

АЛГОРИТМ ПОЗИЦІОНУВАННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ АЕРОПЛАТФОРМ ДЛЯ ЗБІЛЬШЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ПОВІТРЯНОЇ МЕРЕЖІ

Одним із завдань управління наземно-повітряною радіомережею (НПР) є оптимізація пропускної здатності повітряної мережі (ПМ). Відомо, що швидкість передачі даних у сучасних широкосмгових радіоканалах, крім інших факторів, суттєво залежить від відстані між вузлами. Крім цього, гранична пропускна здатність телекомунікаційної аероплатформи (ТА) обмежена протоколом каналного рівня [1]. Тому виникає завдання для системи управління повітряною мережею – знайти положення ТА в зоні обслуговування своїх наземних вузлів, яке забезпечить максимум (заданий рівень) пропускної здатності ПМ при використанні певного протоколу каналного рівня [2].

Задано: $k=1\dots K$ – множина задіяних ТА, їх початкове положення у просторі, відповідно, множина зон покриття наземних вузлів;

R_u – радіус покриття u -ї ТА; n_u – множина наземних вузлів (НВ), які покриті u -ою ТА;

матриця вхідного навантаження $G = \|g_{ab}\|$ за напрямками $a-b$, $a, b \in K$, a – ТА-відправник, b – ТА-отримувач;

маршрути передачі за напрямками передачі $a-b$ – $M = \{m_{ab}\}$;

план розподілу навантаження по радіоканалам згідно визначених маршрутів $G = \|g_{uw}\|$, де $a, b, u, w \in K$;

існуючі відстані між ТА $R = \|r_{uw}\|$, $r_{uw} \leq r_{\max}$, які визначають потенційну швидкість передачі (пропускну здатність) між сусідніми ТА s_{uw} , $u, w \in K$; r_{\max} – гранична дальність радіозв'язку між ТА, яка може бути розрахована, виходячи з параметрів радіозасобів та відношення сигнал-шум в точці прийому при певній швидкості передачі [2];

значення швидкостей передачі між ТА для набору сигнально-кодових конструкцій, ширини смуги пропускання відповідного протоколу доступу до радіоканалу;

потужності передачі ТА – P_w .

Обмеження та припущення: кожна ТА здійснює інформаційний обмін із сусідніми ТА без інтерференції. Це припущення може бути досягнуто наступними шляхами: кожна ТА обладнана кількома прийомопередавачами (інтерфейсами); кожна ТА реалізує технологію MU-MIMO (Multi-User Multiple-Input-Multiple-Output).

Всі ТА мають однакову максимальну дальність передачі, яка значно більша дальності передачі між ТА-наземний вузол. Реалізовано частотно-територіальне планування зон обслуговування наземних вузлів. Значення сигнал/шум SNR постійно вимірюється в ТА з метою динамічного призначення сигнально-кодової конструкції для кожного фрейму даних, який передається.

Необхідно: знайти положення ТА, які максимізують пропускну здатність повітряної мережі (окремого напрямку передачі) при визначених навантаженні та маршрутах передачі, або задовольнити задане навантаження в повітряній мережі (за напрямком передачі).

Рішення. Пропускна здатність мережі ТА S визначається сумою пропускних здатностей s_{ab} в напрямках передачі $a-b$, пропускна здатність напрямку дорівнює сумі пропускних здатностей l -маршрутів передачі, пропускна здатність маршруту s_{mab} дорівнює мінімальному значенню пропускних спроможностей радіоканалів, які входять до його складу:

$$S = \sum_{i=1}^n s_{ab}, s_{ab} = \sum_{l=1}^L m_l, s_{m_{ab}} = \min\{s_{uw}\}, uw \in m_{ab}, a, b, u, w \in K, \quad (1)$$

де m_{ab} – маршрут від ТА-відправника a до ТА-отримувача b , s_{uw} – пропускна здатність між сусідніми ТА u та w .

Цільова функція визначається як максимум (забезпечення заданої) пропускної здатності всіх напрямів передачі (2, 3):

$$\max S (S \geq S_{\text{зад}}), \quad (2)$$

або максимум (забезпечення заданої) пропускної здатності в визначених напрямках передачі $a-b$:

$$\max s_{ab} (s_{ab} \geq g_{ab}), \quad (3)$$

при обмеженнях (4 – 7)

$$\text{на відстань можливого переміщення } u\text{-го ТА} - 0 \leq d_u \leq d_{u\text{max}}, \quad (4)$$

$$\text{на значення пропускної здатності радіоканалів між ТА} - s_{uv} \geq g_{uv}, \quad (5)$$

на рівень вхідного навантаження i -х наземних вузлів на кожному ТА в своїй зоні обслуговування

$$\Theta_u - g_u(\Theta_u) = \sum_{i \in 1}^{n_u} g_i \leq s_{u\text{max}}, \quad \forall i \in \Theta_u, \quad (6)$$

$$\text{на кількість покритих наземних вузлів } u\text{-ою ТА} - n_u \leq n_{u\text{min}}. \quad (7)$$

Основні етапи алгоритму збільшення пропускної здатності в повітряній мережі шляхом зміни положення ТА полягають в наступних кроках:

1. Визначити нове положення кожної ТА у просторі (при забезпеченні заданого рівня покриття визначених наземних вузлів (7), яке призводить до зменшення відстані із сусідніми ТА і збільшення пропускної здатності радіоканалів між ними.

2. Визначити нові пропускні здатності маршрутів відповідно нових отриманих значень пропускних спроможностей радіоканалів між ТА.

3. Перерозподілити вхідний трафік згідно нових значень пропускних здатностей маршрутів для задоволення заданого рівня вхідного трафіка.

Якщо вимоги передачі трафіка задоволені, то закінчити алгоритм, інакше перехід до кроку 1.

На рис. 1 продемонстрований варіант зміни положення чотирьох ТА для забезпечення заданих чотирьох напрямів передачі з навантаженням $g_{13}=3, g_{14}=3, g_{34}=6, g_{24}=4$ за визначеними маршрутами передачі $m_{13}=\{1-2-3\}, m_{14}=\{1-2-4\}, m_{34}=\{3-2-4\}, m_{24}=\{2-4\}$. На вихідному положенні ТА при сумарному навантаженні $G = 16$ вихідна сумарна пропускна здатність мережі дорівнює сумі пропускних спроможностей напрямів (вираз 1): $S = s_{13} + s_{14} + s_{34} + s_{24} = 3 + 3 + 3 + 3 = 12$ (рис. 1а).

Після прийняття рішення з переміщення ТА відбулись зміни пропускних здатностей радіоканалів між ТА: $s_{12} = 8 \rightarrow s_{12} = 7, s_{23} = 6 \rightarrow s_{12} = 10, s_{24} = 9 \rightarrow s_{24} = 12$. При аналогічному вхідному навантаженні $G = 16$ пропускна спроможність мережі вже дорівнює $S = 3+3+6+4 = 16$ (рис. 1б) та задовольняє вимогам навантаження.

Основна проблема – це значна кількість варіантів розміщення ТА. Тому необхідно обмежити кількість можливих місць розміщення ТА для підвищення пропускної здатності радіоканалів між ТА.

Потенційна можливість зміни відстані між ТА d_{uv} залежить від граничного значення можливого переміщення ТА $d_{u\text{max}}$, яке, відповідно, залежить від параметрів радіообладнання наземних вузлів (потужність передавача, коефіцієнти підсилення антени тощо), цільової функції управління (наприклад, відсоток покриття наземних вузлів).

Наприклад, якщо наземні вузли не мають режиму маршрутизації за протоколами MANET, тоді ТА повинні покривати всі наземні вузли, або цільова функція управління НІР визначає необхідність покриття всіх наземних вузлів ТА (рис. 2а).

Якщо наземні вузли мають режим MANET та можуть здійснювати обмін між собою, тоді цільовою функцією може бути забезпечення зв'язності окремих підмереж наземних вузлів. Крім цього, це дає можливість значно збільшувати розмір кола можливого переміщення ТА (рис. 2б).

Цільова функція (ЦФ) в формулах (2, 3) є невіпуклою і тому може мати локальні максимуми. Відомі методи отримання рішення таких рівнянь мають значну обчислювальну складність. Тому пропонується використати ітераційний алгоритм для обчислення наближеного значення положення ТА, яке намагається максимізувати пропускну здатність

між ТА. Цей алгоритм оцінює пропускну здатність в різних положеннях ТА в середині кола переміщення і вибирає позицію, яка має максимум розрахованої пропускну здатності.

Враховуючи, що практично неможливо розрахувати пропускну здатність у кожній точці всередині кола переміщення ТА, яке містить безліч точок, визначається сітка точок всередині кола, як показано на рис. 3. Для досягнення заданої точності обчислень крок сітки можна регулювати відносно значення, яке залежить від кроку зміни швидкості передачі від відстані за обраним MAC-протоколом.

Алгоритм пошуку рішення системою управління НПР включає наступні кроки:

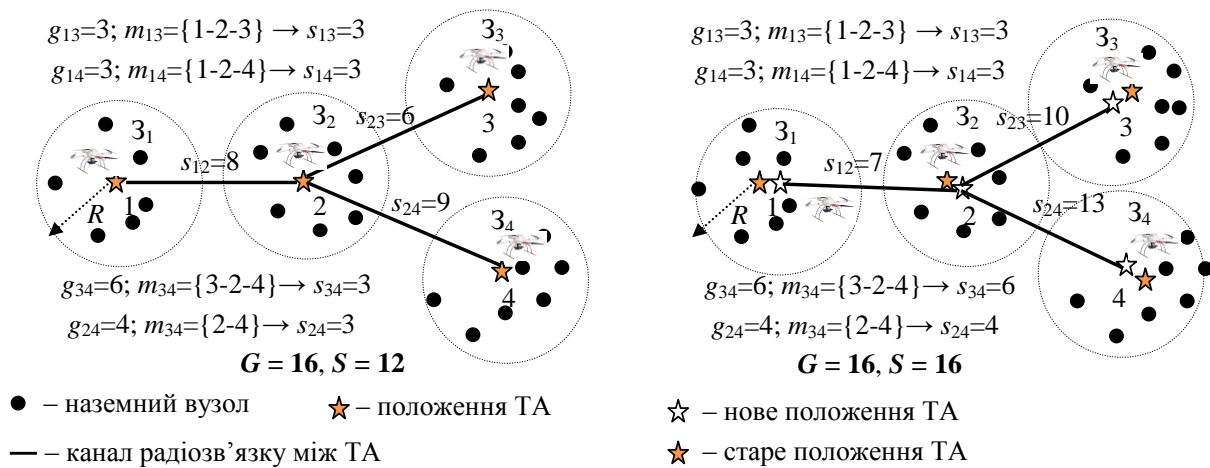
1. Збір даних про стан повітряної мережі (координати розміщення, потужність передачі, співвідношення сигнал/шум, значення пропускну здатності радіоканалів тощо).

2. Аналіз виконання вимог інформаційного обміну.

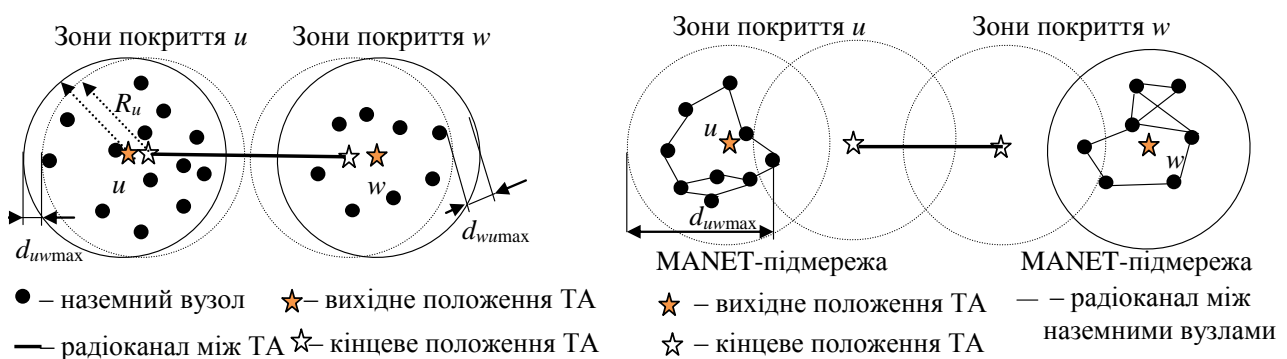
Перевірка наявності пропускну здатності напрямів (маршрутів, радіоканалів) передачі визначеному рівню вхідного навантаження (обмеження 3).

3. Визначення пріоритету цільових функцій (ЦФ) управління мережею.

4. Розрахунок для кожної u -ої ТА значення відстані максимально можливого переміщення d_{uwmax} між всіма сусідніми w -ми ТА.



а) вихідне положення ТА б) кінцеве рішення з положення ТА
 Рис. 1. Рішення про зміну положення ТА для збільшення пропускну здатності ПМ



а) наземні вузли без режиму MANET б) наземні вузли з режимом MANET

Рис. 2. Ілюстрація відстані можливого переміщення ТА

ЯКЩО ЦФ – збереження всіх наземних вузлів зон обслуговування ТА, ТО – побудова кола можливого переміщення кожного ТА.

ЯКЩО ЦФ – максимізація пропускну здатності в зоні обслуговування ТА, ТО – пошук рішення з переміщення для цієї ЦФ [4];

ЯКЩО ЦФ – максимізація пропускну здатності в повітряній мережі,

ТО – пошук рішення з переміщення кожного ТА за межами кола обслуговування (з обмеженням на довжину маршрутів наземних вузлів, які опиняться за межами зон обслуговування ТА).

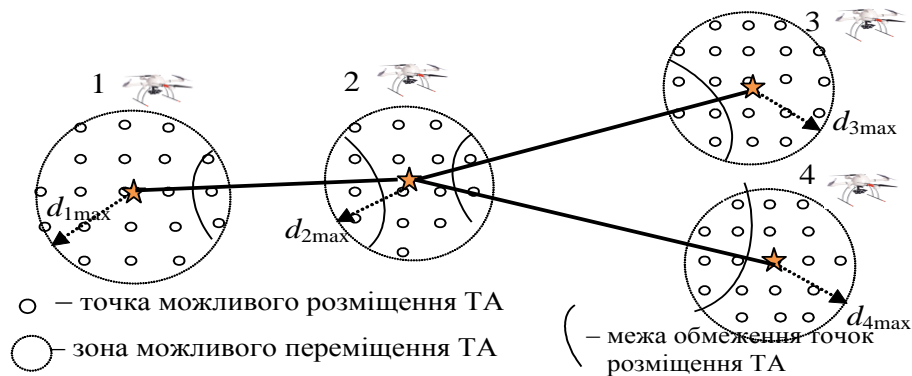


Рис. 3. Можливі місця розміщення ТА в зоні переміщення

5. Для кожної u -ої ТА розрахувати розмір кола $d_{i\max}$ допустимого переміщення для кожної ТА, як мінімальне значення із всіх $d_{i\max}$ зі своїми сусідами.

6. Визначити множину можливих місць розміщення ТА в колі переміщення у вигляді решітки точок.

7. Розрахунок пропускної здатності радіоканалів між кожними точками решітки кола можливого переміщення між сусідніми вузлами.

8. Вибір точок решітки з максимальною пропускною здатністю радіоканалів між ТА, як результат рішення – бажане положення ТА.

9. Розрахунок нових пропускних здатностей маршрутів відповідно нових отриманих значень пропускних спроможностей радіоканалів між ТА (вираз 1).

Розрахунок значення пропускної здатності мережі (вираз 1).

10. Перерозподіл вхідного трафіка згідно нових значень пропускних здатностей маршрутів для задоволення його заданого рівня.

11. Перевірка на задоволення вимог вхідного трафіка за радіоканалами та інформаційними напрямками повітряної мережі (нерівності 6 та 4).

ЯКЩО ці нерівності не виконуються, ТО – збільшення зони можливого переміщення ТА за рахунок збільшення до граничних значень довжини маршрутів між наземними вузлами із збереженням зв'язності, які знаходяться за межами зони обслуговування (режим MANET).

ЯКЩО всі варіанти перебрані, але неможливо забезпечити заданий рівень навантаження, ТО – обмеження вхідного трафіка, ІНАКШЕ – перехід до п. 6 з новими точками розміщення ТА.

Обчислювальна складність такого алгоритму дуже значна і дорівнює $O((k-1)n_{tu}n_{tw}))$, де n_t – кількість точок можливого розміщення ТА; u, w – сусідні ТА.

Для скорочення варіантів перебору пропонується ряд евристик, які враховують: взаємне розташування ТА в повітряній мережі, рівень завантаження їх радіоканалів, напрямок розташування конкретної ТА, крок точок розміщення.

1. Для збільшення пропускної здатності радіоканалів, ТА, які знаходяться на краю мережі, повинні вибирати свої точки потенційного розміщення ближче до сусідніх ТА із значним рівнем інтенсивності трафіка в радіоканалах. Так для мережі на рис. 3.2 ТА № 1, 3, 4 бажано розмістити ближче до 2-ої ТА.

2. При наявності перенавантажених радіоканалів доцільно зменшити рівень їх завантаження за рахунок збільшення пропускної здатності цих радіоканалів. Наприклад, для мережі на рис. 1 ТА № 2 повинна вибирати положення, яке дозволить збільшити пропускну здатність перенавантажених радіоканалів у маршрутах передачі 2-3 та 2-4.

3. Для визначення розміру діаметра кола можливого переміщення ТА використовується мінімальне значення із всіх $d_{iwm\max}$ зі своїми сусідами. Це доцільно робити, коли сусідні вузли знаходяться у всіх напрямках. Однак, якщо ТА вирішив зменшити відстань з конкретним сусіднім вузлом (вузлами) в певному напрямку, то $d_{iwm\max}$ розраховується в напрямі цього вузла (вузлів), значення якого може бути значно більшим. Це значно зменшує кількість точок можливого розміщення ТА і кількість варіантів перебору. На рис. 3 дугами показано вибір можливих точок розміщення для ТА № 1, 3, 4. Для вузла 2 необхідно вибирати пріоритетний напрямок скорочення, виходячи з необхідності усунення перенавантаження радіоканалів.

4. Для скорочення варіантів перебору пропонується вибирати крок сітки, який дозволяє отримати збільшення або зменшення швидкості передачі згідно визначеного протоколу та параметрів радіозасобів.

Для оцінки ефективності запропонованого алгоритму пошуку положення ТА для максимізації пропускної здатності ПМ було проведено моделювання за допомогою систем моделювання ns3 при обмеженні: відсутність джерел перешкод поза мережею та застосування моделі розповсюдження радіохвиль у вільному просторі. На прикладному рівні вхідний трафік представлений у вигляді трафіка постійної інтенсивності. Канальний протокол IEEE 802.11.

Були проведені експерименти та отримані залежності приросту пропускної здатності при різних топологіях мережі, різному діапазоні вхідного навантаження та різних розмірностях мережі. Крім цього, проведено моделювання числа ітерацій, необхідних для отримання кінцевого рішення. При застосуванні запропонованого алгоритму пропускна здатність мережі збільшується до 30 %. Більший вигаш пропускної здатності досягається при значних величинах зон можливого переміщення вузлів. І вигаш зменшується зі зменшенням величини зон можливого переміщення ТА. Приріст пропускної здатності радіоканалів спостерігається в ТА, які знаходяться на окраїні мережі за умови відсутності цільової функції оптимізації пропускної здатності наземних вузлів у зоні обслуговування.

Зі збільшенням роздільної здатності сітки можливого розташування ТА алгоритм визначає позицію ТА близьку до оптимальної. Однак це значно збільшує кількість обчислень. Час виконання алгоритму для 10 ТА і тисяч точок положення ТА не перевищив секунди. Фактично алгоритм працює в реальному масштабі часу та може бути використаний в спеціальному програмному забезпеченні системи управління ТА.

ЛІТЕРАТУРА

1. Степаненко Є.О., Романюк В.А. Задачі синтезу топологій мереж мобільної компоненти з використанням телекомунікаційних аероплатформ. Збірник наукових праць ВІТІ. 2017. № 3. С. 149 – 157.

2. IEEE Std 802.11. IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems. Local and metropolitan area networks – Specific requirements. Part11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. 2016.

3. Романюк В.А., Степаненко Є.О. Модель позиціонування телекомунікаційної аероплатформи для оптимізації пропускної здатності повітряної мережі. Збірник наукових праць ВІТІ. № 2, 2019. С. 78 – 85.

4. Степаненко Є.О. Модель позиціонування телекомунікаційної аероплатформи для оптимізації пропускної здатності вузлів зони покриття. Збірник наукових праць ВІТІ. 2019. № 1. С. 97 – 104.