

УДК 004.773.5

**Є. В. ПРОКОПЕНКО**, кандидат технічних наук; доцент кафедри зв'язку, автоматизації та захисту інформації Національної академії Державної прикордонної служби України імені Богдана Хмельницького, м. Хмельницький

## **ДОСЛІДЖЕННЯ АДАПТИВНИХ МЕТОДІВ МАРШРУТИЗАЦІЇ**

У статті досліджено науковий напрямок *Natural Computing* – “Природні обчислювання”, які об'єднують математичні методи, в які закладені принципи природних механізмів прийняття рішень. Ці механізми забезпечують адаптацію флори та фауни до навколишнього середовища на протязі мільйонів років. Імітація самоорганізації мурашкової колонії складає основу мурашкових алгоритмів оптимізації – нового перспективного методу природних обчислень.

Колонія мурах розглядається як багатоагентна система, в якій кожний агент (мураха) функціонує автономно по дуже простим правилам. У противагу майже примітивній поведінці агентів, поведінка усєї системи виходить напрочуд дуже розумною. Усе це дозволяє рекомендувати застосування мурашиних алгоритмів для вирішення складних задач маршрутизації – вибору оптимального маршруту складних телекомунікаційних мереж.

**Ключові слова:** природні обчислення, мурашкова колонія, феромон, багатоагентна система, алгоритм маршрутизації.

**Постановка проблеми у загальному вигляді.** У Державній прикордонній службі України питання розвитку інформатизації корпоративної діяльності є одним з найважливіших напрямків підвищення ефективності управління. Виходячи із цього, розвиток телекомунікаційних мереж та інформаційних систем у Державній прикордонній службі України сьогодні є об'єктивною потребою і здійснюється з урахуванням світової тенденції побудови та інтеграції мереж, засобів та послуг зв'язку. Ця тенденція вимагає запровадження обладнання і технологій, що відповідають сучасним міжнародним стандартам, рекомендаціям та необхідним показникам якості обслуговування[1].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано вирішення даної проблеми та на які опирається автор.** В останні роки активно впроваджується науковий напрямок під назвою “Природні обчислення” (англ. Natural computing), який об'єднує математичні методи, де закладені принципи природних механізмів прийняття рішень. Хоча перші дослідження в даному напрямку проводили Р. Декарт, В. Ешби, першим почав вивчати поведінку в колоніях комах П. Грассе, він досліджував механізми координації поведінки термітів при будівництві гнізда.

При цьому необхідно визнати, що використання мурашиних алгоритмів для вирішення складних задач маршрутизації залишається проблемою, що потребує подальшого більш глибокого дослідження.

З кожним роком кількість користувачів телекомунікаційної мережі Інтранет Державної прикордонної служби України зростає. Це, в свою чергу, обумовлює зростання складності структур мереж і взаємодії між ними. Відповідно ускладнюється і пошук оптимальних шляхів в мережі для швидкої доставки запитів користувачів мережі, у зв'язку з чим і ускладнюється задача маршрутизації.

**Метою статті** є дослідження адаптивних методів маршрутизації телекомунікаційних систем.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Мурахи належать до так званих “соціальних комах”, тобто комах, які живуть в межах

певного колективу – сім'ї або колонії. На Землі близько двох відсотків комах є “соціальними”, половина з яких припадає на мурах. Поведінка мурах під час транспортування їжі, обходження перешкод, побудови мурашника і т. і., наближається до теоретично оптимального значення. Основу “соціальної” поведінки мурах складає самоорганізація. Самоорганізація – сукупність динамічних механізмів, за допомогою яких система досягає глобальної мети в результаті взаємодії елементів на низькому рівні [4]. Принциповою особливістю такої низькорівневої взаємодії є – використання елементами системи лише локальної інформації, без будь-якого централізованого управління та звернення до глобального образу, який представляє систему у зовнішньому світі [5].

Самоорганізація є результатом взаємодії чотирьох компонентів: випадковість; позитивний зворотний зв'язок; негативний зворотний зв'язок; багатократність взаємодій.

Мурахи використовують два способи передачі інформації: прямий – обмін продовольством, візуальний, хімічні контакти тощо, і непрямий – стігмержі (англ. Stigmergy). Стігмержі – це рознесений у часовому просторі тип взаємодії між елементами системи, коли один суб'єкт взаємодії змінює деяку частину навколишнього середовища, а решта пізніше використовують інформацію про її стан, коли знаходяться в її околиці [3]. Біологічно стігмержі здійснюється через феромон. Феромон – спеціальний секрет, який відкладається як слід під час руху мурахи. Чим вище концентрація феромону на стежці, тим більше мурах буде рухатися нею. Феромон з часом випаровується, що дозволяє мурашкам адаптувати свою поведінку до змін навколишнього середовища. Розподіл феромону простором пересування мурах є своєрідною глобальною пам'яттю, яка динамічно змінюється. Кожна мураха може сприймати і змінювати лише локальну комірку цієї глобальної пам'яті мурашника.

Розглянемо, як колективна поведінка мурах забезпечує знаходження найкоротшого шляху до їжі на прикладі експериментів на

асиметричному маршруті [5]. Даний маршрут (рис. 1) з'єднає гніздо мурах з джерелом їжі двома гілками різної довжини.

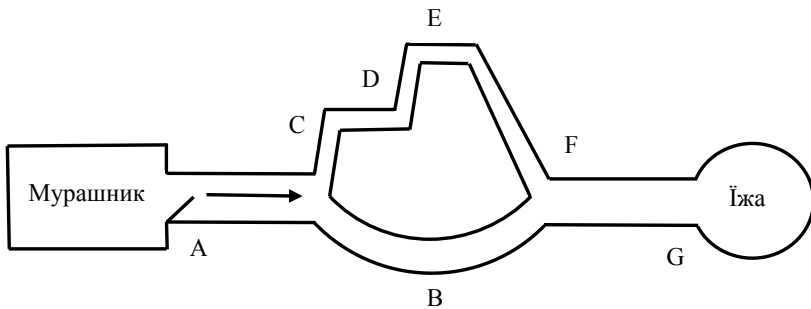
Експерименти проводилися за такою схемою:

на першому етапі будується маршрут А–В–С–D–E–F–G;

на другому етапі відчиняються дверцята в точці А;

на наступному етапі фіксуємо кількість мурах, які обрали довгий (А–С–D–E–F–G) і короткий (А–В–G) шлях.

На початку експерименту перші мурахи знаходили джерело їжі любим шляхом та повертались до гнізда, залишивши за собою шлях із феромонів. Слід зазначити, що мурахи обирали обидві гілки з однаковою ймовірністю, тому що на шляху не було феромонів. Через деякий час майже всі мурахи пересуваються найкоротшим маршрутом А–В–G (рисунок).



Модель асиметричного маршруту руху мурах

Це можна пояснити таким чином: мурахи, які обрали короткий маршрут А–В–G, швидше повертались з їжею в гніздо, залишаючи після себе слід феромонів на короткій гілці маршруту. При наступному виборі шляху мурахи віддавали перевагу коротшій гілці, так як на ній була вища концентрація феромонів. Таким чином, феромон швидше накопичується на гілці А–В–G, що підштовхує мурах до вибору найкоротшого маршруту.

Кожна мураха зберігає в пам'яті список пройдених ним вузлів. Цей список називають списком заборон (англ. Prohibited-list) або просто пам'яттю мурахи. Вибираючи вузол для подальшого кроку,

мураха “пам’ятає” про вже пройдені вузли і не розглядає їх як можливі для переходу. На кожному кроці список заборон поповнюється новим вузлом, а перед новою ітерацією алгоритму – тобто перед тим, як мураха знову проходить шлях – він очищується.

Окрім списку заборон, при виборі вузла для переходу мураха керується “привабливістю” маршруту, який він може пройти. Він залежить, по-перше, від відстані між вузлами (тобто від складності маршруту), а по-друге, від слідів феромонів, залишених на ребрі, який пройшли раніше мурахи. Природно, що на відміну від складностей шляхів, які є константними, сліди феромонів оновлюються на кожній ітерації алгоритму: з часом сліди випаровуються, а мурахи, які проходять, посилюють їх. Алгоритми, що застосовуються для пошуку оптимальних рішень, пропоную розглянути на прикладі рішення задачі вибору оптимального маршруту між маршрутизаторами телекомунікаційної мережі.

Багаторазовість взаємодії реалізується ітераційним пошуком маршруту одночасно декількома мурахами. Позитивний зворотний зв’язок реалізується як імітація природної поведінки мурахи типу “залишення слідів – пересування слідами”. Чим більше слідів залишено на стежці – ребрі графа, тим більше мурах буде рухатись нею. При цьому на стежці з’являються нові сліди, які залишають додаткові мурахи. Для вирішення задачі маршрутизації позитивний зворотний зв’язок реалізується таким стохастичним правилом: “ймовірність включення ребра графа в маршрут мурахи пропорційний кількості феромону на ній». Використання цього стохастичного правила забезпечує реалізацію іншого компонента поведінки мурах – випадковості. Кількість феромону, який відкладає мураха на ребрі графа, є обернено пропорційною величиною до довжини відповідного маршруту в мережі. Чим коротший маршрут знайшов мураха, тим більше феромону буде відкладено на відповідних ребрах графа. Використання лише позитивного зворотного зв’язку приводить до передчасного завантаження алгоритму, тобто до випадку, коли всі мурахи рухаються одним і тим самим субоптимальним маршрутом. Для запобігання цьому використовується негативний зворотний

зв'язок – випаровування феромону. Час випаровування феромону не повинен бути дуже тривалим, тому що при цьому виникає загроза збігу маршрутів всіх мурах до одного субоптимального рішення. З іншого боку, час випаровування не повинен бути і коротким, щоб не призвести до некооперативної поведінки мурах через втрату пам'яті колонії. Розглянемо дію мурашиних алгоритмів при побудові таблиці маршрутизації телекомунікаційної мережі. Перехід мурахи з маршрутизатора  $a$  до маршрутизатора  $b$  на ітерації  $t$  алгоритму залежить від таких складових: prohibited-list, видимості до наступного маршрутизатора та віртуального сліду феромону. Prohibited-list збільшується з розширенням маршруту і заповнюється нулями на початку кожної ітерації алгоритму. Позначимо, як  $Q^k$  список маршрутизаторів, які ще потрібно відвідати мураці  $k$ , який знаходиться в маршрутизаторі  $i$ . Видимість – це величина, зворотна до відстані:

$$l = \frac{1}{d_{ij}}, \quad (1)$$

$d_{ij}$  – відстань між маршрутизаторами  $i$  та  $j$ .

Видимість базується тільки на локальній інформації і являє собою “бажання” вибору вузла  $i$  під час перебування в вузлі  $j$ . Чим ближче маршрутизатори  $i$  та  $j$ , тим більше бажання потрапити до них. Віртуальний шлях феромону на маршруті  $i-j$  являє собою “бажання, що підкріплено досвідом» переходу від маршрутизатора  $i$  до  $j$ . Інформація, яку несе слід феромону, змінюється під час оптимізації і відображає надбаний мурахами досвід. Кількість віртуального феромону на шляху  $i-j$  під час  $t$ -ої ітерації алгоритму позначимо як  $\tau_{ij}(t)$ . Ймовірність переходу  $k$  мурахи від маршрутизатора  $i$  до  $j$  на  $t$ -ій ітерації розраховується за допомогою такого правила [5]:

$$P_{ij}^k(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\beta_{ij}]^\gamma}{\sum_{i \in J_i^k} [\tau_{ij}(t)]^\alpha [\beta_{ij}]^\gamma}, \text{ якщо } j \in J_i^k, \quad (2)$$

$$P_{ij}^k(t) = 0, \text{ якщо } j \notin J_i^k$$

де  $\alpha$  та  $\gamma$  – два регульованих параметри, які є показниками інтенсивності сліду феромону і видимості.

Якщо  $\alpha = 0$ , то найбільш ймовірним буде перехід до наступного маршрутизатора. У класичній теорії оптимізації таку поведінку називають “жадібний алгоритм” (англ. Greedy algorithm). Жадібний алгоритм – простий і прямолінійний евристичний алгоритм, який приймає найкраще рішення, виходячи з наявних на поточному етапі даних, не турбуючись про можливі наслідки, сподіваючись врешті-решт отримати оптимальне рішення [2].

Якщо  $\gamma = 0$  то працює лише феромонне підсилення, яке призводить до швидкого завершення роботи алгоритму через збіг маршрутів усіх мурах в одному субоптимальному рішенні. Після завершення маршруту кожна мураха  $k$  відкладає на шляху  $(i-j)$  наступну кількість феромону (3):

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{Q}{L^k(t)}, & \text{якщо } (i, j) \in T^k(t), \\ 0, & \text{якщо } (i, j) \notin T^k(t) \end{cases}, \quad (3)$$

де  $T^k(t)$  – маршрут, пройдений мурахою  $k$  на ітерації  $t$ ;  $L^k(t)$  – довжина маршруту;  $Q$  – регульований параметр, його значення вибирається одним значенням з довжиною оптимального маршруту.

Для розв’язання задачі маршрутизації з великою кількістю кінцевого обладнання доцільно використовувати список кандидатів (мурах) – короткий перелік рекомендованих вузлів, в які може перейти мураха з даного вузла. Мураха обирає не рекомендований вузол лише тоді, коли вона вже пройшла весь список маршрутизаторів мережі. Список маршрутизаторів формують евристично на основі апріорних знань про завдання, яка вирішується, або на базі інформації, яка динамічно оновлюється під час маршрутизації. Список кандидатів дозволяє виключити заздалегідь неперспективні варіанти. Це дозволяє направити мурах на дослідження найбільш багатообіцяючих маршрутів і тим самим значно скоротити область пошуку оптимального маршруту.

**Висновки.** Маршрутизація відіграє важливу роль в обслуговуванні комунікаційних мереж. При правильно організованій

маршрутизації можливо оптимізувати такі важливі показники продуктивності мережі як пропускна здатність і затримка пакетів. Мурашині алгоритми маршрутизації ґрунтуються на імітації самоорганізації соціальних комах за допомогою використання динамічних механізмів, у зв'язку з чим система досягає глобальної мети за рахунок локальної низькорівневої взаємодії елементів. У статті на прикладі задачі маршрутизації показано, як в алгоритми вирішення дискретних задач оптимізації впровадити складові самоорганізації мурах: випадковість, багаторазовість взаємодії, негативні і позитивні зворотні зв'язки. Це дозволяє рекомендувати застосування мурашиних алгоритмів для вирішення задачі оптимізації маршрутизації телекомунікаційних мереж.

**Перспективи подальших розвідок у даному напрямку.** Перспективними шляхами покращення мурашиних алгоритмів є online адаптація параметрів за допомогою бази нечітких правил, а також їх гібридизація з іншими методами природних обчислень, наприклад генетичними алгоритмами.

### Список використаної літератури

1. Концепція розвитку Державної прикордонної служби України на період з 2006-го по 2015-ті роки. – К. : АДПСУ, 2006 р.
2. [http://uk.wikipedia.org/wiki/Жадібний\\_алгоритм](http://uk.wikipedia.org/wiki/Жадібний_алгоритм).
3. [http://www.stigmergicsystems.com/stig\\_v1/stigrefs/article1.html](http://www.stigmergicsystems.com/stig_v1/stigrefs/article1.html).
4. Штовба С. Д. Муравьиные алгоритмы / С. Д. Штовба // Exponenta Pro. Математика в приложениях. – 2003.
5. Ермолаев С. Ю. Муравьиные алгоритмы оптимизации / С. Ю. Ермолаев // Информационные технологии. 2008. – Т. 6, № 1. – С. 23–29.

*Рецензент – кандидат технічних наук, доцент Мул Д. А.*

*Стаття надійшла до редакції 3.02.2014.*

**Прокопенко Е. В. Исследование адаптивных методов маршрутизации**

В статье проведено исследование научного направления Natural Computing – “Природные вычисления”, объединяющих математи-



ческие методы, в которые заложены принципы природных механизмов принятия решений. Эти механизмы обеспечивают адаптацию флоры и фауны к окружающей среде на протяжении миллионов лет. Имитация самоорганизации муравьиной колонии составляет основу муравьиных алгоритмов оптимизации – нового перспективного метода природных вычислений.

Колония муравьев рассматривается как многоагентная система, в которой каждый агент (муравей) функционирует автономно по очень простым правилам. В противовес почти примитивному поведению агентов поведение всей системы получается на удивление очень разумной. Все это позволяет рекомендовать применение муравьиных алгоритмов для решения сложных задач маршрутизации – выбора оптимального маршрута сложных телекоммуникационных сетей.

***Ключевые слова:** природные вычисления, муравьиная колония, феромон, многоагентная система, алгоритм маршрутизации.*

*Prokopenko E. V. Study of adaptive routing methods*

In the modern conditions of the development of the State Border Guard Service of Ukraine information corporate performance is one of the most important methods to increase management efficiency. Therefore, today the development of telecommunications networks and information systems in the State Border Guard Service of Ukraine is an objective necessity and carried out taking into account the global trends in the construction and integration of networks, equipment and services provider. This trend requires the introduction of equipment and technologies that meet modern international standards, guidance and indicators of quality of service.

To ensure the quality of service of telecommunication systems they are required to have a mechanism that allows fast and lossless agents to deliver data from one user to another. One of the main locations is in the given routing mechanism. Properly organized in conjunction with the routing component access control overloading streams and fully guarantee the quality of a network. At present, the telecom network of the

State Border Guard Service of Ukraine used the method of static routing that provides input and change of address tables manually by the network administrator. In this method of routing there are several defects that significantly reduce the efficiency of network service.

Due to continuous growth of information transmitted and its heterogeneity of content and physical nature and complexity of expanding departmental telecommunications network it is an urgent task to develop dynamic (adaptive) methods of information management. From the speed of data acquisition and, ultimately, operational decision-making depends on the solution of this problem in many respects.

Recently, a very active research area developed Natural Computing. They combine mathematical methods, which laid down the principles of natural mechanisms of decision-making:

- geneticalgorithms;
- evolutionprogramming;
- neuralnetwork computing;
- DNA computing;
- cellular Automata;
- antcolony algorithms.

These mechanisms orient flora and fauna towards adaptation to their environment over millions years. Simulated self-organization is the foundation of the colony, antsalgorithms optimization – a new promising method of natural computing.

A colony of ants is considered as a multi-agent system in which each agent (ant) operates independently following very simple rules. In contrast, almost primitive behavior of the agents, the behavior of the whole system goes surprisingly very reasonable. This allows you to recommend the use of ant algorithms to solve complex problems routing – choosing the optimal route of complex telecommunications networks.

**Keywords:** *natural computing, ant colony, pheromone, multi-agent system, the routing algorithm.*