

## ОРГАНІЗАЦІЯ АДАПТИВНИХ ПРОЦЕСІВ ЗБОРУ ІНФОРМАЦІЇ У МОБІЛЬНИХ КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМАХ

© Бочкарьов О.Ю., 2016

**Розглянуто проблему організації адаптивних процесів збору інформації у мобільних кіберфізичних системах (КФС). Запропоновано узагальнену модель організації адаптивних процесів збору інформації та підхід до їх організації на основі концепції структурної адаптації.**

**Ключові слова:** адаптивний процес збору інформації, мобільна кіберфізична система

## ORGANIZATION OF ADAPTIVE PROCESSES OF INFORMATION GATHERING IN MOBILE CYBER-PHYSICAL SYSTEMS

© Botchkaryov A., 2016

**The problem of organization of adaptive processes of information gathering in mobile cyber-physical systems is considered. The general model of organization of adaptive processes of information gathering and corresponding approach to organization based on the concept of structural adaptation are proposed.**

**Keywords:** adaptive process of information gathering, mobile cyber-physical system

### 1. Проблема збору інформації у мобільних КФС

До основних завдань процесів збору інформації у мобільних КФС та відповідного програмно-апаратного забезпечення відносяться: 1) збір інформації про об'єкт дослідження або управління КФС, оточення КФС (context awareness) та роботу самої КФС (згідно вказаного користувачем набору параметрів та відповідних джерел інформації), 2) попередня обробка зібраної інформації (в тому числі для її подальшого використання іншими компонентами мобільної КФС), 3) доставка та збереження інформації, 4) управління роботою сенсорних та виконавчих систем мобільної КФС, 5) управління роботою програмно-апаратних засобів збору інформації (в тому числі забезпечення їх автономності та адаптивності їх роботи), 6) отримання завдань/команд від користувача та інших програмних сервісів, 7) використання інших програмних служб та сервісів в разі потреби.

При цьому одною з найбільш важливих та актуальних проблем організації процесів збору інформації у мобільних КФС є 1) забезпечення *адаптації* цих процесів до 1.1) збурень (різких змін) у оточенні мобільної КФС, 1.2) недетермінованих змін об'єкту дослідження, про який збирається інформація, 1.3) змін у роботі самої мобільної КФС (наприклад, часткової відмови її вузлів чи зменшення запасу енергії), 1.4) змін цілей дослідження чи управління з відповідною зміною цілей збору інформації; та 2) забезпечення 2.1) збільшення кількості отримуваної інформації (згідно обраного способу оцінки), 2.2) зменшення витрат на її отримання, 2.3) підвищення надійності роботи відповідного програмно-апаратного забезпечення.

Базовий сценарій організації процесів збору інформації у мобільній КФС передбачає наступні кроки. 1) На вхід служби збору інформації поступають дослідницькі задачі (вказівки щодо збору інформації) від користувачів-людей або згенеровані іншими програмними службами. 2) Для вирішення дослідницької задачі породжується множина паралельних адаптивних процесів збору інформації, для яких в якості ресурсу виступає відповідне апаратне забезпечення мобільної КФС (наприклад у вигляді автономних вимірювально-обчислювальних вузлів [1]). 3) Множина паралельних адаптивних процесів збору інформації самоорганізується з метою збільшити швидкість та якість вирішення задач збору інформації та збільшити ефективність використання апаратного забезпечення мобільної КФС. 4) На інфраструктурному рівні процеси збору інформації виконують цикл опитування сенсорних підсистем мобільної КФС та інших джерел інформації (наприклад, програмних служб які збирають статистику про роботу мобільної КФС), цикл формування та видачі команд сенсорним підсистемам, цикл передачі інформації по заданому протоколу.

Реалізація наведеного сценарію породжує низку цікавих оптимізаційних задач (задач інтелектуального збору інформації), серед яких можна виділити наступні. 1) Задачі на основі «операційних» критеріїв, за якими оцінюється якість роботи сторонніх служб та сервісів, що користуються «послугами» адаптивних процесів збору інформації (відтак ефективність їх роботи впливає на ефективність роботи цих сторонніх служб та сервісів, яка в даному випадку використовується як критерій якості вирішення відповідних оптимізаційних задач). 2) Задачі на основі різних способів оцінки кількості зібраної інформації, зокрема з використанням структурних мір (виключення надлишковості), статистичних мір (Шенона, Фішера та ін.) та семантичних мір (наприклад, міри доцільності інформації, яка була запропонована А.А. Харкевичем). 3) Задачі орієнтовані на збереження запасу енергії мобільної КФС в різних аспектах цієї проблеми (наприклад, у вимірювальному аспекті (зменшення витрат енергії на роботу сенсорних підсистем) або у обчислювальному аспекті (зменшення витрат енергії на обчислення процесів прийняття рішень та процесів попередньої обробки інформації). 4) Задачі на основі критеріїв надійності роботи мобільних КФС (наприклад, на основі оціки динаміки зменшення ефективності роботи мобільної КФС в процесі виходу з ладу її вузлів).

Вирішення задач інтелектуального збору інформації у мобільних КФС характеризується наступними основними моментами. 1) Процес управління збором інформації розглядається як процес прийняття рішень за умов невизначеності (нестачі інформації) на основі використання різних за складністю та змістовною інтерпретацією моделей невизначеності (наприклад, моделей на основі марківського процесу прийняття рішень (Markov decision process, MDP)). 2) Для вирішення даних задач використовуються методи машинного навчання (machine learning), зокрема методи навчання з підкріпленням (reinforcement learning). 3) Внаслідок великої розмірності та багатокритеріальності даних задач для їх вирішення використовуються різні підходи до апроксимації функцій оцінки та цільових функцій. 4) В контексті вирішення даних задач на основі концепції багатоагентних систем (multi-agent systems) досліджуються та розробляються відповідні методи координації колективної поведінки адаптивних процесів збору інформації, зокрема методи координації колективного навчання з підкріпленням (coordinated reinforcement learning) [2].

## **2. Узагальнена модель організації адаптивних процесів збору інформації.**

Узагальнюючи підходи до опису моделі досліджуваного явища (об'єкту дослідження), введемо поняття джерела інформації  $d$  про об'єкт дослідження  $O$ . Під джерелом інформації будемо розуміти деякий відмінний від інших способів дослідження об'єкту, тобто спосіб отримання інформації про нього. У випадку, коли об'єкт  $O$  можна досліджувати декількома різними способами (наприклад, змінюючи режими роботи інструменту дослідження),

відповідні різні джерела інформації утворюють множину  $D=\{d\}_m$ , де  $m$  – загальна кількість доступних джерел інформації. Кожному джерелу інформації  $d$  ставиться у відповідність один або декілька показників, які відображають різницю між джерелами інформації в тому, чи іншому розумінні. Наприклад, в [3] запропоновано поняття достовірності джерела інформації про поточний стан системи у вигляді матриці умовних ймовірностей вірної та помилкової ідентифікації поточного стану. Узагальнюючи цей та багато інших підходів [4] до оцінки 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  $t$ . Виходячи з різних підходів до визначення загальної кількості інформації  $I_\Sigma$ , яку можна отримати про об'єкт дослідження, доцільно розрізнити два класи задач: 1) «потоків» задач, в яких  $I_\Sigma$  розглядається як нескінченна величина  $I_\Sigma = \infty$ ; та 2) «ємнісні» задач, в яких  $I_\Sigma$  розглядається як деяка обмежена величина  $I_\Sigma = I_{\max}$ . Відповідно в задачах другого класу додатково беруться до уваги питома кількість інформації  $\rho(d,t) = I(d,t) / I_{\max}$ , що міститься в джерелі  $d$ , та відповідна питома 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 задачі збору інформації. Якщо, в першу чергу, орієнтуватись на способи кількісної оцінки зібраної інформації, то в якості  $C(D)$  доцільно використовувати поняття взаємної інформації (mutual information). Тоді для кожної пари джерел інформації визначається величина «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 досить складні, способи визначення та представлення  $C(D)$ , в тому числі комбіновані способи, в яких одночасно відображається декілька різних за змістом уявлень про характер внутрішніх зв'язків між джерелами інформації [5].

Виходячи зі специфіки задачі організації адаптивних процесів збору інформації, введемо поняття композитного (складеного) джерела інформації, яке відображає той факт, що кожний окремий процес збору інформації взаємодіє з об'єктом дослідження незалежно від інших процесів. Відтак композитне джерело інформації можна представити у наступному вигляді:

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

де  $x_i$  – конфігураційний параметр, який знаходиться під незалежним управлінням  $i$ -го процесу збору інформації, а  $g(\ )$  – спосіб об'єднання значень конфігураційних параметрів в рамках заданої схеми взаємодії процесів збору інформації з об'єктом дослідження. При цьому декартів добуток множини усіх джерел  $\{d\}_m$  та множини усіх допустимих наборів значень конфігураційних параметрів утворить множину суб-джерел:

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

В подальшому для зручності, виходячи з еквівалентності понять «джерело» і «суб-джерело», будемо називати суб-джерела інформації просто джерелами інформації, тобто вважати, що  $d' \rightarrow d$ ,  $D' \rightarrow D$ ,  $k \rightarrow m$ . Таким чином кожний процес збору інформації  $a$  в кожний момент часу  $t$  отримує інформацію про об'єкт дослідження з деякого «власного» джерела  $d(a)$ , рішення про вибір якого, він прийняв на даному часовому кроці (рис.1). Окремо слід вказати на можливість використання в постановці задачі поняття «прихованих» джерел інформації (рис.1), які стають доступними процесам збору інформації лише після отримання всієї інформації (або деякої заданої кількості інформації) з відповідних інших джерел.

Вибір процесом джерела інформації в наступному часовому кроці будемо називати перемиканням джерела інформації. Відповідно поведінка окремого процесу визначається його локальною функцією перемикань:

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

яка визначає послідовність перемикань джерел інформації даним процесом. Сукупність дій усіх процесів по перемиканню 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.1) у вигляді матриці  $G_{m \times m}$  (та відповідного графу переходів). Крім того для кожного переходу між джерелами задаються витрати на цей перехід (в цей спосіб, наприклад, моделюються витрати енергії мобільної КФС на збір інформації). Для цього використовується функція витрат  $f_q(d_i, d_j)$ ,  $i \neq j$ .

Таким чином можна сформулювати наступні два варіанта задачі: 1) зібрати максимальну кількість інформації на протязі 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 ( $I_T = I_{\max}$ ,  $T \rightarrow \min$ ,  $\Sigma f_q \rightarrow \min$ ).

Слід зауважити, що при використанні в якості способу визначення та представлення  $C(D)$  поняття взаємної інформації, узагальнений принцип вирішення сформульованих вище задач полягає у наступному. Знайти підмножину  $D_a^* \subseteq D$  таких  $n$  джерел інформації, інформація з яких найменше перекривається між собою, і, в той же час, максимально перекривається з інформацією усіх інших (не обраних вимірювальними агентами) джерел [6].

Процес вирішення задачі автономних розподілених досліджень доцільно представити у вигляді набору незалежних процесів прийняття рішень еквівалентних відповідних процесам збору інформації (як реалізацій локальних функцій перемикання  $\{f_a\}$ ) у складі служби збору інформації. Тоді процедуру дослідження об'єкту  $O$  можна представити як цілеспрямовану колективну поведінку процесів збору інформації, в рамках якої кожний процес 1) оцінює успішність своїх власних дій по перемиканню джерел інформації на основі деякої заданої функції оцінки  $R(a)$ ; 2) обмінюється координаційною та іншою службовою інформацією з іншими процесами згідно обраного способу інформаційної взаємодії  $J(a)$ ; 3) приймає рішення про вибір наступного джерела інформації згідно заданого алгоритму прийняття рішень  $U(a)$ , виходячи з успішності своїх дій та інформації, що надійшла від інших процесів. При цьому для оцінки успішності колективних дій процесів збору інформації доцільно використовувати розподілену службову модель об'єкту дослідження  $M(O)$ , яка зберігається в пристроях пам'яті вимірювальних агентів та поступово уточнюється в ході виконання процедури досліджень.

Окремо слід підкреслити, що головним елементом розглянутої задачі з точки зору побудови процедури дослідження як процесу прийняття рішень є відомості про взаємозалежність джерел інформації  $D$ , тобто структуру їх внутрішніх зв'язків  $C(D)$ . В умовах повної або часткової відсутності інформації про  $C(D)$  процедура дослідження представляє собою процес прийняття рішень в умовах невизначеності, тобто потребує передачі частини повноважень по прийняттю рішень стосовно вибору дій по перемиканню джерел інформації адаптивним процесам збору інформації. При цьому постає проблема одночасного а) збору інформації про об'єкт  $O$  (за допомогою обраних на даний момент джерел інформації) та б) дослідження структури внутрішніх зв'язків між джерелами інформації  $C(D)$ . Для цього необхідно в певний спосіб розподілити «дослідницькі» ресурси мобільної КФС на виконання двох відповідних підзадач.

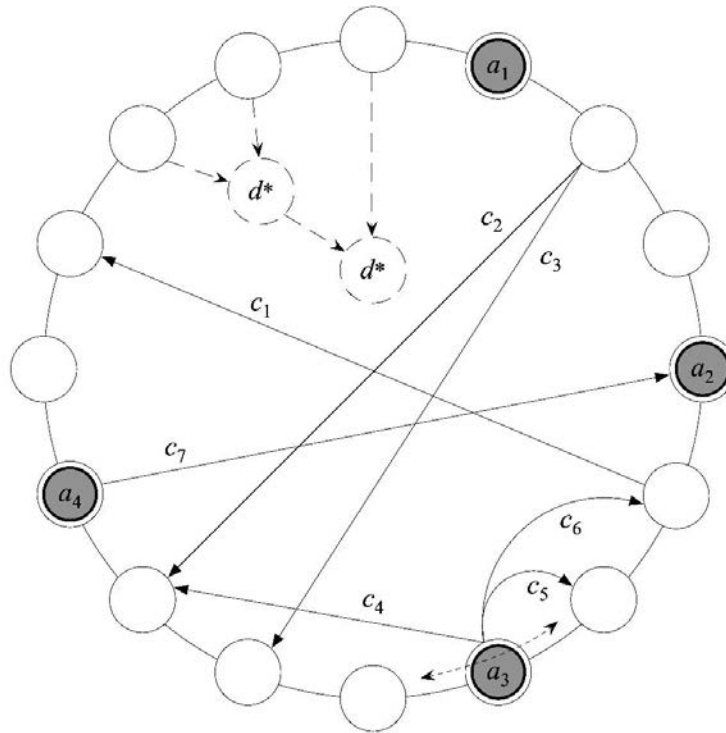


Рис. 1. Множина джерел інформації ( $m=16$ ), об'єднаних графом-кільцем схеми припустимих перемикань ( $d^*$  – приховане джерело інформації,  $\{c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7\} \in C(D)$  – зв'язки між джерелами інформації,  $\{a_1, a_2, a_3, a_4\}$  – процеси збору інформації,  $n=4$ )

### 3. Структурна адаптація процесів збору інформації

Виходячи з ідей самоорганізації [7-9] та гіпотези про відповідність здатного до самоорганізації інструменту дослідження складному нелінійному об'єкту дослідження, в якому розгортаються синергетичні процеси [7-9], розглянемо наступний підхід до вирішення сформульованої вище задачі. В рамках цього підходу під структурою  $S$  будемо розуміти сукупність стійких впорядкованих координаційних зв'язків  $\{\sigma(a, a')\}$  між адаптивними процесами збору інформації, які обумовлені їх поточним функціонально-рольовим розподілом  $P(a, t)$ . Під структурною адаптацією будемо розуміти цілеспрямований процес оптимізації колективних дослідницьких дій процесів збору інформації шляхом відповідних дискретних змін структури  $S$ .

Згідно висвітленої проблематики побудови процедури дослідження як процесу прийняття рішень в умовах невизначеності розіб'ємо цей процес на два змістовних рівня. На першому – функціональному рівні процеси 1) приймають рішення про вибір дослідницьких дій по збору інформації про об'єкт дослідження згідно алгоритму колективної поведінки  $(R_x(a), U_x(a))$ , виходячи з наявних відомостей про  $C(D)$  (тобто виконують свою «основну» функцію); та 2) приймають рішення про вибір дослідницьких дій по збору інформації про структуру внутрішніх зв'язків джерел інформації  $C(D)$  згідно алгоритму колективної поведінки  $(R_y(a), U_y(a))$ , виходячи з відомого вигляду моделі  $C(D)$  (тобто виконують «допоміжну» функцію). На другому – структурному рівні відбувається пошук оптимального співвідношення зусиль процесів збору інформації, 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.2), окремий процес перемикається з виконання «основної» функції на виконання «допоміжної» і навпаки (в залежності від вимог поточної ситуації).

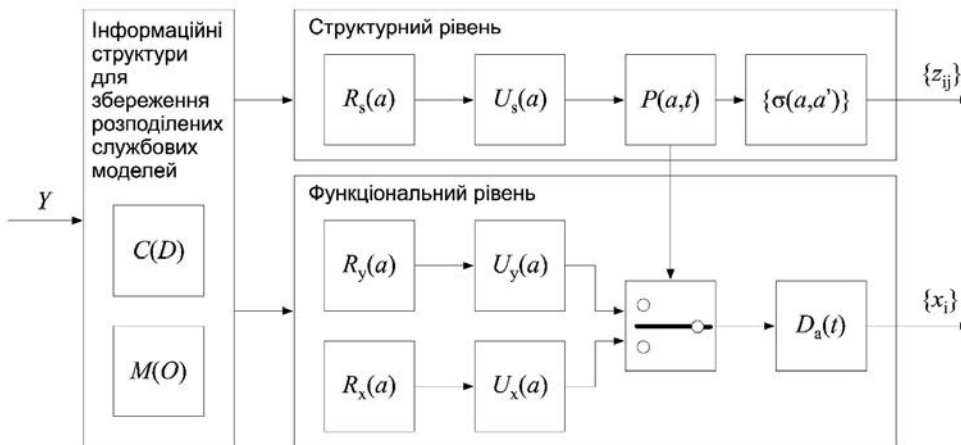


Рис. 2. Узагальнена схема механізму структурної адаптації

Відтак «ядром» механізму структурної адаптації (рис.2) є алгоритм колективної поведінки ( $R_s(a), U_s(a)$ ), згідно якого приймаються рішення про дискретні зміни структури  $S$  на структурному рівні процесу прийняття рішень. Таким чином колектив процесів збору інформації одночасно вирішує дві задачі: 1) оптимізація колективних дій в ході дослідницької взаємодії з об'єктом дослідження (функціональний рівень); та 2) оптимізація внутрішньої між-процесної взаємодії в ході пошуку оптимального функціонально-рольового розподілу процесів  $P(a,t)$  та відповідної структури координаційних зв'язків між ними  $\{\sigma(a,a')\}$  (структурний рівень).

1. Бочкарёв О.Ю. Структурна адаптація автономних розподілених вимірювально-обчислювальних систем // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Комп'ютерні системи та мережі», № 688, 2010. – С.16-22. 2. Logan Yliniemä, Adrian K. Agogino, Kagan Tumer, Multirobot Coordination for Space Exploration, AI Magazine 35(4): 61-74 (2014). 3. Трухаев Р.И. Модели принятия решений в условиях неопределённости. – М.: Наука, 1981. – 257 с. 4. Коган И.М. Прикладная теория информации. – М.: Радио и связь, 1981. – 216 с. 5. Jörn Behrens, Adaptive atmospheric modeling: key techniques in grid generation, data structures, and numerical operations with applications, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. 6. Dariusz Uciński, Measurement Optimization for Parameter Estimation in Distributed Systems, Technical University Press, Zielona Góra, 1999. 7. Мельник А.О., Голембо В.А., Бочкарёв О.Ю. Нові принципи побудови вимірювально-обчислювальних мереж на основі інтелектуальних агентів // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Комп'ютерні системи та мережі», 2003, № 492. – С.100-107. 8. Бочкарёв А.Ю., Голембо В.А. Самоорганизация коллектива мобильных измерительных агентов в задаче распределенных контактных измерений // Искусственный интеллект, Донецк, №3, 2005. – С.723-731. 9. Бочкарёв О.Ю. Колективна поведінка мобільних інтелектуальних агентів в задачах автономних розподілених досліджень // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Комп'ютерні системи та мережі», № 546, 2005. – С.12-17.

Наукові результати, подані у цій статті, було отримано в рамках дослідницького проекту ДБ/КІБЕР з реєстраційним номером 0115U000446, 01.01.2015 – 31.12.2017, фінансово підтриманим Міністерством освіти та науки України.