

Паралельні алгоритми інтерактивного оцінювання складних ієрархічно-мережевих систем

Михайло Яджак¹, Марія Тютюнник²

¹ Доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України, вул. Наукова, 3-Б, м. Львів, 79060, Україна, Львівський національний університет імені Івана Франка, вул. Університетська, 1, м. Львів, 79000, Україна, e-mail: yadzhak_ms@ukr.net

² Кандидат технічних наук, Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України, вул. Наукова, 3-Б, м. Львів, 79060, Україна, e-mail: tyutmi@ukr.net

Розглянуто методи інтерактивного оцінювання об'єктів складних ієрархічно-мережевих систем з повністю та частково впорядкованим рухом потоків. Для реалізації цих методів в режимі реального часу запропоновано паралельні алгоритми обчислень. Одержано оцінки прискорення, які підтверджують високу ефективність згаданих алгоритмів. Запропоновані паралельні алгоритми зорієнтовані на виконання на сучасних обчислювальних засобах: комп'ютерах з багатоядерними процесорами, кластерах, гібридних архітектурах та у високопродуктивних розподілених середовищах. Результати роботи можуть бути використані для дослідження процесу функціонування автотранспортних систем великого міста, регіону, країни або залізничної транспортної системи, а також інших складних природних та штучних систем з ієрархічно-мережевою структурою, їх окремих елементів чи підсистем.

Ключові слова: складна мережева система, інтерактивне оцінювання, рух потоків, режим реального часу, паралельний алгоритм, прискорення обчислень, автономні гілки, кластер.

Вступ. Стан та процес функціонування складних ієрархічно-мережевих систем (СІМС) зазвичай контролюють шляхом регулярних планових оглядів та неперервного моніторингу роботи їх об'єктів. В [1] були запропоновані методи локального, прогностичного й агрегованого оцінювання системи, які ґрунтуються на результатах планових досліджень. Головним недоліком таких досліджень є значні витрати матеріальних і фінансових ресурсів на їх проведення. Крім цього, задовільні результати останнього огляду можуть суттєво погіршитись до наступного і окремі складові системи можуть стати вже непридатними для подальшого використання. Виходом з таких кризових ситуацій між плановими дослідженнями є неперервний моніторинг СІМС. Як ефективний засіб неперервного моніторингу системи в [2] було запропоновано метод інтерактивного оцінювання її об'єктів. На підставі аналізу взаємодій таких складових СІМС, як потоки та вузли і ребра, що розміщені на лініях руху потоків, можна формувати висновки про їх стан і процес функціонування. Інтерактивне оцінювання дозволяє вчасно відстежити складові системи, стан яких наближається до незадовільного, та оперативно реагувати на виявлені недоліки. Запропонований у [2] метод дозволяє вия-

вляти і локалізувати саме регулярні негативні фактори, що призводять до відхилення від устанавленого графіка руху потоків. Тобто цей метод можна використовувати для СІМС із повністю впорядкованим рухом потоків, наприклад, для залізничної транспортної системи країни. У працях [3, 4] розроблено методи інтерактивного оцінювання складних мережевих систем з частково впорядкованим рухом потоків, зокрема автотранспортної системи великого міста, на підставі використання U -статистик [5, 6]. На стані та якості роботи таких систем позначається значна кількість негативних випадкових чинників (дорожньо-транспортні пригоди, катаклізми, кліматичні умови, загрози терористичних актів або військових дій тощо).

1. Формулювання проблеми.

Методи інтерактивного оцінювання об'єктів СІМС використовують значні обсяги вхідних даних, які в переважній більшості випадків надходять неперервно. Крім цього, аби вчасно виявити та локалізувати негативні тенденції в стані та функціонуванні об'єктів системи, таке оцінювання необхідно проводити в режимі реального часу. Тому для ефективної реалізації запропонованих в [2–4] методів оцінювання складних мережевих систем необхідно розробляти ефективні паралельні алгоритми обчислень на сучасних високопродуктивних засобах [7, 8]. В цьому і полягає вирішувана нами у даній роботі проблема. Далі опишемо формалізовані процедури інтерактивного оцінювання та побудовані паралельні алгоритми їх реалізації.

2. Інтерактивне оцінювання складних систем із повністю впорядкованим рухом потоків.

У цьому разі інтерактивне оцінювання здійснюється на рівні аналізу взаємодії таких об'єктів СІМС, як потоки P_j ($j = \overline{1, M}$) і лінія $[S_0, S_N]$, що є послідовністю вузлів S_i та ребер D_i ($i = \overline{1, N}$), які їх з'єднують. До того ж $D_i = (S_{i-1}, S_i)$. Вважається, що проходження потоків є повністю детермінованим, тобто визначено графік їх руху.

Процедуру інтерактивного оцінювання об'єктів СІМС можна подати як послідовність наступних кроків [2]:

- 1) обчислення локальних оцінок якості опрацювання потоку P_j у вузлі S_i та якості проходження потоком P_j ребра D_i за період T_k тривалістю T^0 для $j = \overline{1, M}$; $i = \overline{1, N}$; $k = \overline{1, K}$;
- 2) побудова на основі локального оцінювання оцінок першого рівня узагальнення, зокрема:
 - оцінок вузла S_i та ребра D_i за результатами опрацювання потоку P_j протягом періоду T^K , де $T^K = KT^0$ для $j = \overline{1, M}$; $i = \overline{1, N}$;

- оцінок вузла S_i та ребра D_i за результатами проходження сукупності потоків $\{P_j\}_{j=1}^M$ протягом періоду T_k для $i = \overline{1, N}$; $k = \overline{1, K}$;
 - оцінок опрацювання потоку P_j у послідовності вузлів $\{S_i\}_{i=1}^N$ та проходження потоку ребрами $\{D_i\}_{i=1}^N$, що розміщені на лінії, протягом періоду T_k для $j = \overline{1, M}$; $k = \overline{1, K}$;
- 3) обчислення на підставі оцінок першого рівня оцінок другого рівня узагальнення, а саме:
- оцінок опрацювання потоку P_j у послідовності вузлів $\{S_i\}_{i=1}^N$ та проходження потоку ребрами $\{D_i\}_{i=1}^N$, які розміщені на лінії, протягом періоду T^K для $j = \overline{1, M}$;
 - оцінок вузла S_i та ребра D_i за результатами проходження сукупності потоків $\{P_j\}_{j=1}^M$ протягом періоду T^K для $i = \overline{1, N}$;
 - оцінок опрацювання сукупності потоків $\{P_j\}_{j=1}^M$ у послідовності вузлів $\{S_i\}_{i=1}^N$ та проходження цих потоків послідовністю ребер $\{D_i\}_{i=1}^N$, розміщених на лінії, за період T_k для $k = \overline{1, K}$;
- 4) побудова на основі оцінок другого рівня оцінок третього рівня узагальнення, зокрема:
- оцінок опрацювання сукупності потоків $\{P_j\}_{j=1}^M$ у послідовності вузлів $\{S_i\}_{i=1}^N$ та проходження потоками ребер $\{D_i\}_{i=1}^N$, розміщених на лінії, протягом періоду T^K ;
 - агрегованих оцінок проходження сукупності потоків $\{P_j\}_{j=1}^M$ лінією протягом періоду T_k для $k = \overline{1, K}$;
- 5) обчислення на підставі агрегованих оцінок третього рівня узагальнення усередненої оцінки четвертого рівня проходження сукупності потоків $\{P_j\}_{j=1}^M$ лінією протягом періоду T^K .

Для ефективної реалізації описаної процедури на основі використання примітивів *fork, join* [9] запропоновано паралельну алгоритмічну конструкцію:

$$\begin{aligned}
 & \text{fork}(h_1^0, h_2^0, \dots, h_{l_0}^0) \text{ join}, \\
 & \text{fork}(h_1^1, h_2^1, \dots, h_{l_1}^1) \text{ join}, \\
 & \text{fork}(h_1^2, h_2^2, \dots, h_{l_2}^2) \text{ join}, \\
 & \text{fork}(h_1^3, h_2^3, \dots, h_{l_3}^3) \text{ join}, \\
 & h^4,
 \end{aligned}$$

де $h_i^0 (i' = \overline{1, l_0})$, $h_j^1 (j' = \overline{1, l_1})$, $h_k^2 (k' = \overline{1, l_2})$, $h_l^3 (l' = \overline{1, l_3})$ – набори автономних паралельних гілок, в кожному з яких обчислюються відповідно локальні оцінки та оцінки першого, другого і третього рівнів узагальнення; h^4 – фрагмент, в якому обчислюється оцінка четвертого рівня узагальнення. Встановлено, що у разі обмеження обсягу обчислювальних ресурсів прискорення [10] паралельного алгоритму буде близьким до оптимального значення.

2. Інтерактивне оцінювання мережевих систем із частково впорядкованим рухом потоків.

Розглянемо методикау інтерактивного оцінювання складних систем із частково впорядкованим рухом потоків, яка використовує методи U -статистик, на прикладі автотранспортної системи великого міста. Згідно з цією методикою спочатку здійснюється локальне оцінювання, яке складається з таких кроків [3]:

1) визначення на елементарних ділянках шляху та перехрестях автотранспортної мережі (АТМ) міста двох сукупностей: середнього та очікуваного часів перебування на них автотранспортних засобів;

2) на основі визначених сукупностей часів обчислюються головна $U_{i,j}$ - та $U_{i,j}^m$ -, $U_{i,j}^s$ -, $U_{i,j}^f$ -статистики руху на i -й ділянці за період $[0, t_j]$, де $t_j \in [00:00, 24:00]$;

3) на підставі обчислених значень U -статистик формуються уточнені бальні оцінки їхньої поведінки протягом періоду $[0, t_j]$;

4) використовуючи метод лінійної агрегації та одержані на попередньому кроці оцінки, обчислюємо узагальнений висновок про поведінку сукупності середнього часу протягом періоду $[0, t_j]$ та фінальний узагальнений висновок за добу.

Далі, на основі локальних оцінок, будуються агреговані висновки про стан елементарних ділянок, ребер, підмереж району та інфраструктури міста загалом, зокрема:

1) методом нелінійної агрегації (МНА) отримуємо узагальнений висновок про стан досліджуваної ділянки шляху за M^0 діб;

2) аналогічно, використовуючи МНА, будуємо узагальнений висновок про стан ребра АТМ, яке складається з L^0 вже оцінених елементарних ділянок;

3) методом гібридної агрегації (МГА) одержуємо висновок про стан автошляхів району, враховуючи пріоритетність груп ребер та узагальнений висновок для сукупності ребер n -ї групи, отриманий МНА;

4) використовуючи МГА, будуємо узагальнений висновок про стан транспортної інфраструктури міста з урахуванням пріоритетності N^0 груп районів та узагальненого висновку для сукупності районів кожної групи, отриманого МНА.

Аналогічно будуються узагальнені висновки для локальних оцінок, які характеризують ефективність роботи світлофорів на автошляхах міста [3, 4].

Запропоновано паралельний алгоритм для обчислення локальних оцінок про стан елементарних ділянок за вказаний період часу. Цей алгоритм складається

ся із п'яти наборів автономних гілок, в кожному з яких обчислюються відповідно сукупності середнього та очікуваного часів перебування автотранспортних засобів на елементарних ділянках шляху та перехрестях; норми, що використовуються під час обчислення статистик $U_{i,j}$, $U_{i,j}^m$, $U_{i,j}^s$ та $U_{i,j}^c$; самі значення цих статистик; уточнені бальні оцінки поведінки U -статистик протягом заданого періоду та узагальнені висновки на основі методу лінійної агрегації. Одержано прискорення запропонованого паралельного алгоритму, яке підтверджує його ефективність (найменше значення прискорення дорівнює 4 і для добре структурованої АТМ міста воно може лише зростати).

Для реалізації процедури агрегованого оцінювання запропоновано паралельний алгоритм, який складається з трьох наборів автономних гілок, в яких обчислюються агреговані оцінки відповідно першого, другого та третього рівнів узагальнення, і одного фрагменту, в якому обчислюється оцінка четвертого рівня узагальнення. Одержано прискорення цього алгоритму і для найпростішої структури системи встановлено, що воно буде більшим за 11. Очевидно, що для більш реального прикладу досліджуваної автотранспортної системи великого міста прискорення буде зростати.

Як було вказано в [3, 4], прогнозування поведінки самих оцінок об'єктів СІМС доцільно проводити під час планування термінів та обсягів необхідних ремонтних робіт і пов'язаних з ними витрат. Тому для розпаралелювання процесу прогнозування цих оцінок пропонується алгоритмічна конструкція:

$$\text{fork}(h_1^p, h_2^p, \dots, h_{M_1}^p) \text{ join},$$

де h_i^p ($i = \overline{1, M_1}$) – паралельні автономні гілки, в кожній з яких реалізується процедура прогнозування поведінки однієї з оцінок. У поданій конструкції складність паралельних гілок є приблизно однаковою, тому можна очікувати, що прискорення обчислень у цьому випадку буде наближатися до свого оптимального значення, тобто до M_1 . Залежно від доступних обчислювальних ресурсів (кількість процесорів (ядер), обчислювальних вузлів) у кожній гілці можна прогнозувати поведінку певної кількості оцінок. Необхідно зауважити, що одночасно прогнозують узагальнені оцінки стану СІМС та процесу її функціонування.

Висновки. Запропоновано ефективні паралельні алгоритми інтерактивного оцінювання об'єктів складних ієрархічно-мережевих систем з повністю та частково впорядкованим рухом потоків. Як приклади таких систем розглядалися залізнична транспортна система України та автотранспортна система великого міста. Одержано прискорення для побудованих паралельних алгоритмів обчислень, яке підтверджує їх високу ефективність. Побудовані алгоритми зорієнтовані на реалізацію на комп'ютерах з багатоядерними процесорами, кластерах, гібридних архітектурах [11] та високопродуктивних обчислювальних середовищах [12]. Ці результати можна використати під час дослідження в режимі реального часу СІМС у різних предметних галузях, зокрема складних технічних систем [13, 14].

Література

1. Поліщук Д. О. Оцінювання стану колійного господарства Укрзалізниці. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна*. 2012. Вип. 41. С. 203–211.
2. Поліщук Д. О., Поліщук О. Д., Яджак М. С. Комплексне детерміноване оцінювання складних ієрархічно-мережевих систем: IV. Інтерактивне оцінювання. *Системні дослідження та інформаційні технології*. 2016. № 1. С. 7–16.
3. Поліщук О. Д., Яджак М. С. Аналіз ефективності функціонування автотранспортної системи міста методами U -статистик. I. Інтерактивне оцінювання результатів неперервного моніторингу. *Кібернетика та системний аналіз*. 2022. Т. 58, № 3. С. 134–145.
4. Поліщук О. Д., Яджак М. С. Моделі та методи комплексного дослідження складних мережевих систем та міжсистемних взаємодій. Львів: Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України, 2023. 385 с.
5. Korolyuk V. S., Borovskich Y. V. *Theory of U -statistics*. Berlin: Springer Science & Business Media, 2013. 554 p.
6. Lee A. J. *U -statistics: Theory and practice*. London: Routledge, 2019. 320 p.
7. Штейнберг Б. Я., Штейнберг О. Б. Преобразования программ – фундаментальная основа создания оптимизирующих распараллеливающих компиляторов. *Программные системы: теория и приложения*. 2021. Т. 12, № 1. С. 21–113.
8. The list Top500 [Online]. Available: www.top500.org.
9. Вальковский В. А. Распараллеливание алгоритмов программ. Структурный подход. Москва: Радио и связь, 1989. 176 с.
10. Ортега Дж. Введение в параллельные и векторные методы решения линейных систем. Москва: Мир, 1991. 367 с.
11. Попов О. В., Рудич О. В. До розв'язування систем лінійних рівнянь на комп'ютерах гібридної архітектури. *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Фізико-математичні науки: зб. наук. праць*. 2017. Вип. 15. С. 158–164.
12. Polishchuk O., Polishchuk D., Tyutyunnyk M., Yadzha M. Big Data Processing in complex hierarchical network systems. *arXiv: 1603.00633 [physics.data-an]*. 2016. 7 p.
13. Berbyuk V. E., Demidyuk M. V. Parametric optimization in problems of dynamics and control of motion of an elastic manipulator with distributed parameters. *Mechanics of Solids*. 1986. Vol. 21, is. 2. P. 78–86.
14. Берб'юк В. Є., Демидюк М. В., Литвин Б. А. Параметрична оптимізація ходи та пружних характеристик пасивних приводів двоногого крокуючого робота. *Вісник Київського університету. Серія: Кібернетика*. 2002. № 3. С. 17–20.

Parallel algorithms for interactive evaluation of complex hierarchical-network systems

Yadzhak Mykhailo, Tyutyunnyk Maria

Methods of interactive evaluation of complex hierarchical-network systems with fully and partially ordered flows movement are considered. For realization these methods in real time the parallel computation algorithms are proposed. Speed up estimates were obtained, which confirm the high efficiency of the mentioned algorithms. The proposed parallel algorithms are oriented to execution on modern computing means: computers with multi-core processors, clusters, hybrid architectures and in high-performance distributed environments. The results of the work can be used to study the functioning process of motor transport systems for large city, region, country or railway transport system and other complex natural and artificial systems with a hierarchical-network structure, their elements or subsystems.

Keywords: complex network system, interactive evaluation, stream movement, real-time mode, parallel algorithm, acceleration of calculations, autonomous branches, cluster.

Отримано: 15 грудня 2023 р.