

РЕКОНФІГУРАЦІЯ СТРУКТУРИ ЗВ'ЯЗКІВ МЕРЕЖ НА ОСНОВІ ІГРОВОЇ МОДЕЛІ

Гриньов С. А., Шергін В. В.

Науковий керівник – д.т.н., проф. Аврунін О. Г.

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків

e-mail: serhii.hrynov@nure.ua, valentyn.sherhin@nure.ua

The problem of reconfiguring connections between nodes of scale-free networks is considered. Existing evolutionary models of networks have built-in mechanisms for network growth through the addition of new nodes with edges (links) incident to them, but they do not have a mechanism for redirecting or breaking existing links, so the structure of links remains static. We propose to use a game model for network rewiring. Nodes are considered as players – intelligent agents interacting with each other according to the model of the bimatrix game "battle of sexes". Links that are unfavorable for the player are broken and redirected to other nodes. As a result, the network is split into two weakly connected clusters.

Відомо, що більшість мереж реального світу [1, 2, 3] є безмасштабними (або інваріантними до масштабу, scale-free networks). Зазначену властивість мають як соціальні мережі, так і мережі технічної природи (електричні, транспортні), біологічної тощо. Мережа зветься безмасштабною, якщо розподіл вузлів за кількістю зв'язків є ступеневим принаймні асимптотично:

$$Pr(k) \sim k^{-\gamma} \quad \text{при} \quad k \rightarrow \infty. \quad (1)$$

Таким чином, ймовірність того, що вузол матиме рівно k зв'язків, пропорційна до $k^{-\gamma}$. Зазначена залежність, зазвичай, виконується тим точніше, чим більшим є k .

Параметр γ називається показником скейлінгу та, як правило, знаходиться у межах $\gamma \in (2; 3]$.

Найвідомішою та водночас найпростішою моделлю безмасштабних мереж є модель Барабаші-Альберт [1]. Мережа формується покроково шляхом додавання на кожному кроку нового вузла та встановлення ним фіксованої кількості (m) зв'язків з вже існуючими. При цьому кінець кожного зв'язка обирається на основі правила переважного приєднання: ймовірність приєднання нового вузла до існуючого i пропорційна ступеню цього вузла i :

$$Pr_i = \frac{\deg_i + a}{\sum_i (\deg_i + a)} \quad (2)$$

У класичній моделі Барабаші-Альберт параметр $a \geq 0$ (додаткова привабливість вузла) дорівнює нулю.

На сьогоднішній день існує багато варіацій та узагальнень моделі Барабаші-Альберт, проте всі вони успадковують таку властивість, як сталість структури зв'язків [2]. Інакше кажучи, такі моделі не містять механізму реконфігурації мережі, зокрема перенаправлення існуючих зв'язків. Такий механізм існує, наприклад, в моделі “світ тісний” [3], але вона, по-перше, не є еволюційною моделлю (тобто кількість вузлів та зв'язків є сталою), а по-друге, відповідна мережа не є безмасштабною, тобто розподіл вузлів за кількістю зв'язків не є ступеневим (1).

В роботі пропонується використання ігрової моделі реконфігурації мережі. Вузли мережі розглядаються як гравці – інтелектуальні агенти, які взаємодіють між собою згідно з поточною конфігурацією мережі. Подібний підхід застосовувався у [4, 5], але метою цих досліджень була сама по собі еволюція стратегій (станів) вузлів-гравців, тобто зворотній вплив (результатів гри на структуру зв'язків) був відсутній. В даній роботі ігрова взаємодія між вузлами-гравцями-агентами вводиться та застосовується саме як механізм реконфігурації зв'язків у мережі. За результатами цієї взаємодії деякі зв'язки розглядаються гравцями (обома чи одним з них) як не вигідні та розриваються. Ігрові моделі є найбільш природними для аналізу мультиагентних середовищ, тобто середовищ взаємодії між інтелектуальними агентами, інтереси яких не співпадають між собою. Стрімке поширення інтелектуальних агентів з елементами штучного інтелекту зумовлює актуальність досліджень, які розглядаються.

Однією з класичних ігрових моделей є гра “сімейна суперечка” [4] (в англійській літературі застосовується більш агресивна назва – битва статей: “battle of the sexes”). Вона є класичною парною біматричною грою, яка моделює ситуацію з декількома рівновагами. Матриці виграшів гравців (I та II) мають наступний вигляд:

$$I: \begin{pmatrix} A & -1 \\ -1 & a \end{pmatrix}, \quad II: \begin{pmatrix} a & -1 \\ -1 & A \end{pmatrix}, \quad A > a > 0. \quad (3)$$

Легко бачити, що рівноважними (та одночасно й оптимальними) сполученнями стратегій гравців є (1,1) та (2,2). Проте, ці рівноваги є суттєво різними з точки зору самих гравців: один виграє багато (A), а виграш іншого є невеликим (a). Якщо ж гравці не узгодять свій вибір (тобто один обере стратегію 1, а інший стратегію 2), то обидва програють.

Узгодження стратегій гравців у їхній сукупності може відбуватись одним, або одночасно обома з наступних шляхів: шлях поступок, або шлях реконфігурації зв'язків.

Згідно з першим підходом гравець за результатом раунду гри корегує свою стратегію, підлаштовуючись під оточення (тобто переймає вибір більшості). Структура зв'язків при цьому не змінюється.

Згідно з другим підходом гравці є впертими (тобто первісно обрані стратегії залишаються незмінними), але за результатами розіграшу кожен гравець може (з деякою ймовірністю $p > 0$) розірвати не вигідний для нього зв'язок, тобто замінити партнера-сусіда-суперника. Звісно, що для збереження властивості безмасштабності (2), новий партнер має обиратись за правилом переважного приєднання.

У чисельному експерименті було згенеровано випадкову мережу Барабаші-Альберт з $N = 1000$ вузлів. Вузлам (гравцям) було випадково співставлено один з двох типів: стратегія 1, чи стратегія 2. Проводилось моделювання взаємодії гравців за моделлю "сімейна суперечка" (3). За результатом кожного раунду проводилась реконфігурація зв'язків. Параметри гри становили $A = 10$, $a = 1$, $p = 0.01$.

За результатами моделювання було встановлено, що за умов впертості гравців мережа прямує до дводольної структури, тобто розгалужується на два кластери, слабо зв'язані між собою.

Дослідження взаємовпливу підлаштування гравців через поступку та через реконфігурацію зв'язків є перспективним напрямком подальших досліджень.

Список використаних джерел:

1. Newman, M. "The structure and function of complex networks." SIAM Review, Vol. 45, pp. 167–256 (2003).
2. Di Lucchio, L.; Modanese, G. "Generation of Scale-Free Assortative Networks via Newman Rewiring for Simulation of Diffusion Phenomena." Stats 2024, 7, 220–234. <https://doi.org/10.3390/stats7010014>.
3. Shergin, V., Chala, L., Udovenko, S., & Pogurskaya, M. (2021). Assortativity of an Elastic Network with Implicit Use of Information about Nodes Degree. In IntSol (pp. 131-140).
4. Miękisz, J., Mohamadichamgavi, J., and Łącki, J., "Phase transitions in the Prisoner's Dilemma game on scale-free networks", arXiv e-prints, 2023. doi:10.48550/arXiv.2304.02896.
5. Shergin, V.L., Chala, L.E., Udovenko, S.G. (2022) "Explicit estimates of the probabilities of Nash-equilibrium strategies in LUPI game" Міжнародна науково-практична конференція "Комбінаторні конфігурації та їхні застосування". – Кропивницький – Запоріжжя, 2022.