної інформованості (відсутності невизначеності). На відміну від цього, в умовах повної або часткової відсутності інформації про $C(D)$ процедура дослідження являє собою процес прийняття рішень в умовах невизначеності, тобто потребує передавання частини повноважень з прийняття рішень стосовно вибору дослідницьких дій (перемиканню джерел інформації) вимірювальним агентам у складі автономної розподіленої вимірювально-обчислювальної системи. При цьому постає проблема одночасного: а) збирання інформації про об'єкт O (за допомогою обраних на цей момент джерел інформації) та б) дослідження структури внутрішніх зв'язків між джерелами інформації $C(D)$. Для цього необхідно в певний спосіб розподілити “дослідницькі” ресурси автономної розподіленої вимірювально-обчислювальної системи (колективу вимірювальних агентів) на виконання двох відповідних підзадач. Цей розподіл ускладнюється тим, що в переважній більшості випадків дослідницькі дії спрямовані на збирання інформації про $C(D)$, менш ефективні в плані збирання інформації про об'єкт O (ніж спеціально спрямовані на це, інші за своїм характером дослідницькі дії). Те саме стосується низької ефективності дослідницьких дій, спрямованих насамперед на збирання інформації про об'єкт O з погляду ефективності збирання інформації про $C(D)$.

Механізм структурної адаптації. Враховуючи ідею самоорганізації колективу вимірювальних агентів [4–6] та гіпотези про відповідність здатного до самоорганізації інструменту дослідження складному нелінійному об'єкту дослідження, в якому розгортаються синергетичні

процеси [4–6], розглянемо підхід до розв’язання сформульованої вище задачі автономних розподілених досліджень. У межах цього підходу під структурою S розумітимемо сукупність стійких впорядкованих координаційних зв’язків $\{\sigma(a,a')\}$ між вимірювальними агентами, обумовлених їх поточним функціонально-рольовим розподілом $P(a,t)$. Структурною адаптацією [19] вважатимемо цілеспрямований процес оптимізації колективних дослідницьких дій вимірювальних агентів шляхом відповідних дискретних змін структури S .

Згідно з проблематикою побудови процедури дослідження як процесу прийняття рішень в умовах невизначеності розіб’ємо цей процес на два змістовні рівні. На першому – функціональному рівні вимірювальні агенти: 1) приймають рішення про вибір дослідницьких дій із збирання інформації про об’єкт дослідження за алгоритмом колективної поведінки $(R_x(a), U_x(a))$, враховуючи наявні відомості про $C(D)$ (тобто виконують свою “основну” функцію); та 2) приймають рішення про вибір дослідницьких дій із збирання інформації про структуру внутрішніх зв’язків джерел інформації $C(D)$ за алгоритмом колективної поведінки $(R_y(a), U_y(a))$ за відомим виглядом моделі $C(D)$ (тобто виконують “допоміжну” функцію). На другому – структурному рівні відбувається пошук оптимального співвідношення зусиль вимірювальних агентів, спрямованих на виконання “основної” та “допоміжної” функцій у вигляді поточного функціонально-рольового розподілу $P(a,t)$. Тобто передбачається, що під впливом рішень, які приймаються на структурному рівні (рис.3), окремий агент перемикається з виконання “основної” функції на виконання “допоміжної” і навпаки (залежно від вимог поточної ситуації).

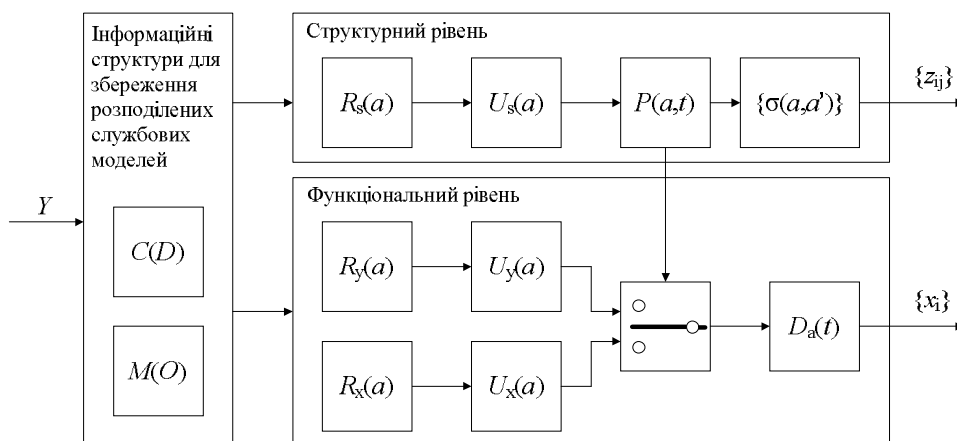


Рис. 3. Узагальнена схема механізму структурної адаптації автономної розподіленої вимірювально-обчислювальної системи

Відтак “ядром” механізму структурної адаптації (рис.3) є алгоритм колективної поведінки $(R_s(a), U_s(a))$, за яким приймаються рішення про дискретні зміни структури S на структурному рівні процесу прийняття рішень. Тобто колектив вимірювальних агентів одночасно розв’язує дві задачі: 1) оптимізації колективних дій в ході дослідницької взаємодії з об’єктом дослідження (функціональний рівень); та 2) оптимізації внутрішньої міжагентної взаємодії під час пошуку оптимального функціонально-рольового розподілу вимірювальних агентів $P(a,t)$ та відповідної структури координаційних зв’язків між ними $\{\sigma(a,a')\}$ (структурний рівень). Як алгоритми функціонального рівня $(R_x(a), U_x(a))$ та $(R_y(a), U_y(a))$ доцільно використати алгоритми колективної поведінки вимірювальних агентів, розроблені у межах дослідження алгоритмічної, інтерполяційної та ентропійної моделей колективної поведінки вимірювальних агентів [2–6]. При цьому тип потрібної моделі визначається специфікою конкретної задачі автономних досліджень [6]. Як алгоритми структурного рівня $(R_s(a), U_s(a))$ доцільно використати механізми ігрової координації, запропоновані в [20]. Крім цього, слід вказати на існування інших цікавих підходів, які можна використати для побудови алгоритмів колективної поведінки структурного рівня, зокрема підхід, заснований на концепції перетворення графів (graph rewriting) [21]. Загалом проблема побудови

ефективних алгоритмів колективної поведінки структурного рівня заслуговує на окрему увагу і потребує подальших досліджень.

Висновки. У статті розглянуто та проаналізовано проблему структурної адаптації автономних розподілених вимірювально-обчислювальних систем. Запропоновано узагальнений опис задачі автономних розподілених досліджень на основі концепції джерел інформації про об'єкт дослідження. У статті також розглянуто процедуру автономних розподілених досліджень як процес прийняття рішень в умовах невизначеності та запропоновано механізм структурної адаптації автономної розподіленої вимірювально-обчислювальної системи.

1. Бочкар'єв О.Ю., Голембо В.А. Система розподілених контактних вимірювань на основі автономних мобільних інтелектуальних агентів // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка" "Комп'ютерні системи та мережі". – 2001. – № 437. – С. 14–20. 2. Бочкар'єв О.Ю., Голембо В.А. Моделі колективної поведінки вимірювальних агентів // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка" "Комп'ютерні системи та мережі". – 2002. – № 463. – С. 19–27. 3. Бочкар'єв О.Ю., Голембо В.А. Інтерполяційна модель колективної поведінки мобільних агентів вимірювально-обчислювальної мережі // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка" "Комп'ютерні системи та мережі". – 2003. – № 492. – С. 21–27. 4. Мельник А.О., Голембо В.А., Бочкар'єв О.Ю. Нові принципи побудови вимірювально-обчислювальних мереж на основі інтелектуальних агентів // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка" "Комп'ютерні системи та мережі". – 2003. – № 492. – С. 100–107. 5. Бочкар'єв А.Ю., Голембо В.А. Самоорганізація колектива мобільних измерительных агентів в задаче распределенных контактных измерений // Искусственный интеллект. – 2005. – №3. – С. 723–731. 6. Бочкар'єв О.Ю. Колективна поведінка мобільних інтелектуальних агентів в задачах автономних розподілених досліджень // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка" "Комп'ютерні системи та мережі". – 2005. – № 546. – С. 12–17. 7. Бочкар'єв О.Ю. "Автономна дослідницька станція у складі океанологічної вимірювально-обчислювальної мережі", Магістерська кваліфікаційна робота, Державний університет "Львівська політехніка", Львів, 1998. – 132 с. 8. Jiming Liu, Jianbing Wu, Multiagent Robotic Systems, CRC Press, 2001. – 304p. 9. E.K.P. Chong, C. Kreucher, and A. Hero, Partially observable Markov decision process approximations for adaptive sensing, Discrete Event Dynamic Systems, 19(3):377-422, 2009. 10. 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. 11. 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, June 25-27, 2002. 12. Naomi Ehrich Leonard, D. Paley, R. Davis, D. Fratantoni, F. Lekien and F. Zhang, Coordinated Control of an Underwater Glider Fleet in an Adaptive Ocean Sampling Field Experiment in Monterey Bay, Journal of Field Robotics, 2010. 13. Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence, by Gerhard Weiss (Editor), MIT Press, 2000. – 648p. 14. Michael Wooldridge, An Introduction to MultiAgent Systems, John Wiley & Sons, 2002. – 348p. 15. Трухаев Р.И. Модели принятия решений в условиях неопределённости. – М.: Наука, 1981. – 257 с. 16. Козан И.М. Прикладная теория информации. – М.: Радио и связь, 1981. – 216 с. 17. Jörn Behrens, Adaptive atmospheric modeling: key techniques in grid generation, data structures, and numerical operations with applications, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. 18. Dariusz Uciński, Measurement Optimization for Parameter Estimation in Distributed Systems, Technical University Press, Zielona Góra, 1999. 19. Расстригин Л.А., Рупа К.К., Тарасенко Г.С. Адаптация случайного поиска. Рига, "Зинатне", 1978. – 239 с. 20. Бочкар'єв О.Ю., Голембо В.А., Ціж А.М. Колективна поведінка мобільних агентів в задачах рівномірного розподілу обмеженої території // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" "Комп'ютерні системи та мережі" № 630, 2008. – С.31-35. 21. E. Klavins, R. Ghrist and D. Lipsky, A Grammatical Approach to Self-Organizing Robotic Systems, IEEE Transactions on Automatic Control. Jun. 2006, Vol. 51, No. 5, pp. 949-962.