



Н. В. Шаронова¹, Г. А. Плехова², С. М. Неронов³, М. В. Костікова⁴, Д. О. Плехов⁵

¹НТУ «ХПІ», м. Харків, Україна, nvsharonova@ukr.net, ORCID iD: 0009-0004-9878-1761

²ХНАДУ, м. Харків, Україна, plehovaanna11@gmail.com, ORCID iD: 0000-0002-6912-6520

³ХНАДУ, м. Харків, Україна, sernikner@gmail.com, ORCID iD: 0000-0003-2381-1271

⁴ХНАДУ, м. Харків, Україна, kmv_topaz@ukr.net, ORCID iD: 0000-0001-5197-7389

⁵ХНАДУ, м. Харків, Україна, plehov@gmail.com, ORCID iD: 0009-0004-7873-1716

СПОСІБ ФОРМУВАННЯ МАРШРУТІВ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ В МОБІЛЬНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ

У роботі запропонований спосіб формування маршрутів передачі даних в мобільних інформаційних мережах, який належить до галузі спеціальної техніки зв'язку, зокрема, до систем зв'язку, а саме, до інформаційних мереж спеціального призначення із можливістю самоорганізації, у яких застосовуються спеціальні методи передачі даних. Спосіб відрізняється тим, що на етапі формування множини маршрутів передачі інформації в інформаційній мережі вузлами a та b шляхом передачі службових повідомлень в інформаційній мережі з можливістю до самоорганізації відбувається прогнозування стану маршрутів передачі інформації за критерієм максимуму пропускної спроможності шляхом порівняння отриманих значень пропускної спроможності з граничними показниками мережі. Для інформаційних мереж є актуальним завданням забезпечення заданої пропускної спроможності, забезпечення завадозахищеності та скритності. Технічний результат від застосування зазначеного способу полягає у зменшенні обчислювальних затрат, підвищенні швидкості передачі інформації, забезпечення можливості здійснювати прогнозування стану маршрутів передачі інформації в умовах високої мобільності мобільних інформаційних мереж спеціального призначення.

МОБІЛЬНІ ІНФОРМАЦІЙНІ МЕРЕЖІ, ПРОГНОЗУВАННЯ, МАРШРУТ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ, НЕЙРОННА МЕРЕЖА, АЛГОРИТМ НАВЧАННЯ

N. V. Sharonova, G. A. Pliekhova, S. M. Neronov, M. V. Kostikova, D. O. Pliekhov. Method of forming data transmission routes in mobile information networks. The paper proposes a method for forming data transmission routes in mobile information networks, which belongs to the field of special communication technology, in particular, to communication systems, namely, to special-purpose information networks with the ability to self-organize, in which special data transmission methods are used. The method differs in that at the stage of forming a set of information transmission routes in the information network by nodes a and b by transmitting service messages in the information network with the ability to self-organize, the state of information transmission routes is predicted using the maximum throughput criterion by comparing the obtained throughput values with the network's limit indicators. For information networks, it is an urgent task to ensure a given bandwidth, ensure interference immunity, and secrecy. The technical result of using the specified method consists in reducing computational costs, increasing the speed of information transmission, and providing the ability to predict the state of information transmission routes in conditions of high mobility of special-purpose mobile information networks.

MOBILE INFORMATION NETWORKS, FORECASTING, DATA TRANSMISSION ROUTE, NEURAL NETWORK, LEARNING ALGORITHM

Вступ

Збройні сили сучасних держав при веденні бойових дій мають відповідати високим вимогам технологічності та гнучкості, що передбачає територіальний розподіл підрозділів у бойовому просторі й інтеграцію їхніх дій завдяки єдиному інформаційно-командному середовищу. Важливою умовою ефективного застосування таких збройних сил є використання мережецентричних систем управління, що забезпечують інтегроване та синхронізоване залучення військових сил і засобів одночасно у різних просторових і часових вимірах бойових операцій у режимі реального часу. Це дозволяє підвищити ефективність оперативного реагування, скоротити цикл ухвалення рішень та досягти переваги над противником завдяки інформаційній перевазі.

Особливий акцент у сучасних умовах робиться на створення перспективних тактичних радіомереж, які

стають ядром мережецентричних концепцій [1-10]. Ключову роль у цьому контексті відіграють мобільні радіомережі, що характеризуються низкою переваг, серед яких варто виокремити здатність до самоорганізації, що мінімізує або повністю виключає етап попереднього планування та значно спрощує масштабування мережі залежно від конкретних оперативних завдань. Такі мережі вирізняються оперативністю розгортання, високою стійкістю до пошкоджень або втрат окремих вузлів, а також забезпечують безперервну та стабільну роботу навіть за умов інтенсивного маневрування всіх їхніх елементів.

Важливим аспектом при формуванні таких інформаційних мереж є забезпечення високої пропускної спроможності каналів передачі даних, їхньої завадозахищеності та скритності зв'язку. З цією метою активно використовуються сучасні технології шифрування, адаптивного управління частотними

ресурсами, цифрові методи обробки сигналів та інші передові рішення, що дозволяють гарантувати захищеність інформації та стабільність функціонування мережі навіть за умов активного застосування противником радіоелектронної боротьби.

Виклад основного матеріалу

Відомий спосіб передачі інформації в інформаційних мережах з можливістю до самоорганізації, при якому передача інформації між вузлами інформаційної мережі на інформаційному напрямку $a-b$ відбувається наступним чином:

- вузлом a та вузлом b відбувається формування загальної топології інформаційної мережі шляхом передачі службових повідомлень в інформаційній мережі з можливістю до самоорганізації;

- вузлом a та вузлом b відбувається формування множини маршрутів передачі інформації в інформаційній мережі шляхом передачі службових повідомлень в інформаційній мережі з можливістю до самоорганізації;

- перед початком передачі інформації між вузлом a та вузлом b відбувається визначення якості каналів для передачі інформації шляхом передачі тестових повідомлень в інформаційній мережі з можливістю до самоорганізації;

- передача інформації між вузлом a та вузлом b по найкращому маршруту передачі інформації;

- підтвердження отримання пакетів або в разі неотримання пакетів запит на повторну передачу між вузлом a та вузлом b [11].

Недоліками зазначеного способу передачі є відсутність можливості здійснення прогнозування стану каналів передачі інформації між вузлами a та b мереж з можливістю до самоорганізації з урахуванням альтернатив можливих маршрутів, інтенсивності трафіку та впливу навмисних завад.

Найбільш близьким до способу, що пропонується, є спосіб прогнозування стану каналів інформаційних мереж з можливістю до самоорганізації. Сутність зазначеного методу полягає в тому, що вузол-відправник в інформаційній мережі з можливістю до самоорганізації, перед здійсненням передачі інформації до вузла-кореспондента здійснює послідовність наступних дій шляхом розсилки службових повідомлень в мережі: контроль завантаженості каналів зв'язку в інформаційній мережі; виявлення перевантажень; виявлення виходу з ладу програмної та апаратної складової; виявлення активності користувачів та подій; виявлення вразливостей інформаційної мережі та порушень в налаштуваннях та прогнозування стану інформаційної мережі. На підставі зазначеної послідовності перетворень вузол-відправник визначає раціональний маршрут передачі інформації до вузла кореспондента в інформаційній мережі з можливістю до самоорганізації [12].

Недоліком способу-прототипу є неможливість використання в умовах високої мобільності об'єктів та не врахування впливу навмисних завад на процес передачі інформації між вузлами зв'язку інформаційних мереж з можливістю до самоорганізації.

Тому технічним завданням, що вирішує заявлений спосіб формування топології мережі, є поєднання переваг прототипу та аналогу, з усуненням їхніх недоліків.

Спосіб формування маршрутів передачі даних в мобільних інформаційних мережах, при якому передача інформації між вузлами інформаційної мережі на інформаційному напрямку $a-b$, відбувається наступним чином: вузлом a та вузлом b відбувається формування загальної топології інформаційної мережі шляхом передачі службових повідомлень в інформаційній мережі з можливістю до самоорганізації, після чого вузлом a та вузлом b відбувається формування множини маршрутів передачі інформації в інформаційній мережі шляхом передачі службових повідомлень в інформаційній мережі з можливістю до самоорганізації, після чого перед початком передачі інформації між вузлом a та вузлом b відбувається визначення якості каналів для передачі інформації шляхом передачі тестових повідомлень в інформаційній мережі з можливістю до самоорганізації, після чого відбувається передача інформації між вузлом a та вузлом b по найкращому маршруту передачі інформації, після чого відбувається підтвердження отримання пакетів або в разі неотримання пакетів запит на повторну передачу між вузлом a та вузлом b . У запропонованому посібі на етапі формування множини маршрутів передачі інформації в інформаційній мережі вузлами a та b шляхом передачі службових повідомлень в інформаційній мережі з можливістю до самоорганізації відбувається прогнозування стану маршрутів передачі інформації за критерієм максимуму пропускної спроможності шляхом порівняння отриманих значень пропускної спроможності з граничними показниками мережі.

Пояснимо більш докладно сутність заявленого способу, а саме процес прогнозування. У зв'язку з неможливістю збору в режимі реального часу інформації про стан мобільної інформаційної мережі (МІМ), будемо розглядати процес маршрутизації потоків даних на інформаційному напрямку $a-b$, який складається з кінцевих вузлів a та b (відповідно відправник та адресат), а також множини вузлів, які формують канали передачі між a та b .

Припустимо, що між вузлами a та b існує маршрут m , в якому загальна кількість вузлів рівна k . Вузли можуть змінювати потужність передавача $p_i(t) \leq p_{i\max}$. Параметри вузлів: $e_i(t)$ – це шлях, по якому інформація передається від початкового вузла i до кінцевого вузла j , $i=1, N$, N – це кількість

всіх вузлів, через які проходить маршрут (включаючи вузли-відправники та вузли-одержувачі); $T_i(t)$ – час життя i -го вузла. Тип інформації – $\xi = 1-3$ (мова, відео, передача даних); кількість адресатів при кожній сесії $|b|=1$ (однокористувальницька передача). Час існування діючого маршруту $T_m(t)$ визначається мінімальним часом «життя» i -го вузла $T_i(t)$ на маршруті m : $T_m(t) = \min(T_1(t), T_2(t), \dots, T_i(t))$, $i=1, k$. Параметри стану мережі: x_1 – тип трафіка, x_2 – об'єм інформації, x_3 – кількість адресатів, x_4 – розмір черги, x_5 – час існування маршруту, x_6 – швидкість зміни розміру черги, x_7 – коефіцієнт втрати пакетів, x_8 – затримка передачі пакетів в мережі, x_9 – пропускна здатність каналів.

Необхідно: спрогнозувати час перевантаження маршрутів передачі даних в МІМ.

Суть запропонованої у способі формування маршрутів процедури прогнозування полягає у прийнятті рішення щодо пошуку нових маршрутів на основі прогнозованого часу перевантаження маршрутів передачі, з метою задоволення вимог користувальницької оптимізації.

Слід врахувати те, що прогнозування є окремим випадком завдання регресії, тобто залежність залежної змінної від незалежних за заданих умов, то варіантом вирішення цього питання може бути застосування нейронних мереж (НМ), а саме: багатошарового перцептронну, радіально-базисної мережі, узагальнено-регресійної мережі, мережі Вольтеррі та мережі Елмана.

Проведений аналіз застосування НМ при вирішенні завдань прогнозування подій вказує на доцільність застосування обчислення часових рядів в основі яких буде покладена нейронна мережа Елмана, яка представляє собою один з видів рекурентної мережі. Мережа Елмана складається з багатошарового перцептронну з зворотнім зв'язком. Дана функція дозволяє враховувати попередні дії та накопичувати інформацію для підтримки прийняття управлінських рішень на основі прогнозування часового ряду. Прогнозування часового ряду зводиться до задачі інтерполяції (визначення проміжних значень величини) функції багатьох змінних та вирішення задачі апроксимації (приведення до спрощеного вигляду) багатовимірної функції, що невід'ємно впливає на якість прогнозування.

У свою чергу мережа Елмана складається з трьох шарів: вхідного, прихованого та вихідного. При цьому прихований шар має зворотний зв'язок сам на себе, в наслідок чого відбувається навчання нейронної мережі, аналіз подій що сталися та як наслідок прогнозування майбутніх.

На відміну від звичайної мережі прямого поширення, вхідний образ рекурентної мережі це не один вектор, а послідовність векторів $\{x(1), x(2), \dots, x(n)\}$

вхідного образу, що подаються на вхід в заданому порядку, при цьому новий стан прихованого шару залежить від його попередніх станів. Мережу Елмана можливо описати наступними співвідношеннями:

$$u(t) = f(w \cdot x(t) + z \cdot u(t-1) + b_h), \quad (1)$$

$$y(t) = g(v \cdot u(t) + b_y), \quad (2)$$

де: $x(t)$ – вхідний вектор номер t ; $u(t)$ – стан прихованого шару для входу $x(t)$, ($u(0) = 0$); $y(t)$ – вихід мережі для входу $x(t)$; z – вагова матриця розподільного шару; v – вагова (квадратна) матриця зворотного зв'язку прихованого шару; b_h – вектор зрушень прихованого шару; b_y – вектор зрушень вихідного шару; f – функція активації прихованого шару; g – функція активації вихідного шару.

Для навчання мережі Елмана застосовуються градієнтні методи в наслідок чого нейронна мережа обчислюється за допомогою методу зворотного поширення з розгортанням мережі в часі.

Використання мережі передбачає, що процес прогнозування імітується вихідним сигналом деякою нелінійної динамічної системи, яка залежить від множини факторів, у тому числі включаючи і минулі стани системи. В мережі введено шар зворотного зв'язку. Цей шар отримує сигнали з виходу прихованого шару і через елементи затримки z подає їх на вхідний шар, зберігаючи таким чином оброблювану інформацію з попередніх тактів мережі.

Розглядаючи прогнозування перевантаження маршрутів в мережі зазвичай застосовують стандартні нейрони з активаційними функціями, елементи затримки z та блоки фазифікації, призначені для перетворення вхідних порядкових і номінальних змінних, що характеризують вплив мережі, в кількісну форму.

Мережа Елмана для прогнозування часу перевантаження маршрутів з декількома входами, де число нейронів у шарі введення m і прихований шар n і один вихідний блок. Нехай x_{ji} ($i=1, 2, \dots, m$) позначають набір вхідних векторів нейронів в момент часу t , y_{t+1} позначає вихід мережі в момент часу $t+1$, u_{jt} ($j=1, 2, \dots, n$) позначають висновок нейронів прихованого шару в часі t та z_{jt} ($j=1, 2, \dots, n$) позначають нейрони рекурентного шару, де w_{ij} – ваги, які з'єднують вузол V у вхідному шарі нейронів до вузла j у прихованому шарі; c_j , v_j – ваги, які з'єднують вузол j в нейронах прихованого шару з вузлом в рекурентному шарі.

Входи нейронів прихованого шару:

$$NET_{ji}(k) = \sum_{i=1}^m w_{ij} x_{ii}(k-1) + \sum_{j=1}^n c_{ij} z_{ij}(k), \quad (3)$$

де $z_{ii}(k) = u_{ii}(k-1)$, $i=1, 2, \dots, n$, $j=1, 2, \dots, m$.

Виходи нейронів прихованого шару:

$$u_{ji}(k) = f_H \left(\sum_{i=1}^m w_{ij} x_{ii}(k) + \sum_{j=1}^n c_{ij} z_{ij}(k) \right), \quad (4)$$

де сигмоїдальна функція в прихованому шарі обрана як функція активації: $f_H(x) = 1 / (1 + e^{-x})$.

Алгоритм мережі Елмана зі стохастичною ефективністю часу. Алгоритм зворотного поширення є контрольованим алгоритм навчання, який мінімізує глобальну помилку E з використанням методу градієнтного спуску. Для моделі стохастичної ефективності часу мережі Елмана, ми припускаємо, що отримана помилка виходу $\varepsilon_{e_n} = d_{t_n} - y_{t_n}$ та помилка вибірки n визначається як:

$$E(t_n) = 0,5\varphi(t_n)(d_{t_n} - y_{t_n})^2, \quad (5)$$

де t_n – час відгуку n ($n = 1, 2, \dots, N$); d_{t_n} – фактичне значення; y_{t_n} – вихід в момент часу t_n ; $\varphi(t_n)$ – ефективна функція стохастичного часу. Ефективна функція часу даних розглядається як функція змінної часу:

$$\varphi(t_n) = \frac{1}{\beta} \exp\left\{\int_{t_0}^{t_n} \mu(t) dt + \int_{t_0}^{t_n} \sigma(t) B(t)\right\}, \quad (6)$$

де $\varphi(t_n)$ – функція змінної часу даних у момент часу відгуку; β – коефіцієнт нормування загального рівня величини функції часу; $\mu(t)$ – функція інтенсивності процесу у момент стохастичного часу t ; $\sigma(t)$ – функція волатильності невизначеності процесу у часі t ; $B(t)$ – шумовий процес, який вносить стохастичний характер у поведінку системи.

Помилка даних мережі визначається як:

$$E = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N E(t_n) = \frac{1}{2N} \sum_{n=1}^N \varphi(t_n) \cdot (d_{t_n} - y_{t_n})^2. \quad (7)$$

Основним завданням алгоритму навчання є мінімізація значення функції стану мережі E до тих пір, поки воно не досягне заданого мінімального значення ξ шляхом повторного навчання. При кожному повторенні, висновок розраховується і виходить глобальна помилка. Градієнт функції стану мережі визначається $\Delta E = \partial E / \partial W$. Для вузлів ваги у вхідному шарі градієнт з'єднувального ваги w_{ij} задається формулою:

$$\Delta w_{ij} = -\eta \frac{\partial E(t_n)}{\partial \omega_{ij}} = \eta \varepsilon_{t_n} v_j \varphi(t_n) f'_H(NET_{j_n}) x_{i_n}, \quad (8)$$

де ω_{ij} – сила (значимість) зв'язку між двома нейронами; η – швидкість навчання; $f'_H(NET_{j_n})$ – похідна функції активації.

Для вузлів ваги в рекурентному шарі задається формулою:

$$\Delta c_j = -\eta \frac{\partial E(t_n)}{\partial c_j} = \eta \varepsilon_{t_n} v_j \varphi(t_n) f'_H(NET_{j_n}) z_{i_n}. \quad (9)$$

Для вузлів ваги в прихованому шарі задається формулою:

$$\Delta v_j = -\eta \frac{\partial E(t_n)}{\partial v_j} = \eta \varepsilon_{t_n} v_j \varphi(t_n) f'_H(NET_{j_n}). \quad (10)$$

Правила оновлення для ваг w_{ij} , A_j та v_j задаються як:

$$w_{ij}^{k+1} = w_{ij}^k + \Delta w_{ij}^k, \quad (11)$$

$$c_j^{k+1} = c_j^k + \Delta c_j^k, \quad (12)$$

$$v_j^{k+1} = v_j^k + \Delta v_j^k. \quad (13)$$

Нейронна мережа Елмана повинна змінювати ваги, щоб мінімізувати помилку між передбаченням мережі та мети передбачення.

Висновки

Технічний результат від застосування зазначеного способу полягає у зменшенні обчислювальних затрат, підвищенні швидкості передачі інформації, забезпечення можливості здійснювати прогнозування стану маршрутів передачі інформації в умовах високої мобільності мобільних інформаційних мереж спеціального призначення.

Список літератури

- [1] Shyshatskiy, A., Dmytriieva, O., Lytvynenko, O., Borysov, I., Vakulenko, Y., Mukashev, T., Mordovtsev, O., Kashkevich, S., Lyashenko, A., Velychko, V. Development of a method for assessing the state of dynamic objects using a combined swarm algorithm. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2024, Vol. 3, No. 4 (129), pp. 44-54. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.304131>.
- [2] Mahdi, Q. A., Shyshatskiy, A., Voznytsia, A., Plekhova, G., Shostak, S., Tulenko, I., Semko, R., Zheliezniak, D., Momit, A., Sova, M. (2025). Development of a method for increasing the efficiency of processing different types of data in organizational and technical systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (4 (134)), 23-31. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.325102>.
- [3] A. Koshlan, O. Salnikova, M. Chekhovska, R. Zhyvotovskyi, Y. Prokopenko, T. Hurskyi, A. Yefymenko, Y. Kalashnikov, S. Petruk, A. Shyshatskiy. Development of an algorithm for complex processing of geospatial data in the special-purpose geoinformation system in conditions of diversity and uncertainty of data. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 5. No. 9 (101). 2019. pp. 35-45. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.180197>.
- [4] Сніцаренко, П. М., Саричев, Ю. А., Зубков, В. П., Піщанський, Ю. А. (2022). Методичний підхід до управління ризиками безпеки інформації як складової забезпечення інформаційної безпеки держави. *Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень Національного університету оборони України імені Івана Черняховського*, 2 (75), 47-55. URL: <http://znp-cvsvd.nuou.org.ua/article/view/266779/262799>.
- [5] Плехова Г. А., Неронов С. М., Костікова М. В., Кашкевич С. О. Удосконалення моделі безпечної маршрутизації в програмно-конфігурованих мережах // Г. А. Плехова, С. М. Неронов, М. В. Костікова, С. О. Кашкевич / *Біоніка інтелекту*, 2024, № 1 (100), С. 50-57. DOI: 10.30837/bi.2024.1(100).07. URL: <http://bionics.nure.ua/article/view/314707/305583>.
- [6] Плехова Г. А., Костікова М. В., Неронов С. М., Багмут Р. Б., Яценко О. О. Пристрій утворення маршрутів передачі інформації в радіомережах спеціального призначення із можливістю самоорганізації // Г. А. Плехова, М. В. Костікова, С. М. Неронов, Р. Б. Багмут, О. О. Яценко / *Біоніка інтелекту*, 2024, № 2 (101), С. 30-33.

- [7] Kashkevich, S., Litvinenko, O., Shyshatskyi, A., Salnyk, S., & Velychko, V. (2024). The method of self-organization of information networks in the conditions of the complex influence of destabilizing factors. *Advanced Information Systems*, 8(3), 59-71. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.3.07>.
- [8] Плехова Г. А., Костікова М. В., Неронов С. М., Кашкевич С. О. Обробка різнотипних даних в геоінформаційних системах за допомогою засобу ультракороткохвильового радіозв'язку // Г. А. Плехова, М. В. Костікова, С. М. Неронов, С. О. Кашкевич / Біоніка інтелекту, 2024, № 2 (101), С. 52-55. DOI: 10.30837/bi.2024.2(101).08. URL: <http://bionics.nure.ua/article/view/322707/313061>.
- [9] Шаронова Н. В., Плехова Г. А., Костікова М. В., Неронов С. М., Кашкевич С. О. Пристрій управління ризиками інформаційної безпеки в інформаційних системах // Н. В. Шаронова, Г. А. Плехова, М. В. Костікова, С. М. Неронов, С. О. Кашкевич / Біоніка інтелекту, 2024, № 2 (101), С. 48-51. DOI: 10.30837/bi.2024.2(101).07. URL: <http://bionics.nure.ua/article/view/322702/313058>.
- [10] Подліпаєв В. О. Геопросторова розвідка, як шлях реалізації геоінформаційного підходу у комплексній обробці розвідувальної інформації. Системи обробки інформації: збірник наукових праць. – Х.: Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 2013. – Вип. 5 (112). – С. 53-55. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/soi_2013_5_13.
- [11] Романюк В. А. Архітектура системи оперативного управління тактичними радіомережами / Романюк В. А. // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ «КПІ». – 2009. – № 3. – С. 70 – 76.
- [12] I. Alieinykov, K. A. Thamer, Yu. Zhuravskyi, O. Sova, N. Smirnova, R. Zhyvotovskiy, S. Hatsenko, S. Petruk, R. Pikul, A. Shyshatskyi. Development of a method of fuzzy evaluation of information and analytical support of strategic management. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 6. No. 2 (102). 2019. pp. 16-27. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.184394>.

Надійшла до редколегії 12.05.2025