

Лисенко О.І., д.т.н., професор,
Валуйський С.В., аспірант
Національного технічного
університету України «КПІ»,
м. Київ

УПРАВЛІННЯ ТОПОЛОГІЄЮ МЕРЕЖІ МОБІЛЬНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ПЛАТФОРМ

Запропоновано метод управління топологією мережі мобільних телекомунікаційних платформ (МТП) за критерієм підвищення зв'язності безпроводних ad-hoc мереж.

Предложен метод управления топологией сети мобильных телекоммуникационных платформ (МТП) по критерию повышения связности беспроводных ad-hoc сетей.

Method of mobile telecommunication platform (MTP) network topology control by criterion of improving wireless ad-hoc networks connectivity are proposed.

ВСТУП

Останнім часом для організації оперативного збору даних та зв'язку між членами пошукових бригад в районах стихійних лих, екологічних катастроф, аварій тощо широкого використання набувають безпроводні ad-hoc мережі ієрархічної архітектури (рис.1). Перший (нижній) рівень таких мереж можуть утворювати наземні сенсорні (WSN) та/або мобільні (MANET) радіомережі, що самоорганізуються. В якості другого (верхнього) рівня можуть використовуватися мережі мобільних телекомунікаційних платформ (МТП), що використовуються в якості ретрансляторів, та поєднують територіально рознесені групи мобільних абонентів (МА) або сенсорів. В якості МТП можуть використовуватися будь-яка наземна або повітряна транспортна техніка: мобільні роботи, безпілотні літальні апарати (БПЛА) тощо. В даній роботі в якості мережі МТП розглядаються мережі БПЛА.

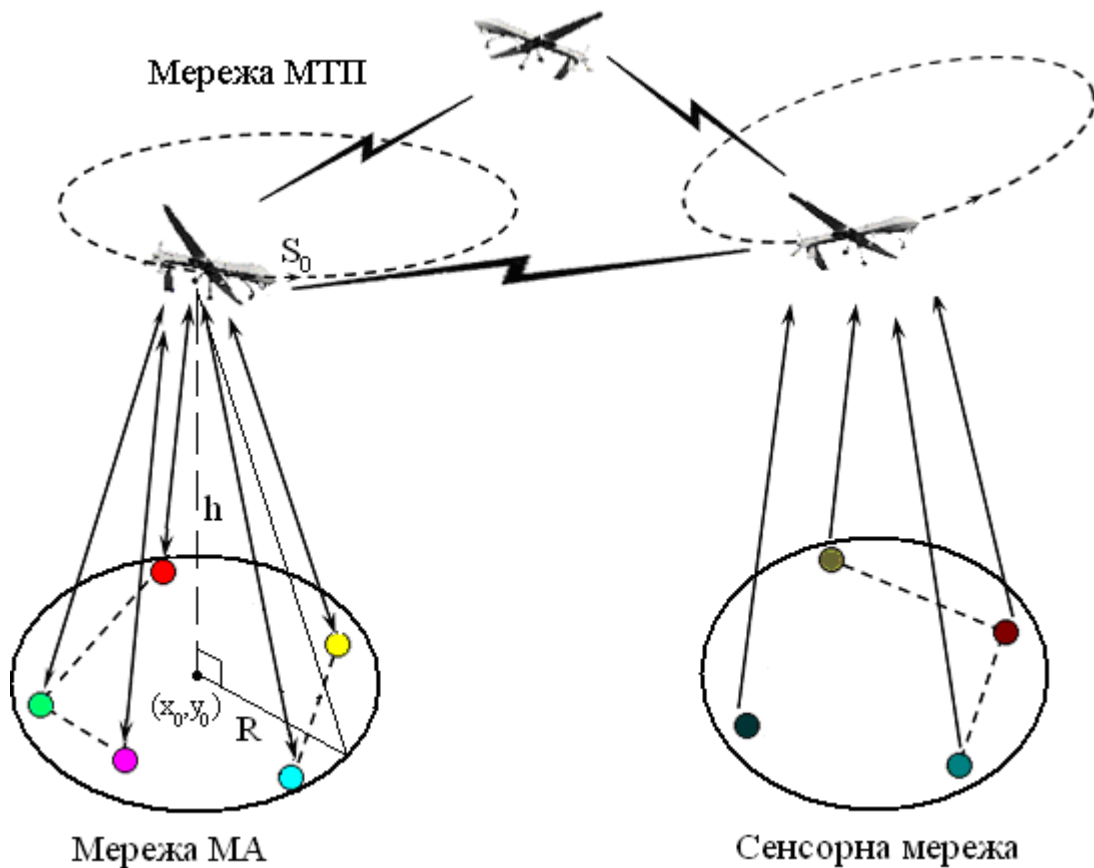


Рис.1. Архітектура ієрархічної безпроводної ad-hoc мережі на основі МТП

Функціонування таких складних ієрархічних мереж не можливе без ефективної системи управління [1], складовою частиною якої є підсистема управління мережею МТП. Однією з головних функцій підсистеми – є управління топологією мережі МТП, тобто знаходження необхідної кількості МТП, місця їх розташування та переміщення у просторі.

Нерозв'язаною на сьогодні слід вважати задачу синтезу оптимального управління топології мережі МТП. Труднощі розв'язання цієї задачі полягають у великій розмірності ієрархічної мережі, багатокритеріальності та багатоекстремальності розв'язуваної задачі за кожним критерієм. Це викликає необхідність вдосконалення методів оптимізації на основі декомпозиційного підходу: загальна задача управління топології розбивається на ряд підзадач за певними пріоритетами критеріїв ефективності (мінімум використаного апаратного ресурсу (МТП), максимум зв'язності (структурної надійності) або продуктивності мережі та ін.).

Метою статті є оптимізація управління топологією мережі МТП за критерієм підвищення зв'язності мереж нижнього рівня. Під зв'язністю мережі слід розуміти здатність будь-якої пари вузлів здійснювати інформаційний обмін, використовуючи проміжні вузли як ретранслятори [1]. Розв'язання цієї проблеми було започатковано рядом вітчизняних та зарубіжних науковців у роботах [2,3,4]. Однак запропоновані методи управління топологією мережі МТП не спроможні ефективно вирішувати задачі великої розмірності, отже проблема потребує додаткового дослідження та пошуку нових рішень.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Для математичної постановки задачі зручно використовувати апарат теорії графів.

Нехай задані наступні вихідні дані:

N – кількість наземних вузлів (МА або сенсорів);

K – кількість МТП;

$h=const$ – висота польоту кожного МТП над землею;

R – радіус зони покриття кожного МТП;

(x_i, y_i) – координати наземних вузлів (отримані через GPS), $i = \overline{1, N}$.

Тоді

$D_{ij} = \sqrt{|x_i - x_j|^2 + |y_i - y_j|^2}$ – відстань між двома вузлами;

$S_i = \frac{dx_i}{dt} + z \frac{dy_i}{dt}$, $z = \sqrt{-1}$ – швидкість переміщення i -го вузла (у випадку

МА).

Для опису наземної безпроводної ad-hoc мережі будемо використовувати граф $G(N, A)$ (рис.2), що складається з сукупності N вершин (вузлів мережі) та гілок, що відображають з'єднання (радіолінії) між відповідними вузлами. Будемо вважати пару вузлів з'єднаними, якщо ймовірність безпомилкової передачі повідомлення P_{ij} між ними буде більше або дорівнювати деякому граничному значенню δ , що відповідає певному критичному значенню BER.

Тоді зв'язність наземної безпроводної ad-hoc мережі можна представити у вигляді матриці зв'язності:

$$[A] = \begin{cases} 1, & \text{якщо } P_{ij} \geq \delta \\ 0, & \text{інакше} \end{cases} \quad (1)$$

$$[A^i] = \begin{cases} 1, & \text{якщо } ij \in \text{МОД} \\ 0, & \text{інакше} \end{cases} \quad (3)$$

2) Зв'язність найгіршого випадку – ймовірність розділення мережі на дві (декілька) частин. Мірою зв'язності у цьому випадку може бути гілка МОД з максимальною вагою:

$$U = \max_{[A^i]} W_{ij} \quad (4)$$

Зазвичай радіолінія МТП-МА (МТП-сенсор) значно переважає радіолінію МА-МА (або сенсор-сенсор) за енергетикою ($W_{i0} \ll W_{ij}, \forall i, j = \overline{1, N}$), тому введення у граф однієї (або декілька) таких вершин (МТП вузлів) може значно підвищити зв'язність наземної ad-hoc мережі. Пошук таких додаткових точок з метою мінімізації сумарної ваги гілок графу називають «задачею Штейнера на графах» [5], а точку проєкції оптимального положення МТП на місцевості $(x_{0k}, y_{0k}), k = \overline{1, K}$ – точкою Штейнера (рис.2).

Таким чином можемо сформулювати постановку задачі даного дослідження.

Формулювання 1 (розміщення МТП): знайти такі координати проєкцій положення МТП $(x_{0k}, y_{0k}), k = \overline{1, K}$, в яких цільова функція U , що визначається виразом (2) або (4), буде мінімальною. Математична постановка задачі буде мати наступний вигляд:

$$\min_{(x_{0k}, y_{0k}), k = \overline{1, K}} U \quad (5)$$

Формулювання 2 (переміщення МТП у випадку MANET): знайти таку швидкість $S_{0k}, k = \overline{1, K}$ та напрямок руху МТП, в якому приріст цільової функції ΔU буде максимальним. Математична постановка задачі буде мати наступний вигляд:

$$\max_{S_0} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta U}{\Delta t}, \quad v_{\min} \leq \|S_0\| \leq v_{\max}, \quad \text{де} \quad (6)$$

$$\Delta U = U(x_i(t + \Delta t), y_i(t + \Delta t)) - U(x_i(t), y_i(t));$$

$t, t + \Delta t$ – поточний та наступний моменти часу;

v_{\min}, v_{\max} – максимальна та мінімальна швидкість руху МТП.

МЕТОД УПРАВЛІННЯ ТОПОЛОГІЄЮ МЕРЕЖІ МТП

Метод управління топологією мережі МТП складається з двох прийомів – алгоритму розміщення МТП та алгоритм переміщення МТП.

Алгоритм розміщення мережі МТП

Оскільки вирішення задачі розміщення мережі МТП зводиться до вирішення «задачі Штейнера на графах», що є NP-складною, тому для спрощення алгоритму запропоновані прості інженерні евристики, що засновані на особливостях вирішення задачі Штейнера для двох, трьох та чотирьох точок [5].

Алгоритм розміщення мережі МТП буде мати наступні кроки:

Крок 1. Ініціалізація: (x_0^0, y_0^0) , $k = 0$.

1. Пошук МОД, ранжування «проблемних» гілок по вазі ($W_{ij} \geq W'_{ij}$, де W'_{ij} – деяке граничне значення ваги), створення бази «проблемних» гілок $[A_{np}]$, $[A_{np}] \in [A_{ij}]$, $i, j = \overline{1, N}$.

2. Групування «проблемних» гілок (за розміром зони покриття МТП R):

а) якщо група складається з двох суміжних гілок – вирішується задача Штейнера для 3-х точок (i, j, r) (розміщення одного МТП). Початковою точкою пошуку оптимуму буде центр мас трьох вершин, що входять до складу суміжних гілок:

$$x_0^0 = \frac{x_i + x_j + x_r}{3}; y_0^0 = \frac{y_i + y_j + y_r}{3}, i, j, r = \overline{1, N} \quad (7)$$

б) якщо група складається з двох несуміжних гілок – вирішується задача Штейнера для 4-х точок (i, j, r, s) (розміщення двох МТП). Початковими точками пошуку оптимуму будуть центри протилежних гілок чотирьохкутника, що складають несуміжні гілки, меншої загальної ваги:

$$x_{10}^0 = \frac{x_i + x_j}{2}; y_{10}^0 = \frac{y_i + y_j}{2}; x_{20}^0 = \frac{x_r + x_s}{2}; y_{20}^0 = \frac{y_r + y_s}{2}; i, j, r, s = \overline{1, N}, \quad (8)$$

$$\text{за умови } W_{ij} + W_{rs} < W_{ir} + W_{js}. \quad (9)$$

в) якщо група складається з однієї гілки – вирішується задача Штейнера для 2-х точок (i, j) (розміщення одного МТП). У даному випадку початковою точкою та одночасно точкою Штейнера буде центр гілки ij :

$$x_0^0 = \frac{x_i + x_j}{2}; y_0^0 = \frac{y_i + y_j}{2}; i, j = \overline{1, N}. \quad (10)$$

Крок 2. Пошук точки (-ок) Штейнера

а) $\min_{A_j} U' = \min_{A_j} (D_{i_0} + D_{j_0} + D_{r_0}), i, j, r = \overline{1, N};$

б) $\min_{A_j} U' = \min_{A_j} (D_{i,10} + D_{j,10} + D_{r,20} + D_{s,20} + D_{10,20}), i, j, r, s = \overline{1, N};$

в) $(x_0^0, y_0^0).$

Крок 3. Вивід k-го МТП в точку Штейнера за рангом «проблоємних» гілок, виключення «покритих» МТП «проблемних» гілок з бази $[A_{np}]$.

Крок 4. $k = k + 1$. Якщо $k < K$ та $[A_{np}] \neq 0$ перехід на Крок 3, інакше - КІНЕЦЬ.

Алгоритм переміщення мережі МТП

Метод переміщення мережі МТП заснований на градієнтному методі пошуку оптимуму. У випадку фіксованих вузлів (сенсорні мережі) або малої активності МА (MANET) МТП описує коло мінімального радіусу (визначається конструктивними даними керуючих пристроїв), проекція центру якого є точка Штейнера. У разі збільшення мобільності МА МТП починає слідкувати за точною Штейнера, перераховуючи приріст цільової функції ΔU .

Отже алгоритм переміщення мережі МТП буде мати наступні кроки:

Крок 1. Спостереження – визначення (x_i, y_i) та $S_i, i \in R$.

Крок 2. Переміщення:

1) по колу: якщо $\left| \mu \frac{\Delta U}{dt} \right| < v_{\min}$, де μ – коефіцієнт пропорційності

(розрахунок планується у подальшій роботі).

2) переміщення: якщо $\left| \mu \frac{\Delta U}{dt} \right| > v_{\min}$, $S_0 = \begin{cases} -\mu \frac{\Delta U}{dt}, & \text{якщо } \left| \mu \frac{\Delta U}{dt} \right| \leq v_{\max} \\ -v_{\max}, & \text{інакше} \end{cases}$

Крок 3. У випадку локального оптимуму або зриву спостереження – перехід на алгоритм розміщення мережі МТП.

РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ

Моделювання управління топологією мережі МТП здійснювалося на базі комп'ютерного середовища MATLAB. Вихідними даними моделювання були наступні величини: кількість вузлів (сенсорів) $N=10$, що

були випадково розміщені на поверхні за рівномірним розподілом; $(x_i, y_i), i = \overline{1,10}$ – координати вузлів; кількість МТП $K=5$; модель радіоканалу – Релея; розрахунки виконувалися на випадок глобальної зв'язності. Використовуючи запропонований алгоритм розміщення мережі МТП були отримані наступні результати (рис.3).

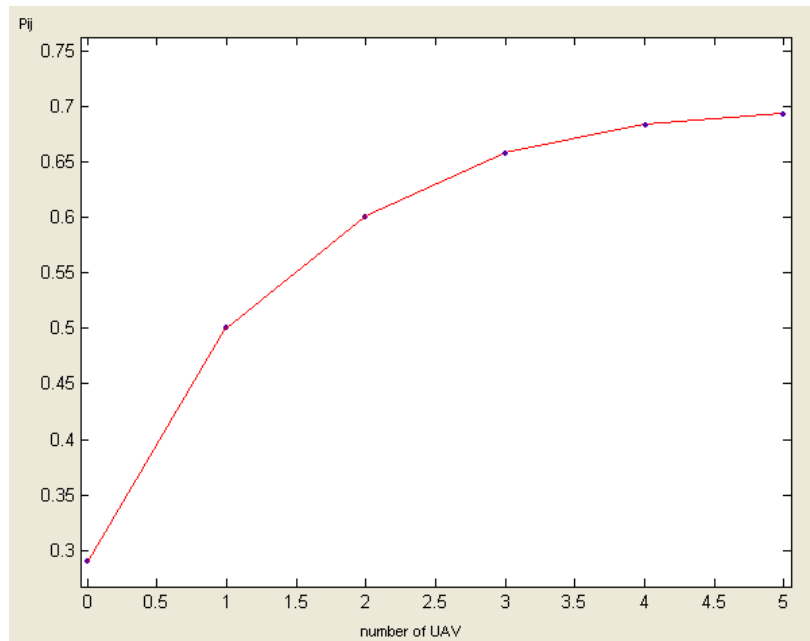


Рис.3. Графік залежності зв'язності (P_{ij}) від кількості МТП

Аналізуючи графік залежності зв'язності (P_{ij}) від кількості МТП можемо зробити висновок, застосування одного МТП дає найбільший вигреш у зв'язності; з використанням другого та усіх наступних МТП – приріст зв'язності значно спадає. Отже постає задача оптимізації апаратного ресурсу (МТП) для досягнення заданої зв'язності мережі, що може бути вирішена у подальшому.

Також у подальшій роботі планується:

1. Більш досконале вивчення та рішення проблеми розміщення та переміщення мережі МТП, враховуючі різні умови та системні аспекти (характер місцевості, енергетична ефективність, нечітка постановка вихідних даних тощо)
2. Розробка більш реалістичних моделей управління топологією мережі МТП.

ВИСНОВКИ

1. Розроблено метод управління топологією мережі МТП за критерієм зв'язності безпроводних ad-hoc мереж, який відрізняється від існуючих методів тим, що для визначення початкового наближення передбачаються додаткові процедури. Виграш звязності від використання одного МТП складає приблизно 60%.

2. Модифікована математична модель розміщення та переміщення мережі МТП, що відрізняється від існуючих, тим що враховує глобальну зв'язність та динаміку руху наземних вузлів.

3. Розроблено алгоритми розміщення та переміщення мережі МТП на основі простих інженерних евристик, що відрізняються від існуючих алгоритмів тим, що значно зменшують кількість ітерацій, необхідних вирішення «задачі Штейнера на графах».

Використані джерела інформації:

1. Міночкін А.І., Романюк В.А. Задачі управління топологією мережі безпілотних літальних апаратів мобільного компоненту мереж зв'язку військового призначення // Збірник наукових праць № 2. – К.: ВІТІ НТУУ “КПІ”. – 2005. – С. 83 – 90.
2. Chandrashekar, K. Dekhordi, M. R. Baras, J. S. Providing full connectivity in large ad-hoc networks by dynamic placement of aerial platforms // In Proceedings of IEEE MILCOM'04, 2004, Vol.3., pp.1429-1436.
3. Basu P., Redi J., Shurbanov V. Coordinated Flocking of UAVs for Improved Connectivity of Mobile Ground Nodes // In Proceedings of IEEE MILCOM'04, 2004, Vol.3., pp.1628-1634.
4. Z. Han, A. L. Swindlehurst, and K. J. R. Liu. Smart deployment/movement of unmanned air vehicle to improve connectivity in MANET // in *Proc. IEEE Wireless Commun. Netw. Conf.*, 2006, pp. 252–257.
5. Берн М., Грэм Р. “Поиск кратчайших сетей” // *Scientific American*. Издание на русском языке, № 3, 1989, с.64–70.

Рецензент: Пьянов В.М.