

## УДОСКОНАЛЕНИЙ АЛГОРИТМ РОЗГОРТАННЯ БПЛА ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗВ'ЯЗНОСТІ МЕРЕЖІ MANET

Валуйський С.В., Турчин Я.В.

*Навчально-науковий Інститут телекомунікаційних систем*

*КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна*

*E-mail: valuiskyi.stanislaw@lll.kpi.ua*

### ADVANCED UAV DEPLOYMENT ALGORITHM TO ENSURE MANET NETWORK CONNECTIVITY

The article examines the problem of combining the management of existing UAVs and the deployment of new UAVs so that the number of new deployed UAVs to maintain ground-based UAVs can be minimized. This problem is formulated as the problem of a minimal Steiner tree with existing Steiner mobile points with constraint on the length of the edges of the network graph and we prove NP the completeness of this problem.

Рух наземних мобільних абонентів, призводить до швидкої і непередбачуваної зміни топології епізодичних радіомереж, що може призводити до порушення зв'язності мережі і втрати зв'язку між деякими абонентами. Підвищення зв'язності таких мереж можливо шляхом введення нових додаткових вузлів повітряного базування (БПЛА), що мають більшу зону радіопокриття і пожутуть поєднувати роз'єднані ділянки мережі. На сьогодні не достатньо вирішеною є проблема оптимального управління положенням таких БПЛА, а саме проблема поєднання управління рухом існуючих БПЛА та розгортання нових БПЛА, щоб кількість нових розгорнутих БПЛА для підтримки зв'язку наземних абонентів могла бути мінімізована.

Роботи Лисенка О.І., Романюка В.А., Чумаченка С.М., Валуйського С.В. присвячені теоретичним і практичним дослідженням методам підвищення пропускної здатності епізодичних радіомереж з управлінням положенням телекомунікаційних аероплатформ [1]. В роботі [2] автори також досліджують проблему підвищення зв'язності мобільних епізодичних радіомереж за рахунок розміщення нових і переміщення існуючих БПЛА, але математична модель не враховує дальність зв'язку повітря-повітря, що буде враховано у данній роботі.

**Математична постановка задачі.** Оскільки ця задача подібна до задачі дерева Штейнера з мінімальною кількістю точок Штейнера, в даному розділі сформульовано цю задачу як задачу мінімального дерева Штейнера з існуючими мобільними точками Штейнера із обмеженням по довжині ребер графу мережі. Точки Штейнера тут означають БПЛА, а обмеження по довжині ребер графу мережі — це діапазон максимальної дальності зв'язку вузла мережі, що визначається енергетикою радіолінії (потужністю передавача, чутливістю приймача, характеристиками антени і т.п.), місцевістю та різними завадами [8].

Формальне визначення проблеми мінімального дерева Штейнера з існуючими мобільними точками Штейнера із обмеженням довжини ребер графу мережі показано наступним чином:

Нехай існує набір наземних вузлів  $P$ , що характеризується поточною позицією кожного вузла  $p$ , набір існуючих БПЛА  $Q$ , що характеризується

поточною позицією кожного існуючого БПЛА, діапазон руху БПЛА  $l$ , дальність зв'язку наземного вузла  $r$ , дальність зв'язку земля-повітря  $R$  і дальність зв'язку повітря-повітря  $D$ .

Таким чином  $r < R$ ,

$$P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}, \quad (1)$$

$$Q = \{q_1, q_2, \dots, q_m\},$$

де  $n$  - кількість наземних вузлів,  $m$  - кількість існуючих БПЛА.

Нові позиції існуючих БПЛА складатимуть множину  $U$ , позиції нових доданих БПЛА –  $S$ , а дерево графу мережі  $T$  складатиметься з сукупного набору вузлів ( $P$ ,  $U$  та  $S$ ) та набору ребер  $E$ :

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\},$$

$$S = \{s_1, s_2, \dots, s_k\}$$

$$T = \{P \cup U \cup S, E\}. \quad (2)$$

Тоді математичну постановку задачі можна сформулювати наступним чином: знайти мінімальну кількість  $k$  нових доданих БПЛА, розміщення яких забезпечить зв'язність епізодичної радіомережі

$$\min(k). \quad (3)$$

при виконанні наступних обмежень та збереження цілісності мережі:

$$\Omega_1: |e_{i,j}| \leq r, (e_{i,j} \in E, i, j \in P),$$

$$\Omega_2: |e_{i,j}| \leq R, (e_{i,j} \in E, i \in P, j \in U \cup S), \quad (4)$$

$$\Omega_3: |e_{i,j}| \leq D, (e_{i,j} \in E, i, j \in U \cup S),$$

$$|u_i - q_i| \leq l, 1 \leq i \leq m,$$

де  $|e_{i,j}|$  - довжина ребра графу мережі між вузлами  $i$  та  $j$ .

Під цілістістю мережі розуміється наявність лише одної компоненти зв'язності графу мережі. Перевірка цілісності мережі можливо шляхом побудови мінімального дерева Штейнера (МДШ) графу (наприклад, згідно алгоритму Пріма) та перевірка кожного ребра дерева на виконання умови  $\Omega_1$ ,  $\Omega_2$ ,  $\Omega_3$ . Якщо умови виконуються, то мережа є структурно зв'язаною на момент часу  $t$ , інакше – необхідне певне управлінське рішення (наприклад, вивід нового (переміщення існуючого) БПЛА).

**Опис алгоритму.** Алгоритм розгортання нових БПЛА під час переміщення існуючих БПЛА. Основна ідея алгоритму розгортання нових БПЛА під час переміщення існуючих БПЛА полягає в наступному. Спочатку генерується повний граф  $G(V, E)$  на базових вузлах і сортуємо всі ребра  $E$  у порядку збільшення довжини. Тоді розглянемо всі ребра  $e_{i,j}$  у множині  $E$ , що довжина ребра не більше  $r$ , а вершини ребра належать різним компонентам. Після цього кроку ми отримаємо кілька компонентів, які складаються із підключених заземлюючих вузлів. Тепер будемо рекурсивно переміщати існуючі БПЛА та додавати нові БПЛА для з'єднання розділених компонентів, доки всі розділені компоненти не будуть з'єднані в один компонент. У кожному циклі ми спробуємо з'єднати всі пари вершин  $V_i$  і  $V_j$ , які належать різним компонентам, за допомогою двох різних методів. Один із методів використовує існуючі БПЛА для встановлення ланцюга зв'язку між  $V_i$  і  $V_j$  шляхом переміщення БПЛА на певні позиції. Нові БПЛА будуть додані до країв ланцюга, довжина яких перевищує  $r$ . Інший метод не враховує існуючі БПЛА і просто намагається налаштувати ланцюжок зв'язку між  $V_i$  і  $V_j$ , додаючи нові

БПЛА. Кількість нових доданих БПЛА за допомогою цих двох методів буде порівнюватися, і менша кількість буде записана як мінімальна кількість нових БПЛА (MNN) для з'єднання  $V_i$  і  $V_j$ . Для з'єднання двох розділених компонентів у цьому циклі буде обрана пара вершин, яка має мінімальний MNN. Нові позиції існуючих БПЛА та позиції нових доданих БПЛА, створених для з'єднання цієї пари вершин, також будуть записані як частина кінцевого результату (рис.1).

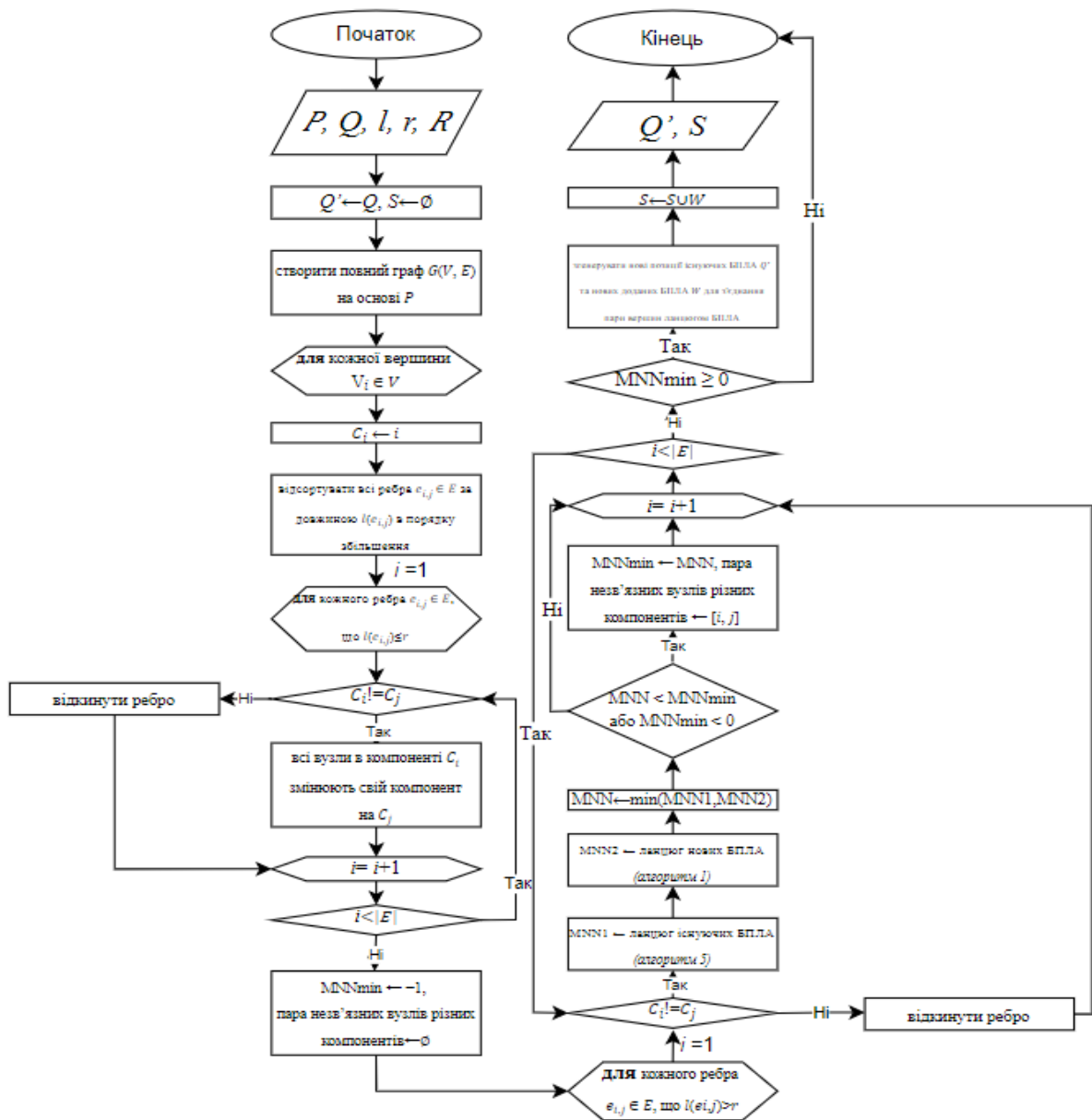


Рис. 1. Блок схема удосконаленого алгоритму розгортання нових БПЛА під час переміщення існуючих БПЛА.

### Література

1. Lysenko O., Romaniuk V., Tachinina O., Valuiskyi S. (2020) The Problems of Control in Wireless Sensor and Mobile Ad-Hoc Networks. In: Nechyporuk M., Pavlikov V., Kritskiy D. (eds) Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 1113. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-37618-5\\_33](https://doi.org/10.1007/978-3-030-37618-5_33).
2. Ming Zhu, Fei Liu, Zhiping Cai, Ming Xu, "Maintaining Connectivity of MANETs through Multiple Unmanned Aerial Vehicles", Mathematical Problems in Engineering, vol. 2015, Article ID 952069, 14 pages, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/952069>.