УДК 004.852; 004.94

П. О. Кравець
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра інформаційних систем та мереж

ІГРОВИЙ МЕТОД ФОРМУВАННЯ КОАЛІЦІЙ В МУЛЬТИАГЕНТНИХ СИСТЕМАХ

Запропоновано ігровий метод формування коаліцій у мультиагентних системах. Розроблено адаптивний алгоритм для розв’язування стохастичної гри. Виконано комп’ютерне моделювання стохастичної гри. Вивчено вплив параметрів на збіжність ігрового методу формування коаліцій. Проаналізовано отримані результати.

Ключові слова: мультиагентна система, формування коаліцій, стохастична гра, адаптивний ігровий метод.

The stochastic game method of coalitions formation in multiagent systems is offered. Adaptive algorithm for stochastic game solving are developed. Computer modelling of stochastic game is executed. The parameter influences on convergence of stochastic game method for coalitions formation are studied. The analysis of received results is realized.

Key words: multiagent system; coalitions formation; stochastic game; adaptive game method.

Вступ

У задачах електронної комерції, організації віртуальних спільнот, розподілених обчислень, сенсорних мереж актуальне динамічне утворення мультиагентних систем на основі механізмів самоорганізації, яка є результатом коаліційної взаємодії агентів та застосування адаптивних правил прийняття рішень, для вироблення яких агенти використовують тільки локальну інформацію [1, 2].

Розподілене розв’язування задач у мультиагентних системах основано на скоординованій роботі коаліцій агентів. Координація ґрунтується на співпраці та взаємодії агентів. У межах коаліції спрощується організація та координація дій агентів, зменшується складність процесу комунікації, скорочується час реакції на зміни зовнішнього світу.

Під коаліцією розуміють спільноту агентів, які на підставі протоколів переговорів вирішують співпрацювати, щоб розв’язати поставлену задачу або досягти певної мети.

Проблема формування коаліцій інтенсивно досліджується у сучасній науковій літературі із застосування мультиагентних систем, наприклад, для автоматичного опрацювання онтологій, пошуку інформації в комп’ютерній мережі, дистанційного навчання, керування організаційними системами, побудови різноманітних віртуальних організацій та спільнот, класифікації та кластеризації даних, керування розподіленими обчисленнями, електронної комерції, організації аукціонів, керування ринком цінних паперів та інвестицій, побудови стратегічних комп’ютерних ігор, імітаційного моделювання розподілених систем, керування суспільними інститутами та суспільно-економічними процесами, моделювання динаміки соціальних процесів, керування соціальними інтернет-сервісами, інформаційної безпеки у мережі інтернет та інших [2–5].

Агенти, які розв’язують спільну задачу, повинні вміти виявляти один одного у мережі. Централізоване розв’язування цієї задачі обмежує автономію агентів і проблематичне для розподілених джерел даних. Ідеально, щоб агенти були здатні групуватися самостійно, формувати коаліції, які мають подібні цілі та атрибути.

Задача формування коаліції агентів подібна до задачі кластеризації даних. В обох задачах необхідно створити групу об’єктів так, щоб об’єкти однієї групи були подібними між собою, а об’єкти різних груп істотно відрізнялися. Задачу пошуку в мережі схожих агентів можна розглядати як задачу об’єднання агентів у кластери [6].

Формування коаліцій у мультиагентних системах формулюється як конкурентна або кооперативна задача зарахування об'єкта до одного із кластерів. Розв'язування подібних задач вивчає теорія ігор, а в умовах невизначеності – теорія стохастичних ігор [7]. У зв'язку з цим з наукової та практичної позицій актуальне застосування методів стохастичних ігор для формування коаліцій в умовах неповноти інформації.

Метою цієї роботи є розроблення ігрового способу формування коаліцій у межах мультиагентної системи в умовах невизначеності. Для досягнення цієї мети необхідно виконати такі завдання: сформулювати задачу ігрового формування коаліцій, розробити адаптивний ігровий метод та алгоритм для розв'язування задачі, розробити комп'ютерну програмну модель ігрового формування коаліцій, проаналізувати отримані результати.

Постановка ігрової задачі формування коаліцій

Нехай задана множина задач $T=\{T_1,T_2,...,T_m\}$ і множина агентів $A=\{A_1,A_2,...,T_n\}$, призначених для їх розв'язування. Кожна задача визначається множиною компетенцій $Q(T_k)=\{Q_1^k,Q_2^k,...,Q_r^k\}$ $(k=1..m)$, необхідних для її розв'язування. Аналогічно, кожен агент визначається множиною здібностей $C(A_i)=\{C_1^i,C_2^i,...,C_s^i\}$ $(i=1..n)$, завдяки яким він може розв'язувати сформульовані задачі. Загалом кількість здібностей агента може перевищувати кількість компетенцій, необхідних для розв'язування задачі: $s\geq r$. Це означатиме, що агент має здібності для розв'язування декількох задач.

Щоб задача T_k могла бути розв'язана, необхідно створити групу агентів $G(T_k)$, об'єднані здібності яких покривають множину компетенцій $Q(T_k)$:

$$\bigcup_{A_i\in G(T_k)} C(A_i)\supseteq Q(T_k). \tag{1}$$

Таку групу агентів $G(T_k)$, об'єднаних для розв'язування задачі T_k, назвемо коаліцією. Максимальна кількість можливих коаліцій дорівнює кількості розв'язуваних задач. Як правило, вводиться обмеження, що один агент не може входити у декілька коаліцій: $G(T_k)\cap G(T_j)=\varnothing$ $(k\neq j)$.

Покриття (1) повинно бути виконано деяким оптимальним або раціональним способом так, щоб забезпечити можливість одночасного розв'язування більшості задач.

Припустимо, що компетенції Q_j^k $(j=1..r)$ оцінено числовими параметрами $x_j^k\in R^1$, які набувають значення на осі дійсних чисел R^1. Подібно до цього, здібності агентів C_l^i $(l=1..s)$ оцінено числовими параметрами $y_l^i\in R^1$.

Формування коаліцій виконаємо методом стохастичної гри, яка задається кортежем $(A,U^i,\Xi^i\,|\,\forall A_i\in A)$, де A – множина агентів або гравців; $U^i=\{u_1^i,u_2^i,...,u_m^i\}$ – множина чистих стратегій i-го гравця, яка визначає його належність до однієї з коаліцій; m – кількість стратегій i-го гравця; $\Xi^i:U\to R^1$ – функція втрат i-го гравця; $U=\underset{A_i\in A}{\times}U^i$ – множина комбінованих стратегій, отриманих спільним вибором усіх гравців.

Суть гри полягає у випадковому переміщенні гравців із однієї коаліції в іншу. Для цього у дискретні моменти часу $t=1,2,...$ кожен гравець здійснює випадковий і незалежний вибір стратегії $u^i\in U^i$, яка визначає його належність до відповідної коаліції. Згідно з (1), після реалізації комбінованої стратегії $u\in U$ гравці зазнають випадкових втрат $x^i(u)$ з апріорі невідомими стохастичними характеристиками:

$$x_t^i(u)=\frac{1}{|G_t(T_k)|}\sum_{A_i\in A}\left(c\left(u_t^k=u_t^i\right)\sqrt{\sum_{j=1}^{r}\sum_{l=1}^{s}\left(x_j^k-y_l^i\right)^2 c\left(Q_j^k=C_l^i\right)}\right), \tag{2}$$

де $|G_t(T_k)| = \sum_{A_l \in A} c\left(u_t^k = u_t^i\right)$ – поточна кількість елементів коаліції, у яку входить i-й гравець; x_j^k – числова оцінка j-ї компетенції, необхідної для розв'язування k-ї задачі; y_l^i – числова оцінка l-ї здібності i-го агента; $c(*) \in \{0,1\}$ – індикатор події.

Ефективність ходу гри оцінюється функціями середніх втрат:

$$\Xi_t^i = \frac{1}{t}\sum_{t=1}^{t} x_t^i \quad \forall A_i \in A. \tag{3}$$

Мета гри полягає у мінімізації системи функцій середніх втрат (3) у часі:

$$\overline{\lim_{t\to\infty}} \Xi_t^i \to \min \quad \forall A_i \in A. \tag{4}$$

Отже, спостерігаючи поточні втрати $\{x_t^i\}$, кожен гравець $A_i \in A$ повинен навчитися вибирати чисті стратегії $\{u_t^i\}$ так, щоб з бігом часу $t = 1, 2, \ldots$ забезпечити виконання системи критеріальних функцій (4).

Розв'язки ігрової задачі повинні задовольняти одну з умов колективної рівноваги, наприклад, Неша або Парето, залежно від методу формування послідовностей стратегій $\{u_t^i\} \forall A_i \in A$.

Метод розв'язування ігрової задачі

Розв'язуватимемо ігрову задачу за допомогою адаптивного рекурентного перетворення векторів змішаних стратегій $p^i = \{p_1^i, p_2^i, \ldots, p_m^i\}$ $\forall A_i \in A$, де p_j^i – імовірність входження i-го агента в j-ту коаліцію.

Побудову методу розв'язування стохастичної гри виконаємо на основі стохастичної апроксимації умови доповняльної нежорсткості для детермінованої гри, справедливої для змішаних стратегій у точках рівноваги за Нешем [8].

Для цього визначимо полілінійну функцію середніх втрат для детермінованої гри:

$$V^i(p) = \sum_{u \in U} v^i(u) \prod_{A_j \in A; u^j \in u} p^j(u^j),$$

де $v(u) = M\{x_t^i(u)\}$.

Тоді умова доповняльної нежорсткості задається у векторній формі:

$$\nabla_{p^i} V^i(p) - e^m V^i(p) = 0 \quad \forall A_i \in A,$$

де $\nabla_{p^i} V^i(p)$ – градієнт полілінійної функції середніх втрат; $e^m = (1_j \mid j = 1..m)$ – вектор, всі елементи якого дорівнюють 1; $p \in S^M$ – комбінована змішана стратегія гравців, задана на одиничному симплексі S^M $(M = m^n)$.

Щоб врахувати розв'язки у вершинах одиничного симплексу, виконаємо зважування вектора доповняльної нежорсткості елементами вектора змішаних стратегій:

$$diag(p^i)\left(\nabla_{p^i} V^i(p) - e^m V^i(p)\right) = 0, \tag{5}$$

де $diag(p^i)$ – квадратна діагональна матриця порядку m, складена з елементів вектора p^i $\forall A_i \in A$.

Враховуючи, що

$$diag(p^i)[\nabla_{p^i} V^i - e^m V^i] = E\{x_t^i[e(u_t^i) - p_t^i] \mid p_t^i = p^i\},$$

на основі методу стохастичної апроксимації [9] отримаємо такий рекурентний вираз:

$$p_{t+1}^i = \pi_{\varepsilon_{t+1}}^N \left\{p_t^i - \gamma_t x_t^i (e(u_t^i) - p_t^i)\right\} \quad \forall A_i \in A, \tag{6}$$

де E – символ математичного сподівання; $p^m_{e_{t+1}}$ – проектор на m-вимірний одиничний симплекс S^m [8]; $g_t > 0$ та $e_t > 0$ – монотонно спадні послідовності додатних величин; $e(u^i_t)$ – одиничний вектор, який вказує на вибір агентом чистої стратегії $u^i_t = u^i \in U^i$.

Збіжність змішаних стратегій (6) до оптимальних значень з імовірністю 1 та в середньоквадратичному визначається співвідношеннями параметрів g_t та e_t, які повинні задовольняти фундаментальні умови стохастичної апроксимації [9].

Параметри g_t та e_t можна обчислити так:

$$g_t = g t^{-a}, \; e_t = e t^{-b}, \tag{7}$$

де $g > 0$; $a > 0$; $e > 0$; $b > 0$.

Проектування на розширюваний e_t-симплекс $S^m_{e_{t+1}} \subseteq S^m$ забезпечує виконання умови $p^i_t[j] \ge e_t$, $j = 1..m$, необхідної для повноти статистичної інформації щодо вибору чистих стратегій, а параметр $e_t \to 0$ є додатковим елементом керування збіжністю рекурентного методу.

Вибір чистих стратегій $u^i_t \;\; \forall A_i \in A$ гравці виконують за випадковими розподілами (6):

$$k = \arg\left(\min_{k=1..m} \sum_{j=1}^{k} p^i_t(u^i_t(j)) > w \right) \in \{1..m\}, \tag{8}$$

де $w \in [0, 1]$ – дійсне випадкове число з рівномірним розподілом.

Стохастична гра розпочинається із ненавчених змішаних стратегій зі значеннями елементів $p^i_0(j) = 1/m$, де $j = 1..m$. Упродовж наступних моментів часу динаміка векторів змішаних стратегій визначається за марковським рекурентним методом (6) – (8).

Отже, в моменти часу t кожен гравець на основі змішаної стратегії p^i_t вибирає чисту стратегію u^i_t і до моменту часу $t+1$ отримує поточні втрати x^i_t, після чого обчислює змішану стратегію p^i_{t+1} згідно з (6).

Завдяки динамічній реорганізації змішаних стратегій на основі опрацювання поточних втрат метод (6) – (8) забезпечує адаптивний вибір чистих стратегій у часі.

Якість ігрового формування коаліцій оцінюють такими характеристиками:

1) функцією середніх втрат мультиагентної системи:

$$\Xi_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \Xi^i_t. \tag{9}$$

2) середньою нормою змішаних стратегій гравців:

$$\Delta_t = \frac{1}{nt} \sum_{t=1}^{t} \sum_{i=1}^{n} \left\| p^i_t \right\|, \tag{10}$$

де $\|*\| \in R^1$ – евклідова норма вектора.

Алгоритм розв’язування стохастичної гри

1. Задати початкові значення параметрів стохастичної гри:

$t = 0$ – початковий момент часу;

m – кількість задач або кількість чистих стратегій гравців;

$X = \{x_1, x_2, ..., x_m\}$ – числові оцінки компетенцій, необхідних для розв’язування задач;

n – кількість гравців;

$Y = \{y_1, y_2, ..., y_n\}$ – числові оцінки здібностей агентів, інакше – множина об’єктів, призначених для кластеризації;

r – кількість характеристичних факторів (компетенцій) $x \in R^r$ задач;

s – кількість характеристичних факторів (здібностей) $y \in R^s$ агентів;

$E_y = (e_y[1], e_y[2], ..., e_y[s])$ – математичне сподівання параметрів об'єкта $y \in Y$;

$D_y = (d_y[1], d_y[2], ..., d_y[s])$ – дисперсія параметрів об'єкта $y \in Y$;

$U^i = \{u^i(1), u^i(2), ..., u^i(m)\}$, $u^i(j) = j$, $i = 1..n$, $j = 1..m$ – вектори чистих стратегій гравців;

$p_0^i = (1/m, ..., 1/m)$, $i = 1..n$ – початкові значення змішаних стратегій гравців;

$g > 0$ – параметр кроку навчання;

$a \in (0,1]$ – порядок кроку навчання;

e – параметр e -симплексу;

$b > 0$ – порядок швидкості розширення e -симплексу;

$t_{\max}$ – максимальна кількість кроків методу.

2. Вибрати варіанти дій (номери коаліцій) $u_t^i \in U^i$ гравців $i = 1..n$ згідно з (8).

3. Отримати поточні значення властивостей об'єкта як випадкові величини із законом розподілу $y_t = Z(m_y, d_y)$.

4. Підрахувати поточні втрати гравців x_t^i, $i = 1..n$ згідно з (2).

5. Обчислити значення параметрів g_t та e_t згідно з (7).

6. Обчислити елементи векторів змішаних стратегій p_t^i, $i = 1..n$ згідно з (6).

7. Обчислити характеристичні функції Ξ_t (9) та Δ_t (10) якості формування коаліцій.

8. Задати наступний момент часу $t := t + 1$.

9. Якщо виконується умова $t < t_{\max}$, то перейти на крок 2, інакше – кінець гри.

Результати комп'ютерного моделювання

Розв'язування задачі формування коаліцій виконаємо за допомогою рекурентного методу (6)–(8) для таких значень параметрів стохастичної гри: $m = 2$, $n = 5$, $r = 2$, $s = 2$, $U^i = \{1, 2\}$, $g = 1$, $e = 0.999/N$, $a = 0.3$, $b = 2$, $t_{\max} = 10^4$.

Нехай компетенції $Q(T_k)$, $k = 1..m$, необхідні для розв'язування задачі, оцінено числовими величинами: $x^1 = \{x_1^1 = 6, x_2^1 = 14\}$, $x^2 = \{x_1^2 = 12, x_2^2 = 8\}$, тобто компетенції задано координатами точок на площині.

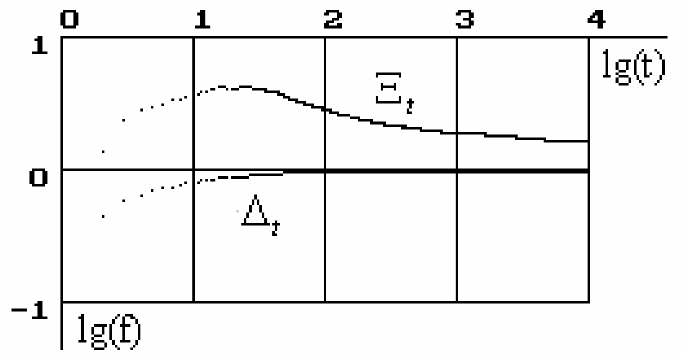
Здібності агентів $C(A_i)$, $i = 1..n$ оцінено такими значеннями: $y^1 = \{y_1^1 = 4, y_2^1 = 15\}$, $y^2 = \{y_1^2 = 10, y_2^2 = 6\}$, $y^3 = \{y_1^3 = 5, y_2^3 = 12\}$, $y^4 = \{y_1^4 = 14, y_2^4 = 9\}$, $y^5 = \{y_1^5 = 7, y_2^5 = 16\}$.

Випадкові відхилення здібностей агентів визначаються нормальним розподілом з параметрами: $e_y = 0$, $d_y = 1$.

Відповідність здібностей агентів потрібним компетенціям визначається евклідовою нормою різниці векторів числових оцінок здібностей і компетенцій.

На рисунку в логарифмічному масштабі зображено графіки функцій середніх втрат гравців Ξ_t та середньої норми змішаних стратегій Δ_t, які характеризують збіжність стохастичної гри формування коаліцій.

Ігровий метод (6)–(8) забезпечує мінімізацію функції Ξ_t середніх втрат у часі. Функція Δ_t середньої норми змішаних стратегій досягає логарифмічного нуля, що ілюструє отримання розв'язків гри у чистих стратегіях.



Розв'язування стохастичної гри у чистих стратегіях

Результатом розв'язування стохастичної гри є формування двох коаліцій агентів. Для розв'язування першої задачі сформовано коаліцію агентів {1, 3, 5}, а для другої задачі – коаліцію {2, 4}. Як видно з одержаних результатів, сформовані коаліції не перетинаються.

Якщо здібності агентів дають їм змогу розв'язувати більше від однієї задачі, то метод (6)–(8) забезпечує розв'язування гри у змішаних стратегіях. У цьому разі деякі з агентів належатимуть обом коаліціям і функція Δ_t не досягатиме логарифмічного нуля.

Висновки

У цій роботі запропоновано новий самонавчальний метод формування коаліцій, побудований на основі результатів теорії стохастичних ігор. Збіжність методу залежить від розмірності та співвідношення параметрів стохастичної гри, які повинні відповідати фундаментальним умовам стохастичної апроксимації.

Запропонований метод належить до класу реактивних методів, які ґрунтуються на опрацюванні поточних реакцій середовища. Тому в цього методу порівняно невисокий, степеневий порядок швидкості збіжності. Зростання швидкості збіжності можна очікувати у разі залучення у гру інтелектуальних агентів.

Розвиток ігрового методу формування коаліцій можливий у напрямку застосування нечіткої логіки для опрацювання компетенцій і здібностей агентів, заданих у вигляді нечітких множин.

1. Wooldridge M. An Introduction to Multiagent Systems / M. Wooldridge. – John Wiley & Sons, 2002. – 366 p. 2. Смирнов А. В. Модели формирования коалиций между кооперативными агентами: состояние и перспективы исследований / А. В. Смирнов, Л. Б. Шереметов // Искусственный интеллект и принятие решений. – № 1. – 2001. – С. 36–48. 3. Самоорганизация и многоагентные системы. I. Модели многоагентной самоорганизации / В. И. Городецкий // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 2012. – № 2. – С. 92–120. 4. Тарасов В. Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика / В. Б. Тарасов. – М.: Эдиториал УРСС, 2002. – 352 с. 5. Швецов А. Н. Агентно-ориентированные системы: от формальных моделей к промышленным приложениям / А. Н. Швецов. – Вологодский гос. техн. унив. – 101 с.: [Электрон. ресурс]. – Режим доспута: http://www. ict. edu. ru/ft/005656/62333e1-st20. pdf. 6. Jain A. K. Data Clustering: A Review / A. K. Jain, M. N. Murty, P. J. Flynn // ACM Computing Surveys. – 1999. – Vol. 31. – No. 3. – P. 264–323. 7. Fudenberg D. The Theory of Learning in Games / D. Fudenberg, D. K. Levine. – Cambridge, MA: MIT Press, 1998. – 292 p. 8. Назин А. В. Адаптивный выбор вариантов / А. В. Назин, А. С. Позняк. – М.: Наука, 1986. – 288 с. 9. Kushner Harold J. Stochastic Approximation and Recursive Algorithms and Applications / Harold J. Kushner, G. George Yin. – New York: Springer Verlag, 2003. – 478 p.