

## МОДЕЛЬ ПОЗИЦІОНУВАННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ АЕРОПЛАТФОРМ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ПОВІТРЯНОЇ МЕРЕЖІ

*Розглядається наземно-повітряна мережа радіозв'язку, що складається із сукупності телекомунікаційних аероплатформ (ТА), які обслуговують наземні вузли радіозв'язку. Вирішується задача знаходження положення множини ТА в просторі для максимізації пропускної спроможності повітряної мережі при заданих вхідному навантаженні і маршрутах передачі. Запропоновано аналітичну модель розрахунку і алгоритм знаходження положення ТА, що забезпечує максимум (задане значення) пропускної здатності повітряної мережі. Основні кроки алгоритму полягають в наступному:*

*для кожної ТА шукається можливе положення в просторі, яке зменшує відстань із сусідніми ТА і призводить до збільшення пропускної здатності радіоканалів між ними;*

*перерозподіляється вхідний трафік за новими маршрутами для задоволення передачі його заданого рівня;*

*вибирається нове положення ТА з допустимої множини положень і алгоритм повторюється знову до отримання максимального значення пропускної здатності повітряної мережі.*

*Алгоритм характеризується значною обчислювальною складністю. Тому для скорочення перебору точок можливих варіантів розміщення ТА запропонований ряд евристик. Здійснено програмну реалізацію моделі і проведені експерименти при різній розмірності повітряної мережі та рівня вхідного трафіку. Результати моделювання продемонстрували можливість збільшення пропускної спроможності на 20 – 25% при отриманні рішення в реальному масштабі часу.*

**Романюк В.А., Степаненко Є.А. Модель позиціонування телекомунікаційних аероплатформ для оптимізації пропускної спроможності повітряної мережі.** *Рассматривается наземно-воздушная сеть радиосвязи, состоящая из совокупности телекоммуникационных аероплатформ (ТА), обслуживающих наземные узлы радиосвязи. Решается задача нахождения положения множества ТА в пространстве для максимизации пропускной способности воздушной сети при заданных входной нагрузке и маршрутах передачи. Предложены аналитическая модель расчета и алгоритм нахождения положения ТА, обеспечивающий максимум (заданное значение) пропускной способности воздушной сети. Основные шаги алгоритма заключаются в следующем:*

*для каждой ТА ищется возможное положение в пространстве, которое уменьшает расстояние с соседними ТА и приводит к увеличению пропускной способности радиоканалов между ними;*

*перераспределяется входной трафик по новым маршрутам (каналам) для удовлетворения передачи его заданного уровня;*

*выбирается новое положение ТА из допустимого множества положений и алгоритм повторяется снова до получения максимального значения пропускной способности воздушной сети.*

*Алгоритм характеризуется значительной вычислительной сложностью. Поэтому для сокращения перебора точек возможных вариантов размещения ТА предложен ряд эвристик. Осуществлена программная реализация модели и проведены эксперименты при различной размерности воздушной сети и уровня входного трафика. Результаты моделирования продемонстрировали возможность увеличения пропускной способности на 20 – 25 % при получении решения в реальном масштабе времени.*

**V.Romaniuk, E. Stepanenko Positioning model of telecommunication aeroplatform to optimize the capacity of flying networks.** *An flying ad-hoc networks (FANET) is considered, consisting of a set of telecommunication UAV serving ground radio communications nodes. The problem of finding the position of a set of UAVs in space in order to maximize the capacity of the air network for a given input load and transmission routes is solved. An analytical model of calculation and the algorithm for finding the position of the UAV, providing the maximum (specified value) of the capacity of the air network are proposed. The basic steps of the algorithm are as follows:*

*for each UAV, a possible position in space is sought, which reduces the distance with neighboring UAVs and leads to an increase in the capacity of the radio channels between them;*

*input traffic is redistributed along new routes to meet the transmission of its specified level;*

*A new UAV position is selected from the allowable set of positions and the algorithm is repeated again until the maximum throughput of the air network is obtained.*

*The algorithm is characterized by considerable computational complexity. Therefore, a series of heuristics was proposed to reduce the search for points of possible UAV placement options. A software implementation of the model has been carried out and experiments have been carried out at various dimensions of the air network and the level of incoming traffic. The simulation results demonstrated the possibility of increasing the throughput by 20–25% when receiving a solution in real time.*

**Ключові слова:** наземно-повітряна мережа, пропускна здатність, телекомунікаційна аероплатформа.

**Постановка завдання в загальному вигляді.** Завдяки мобільності, оперативності, адаптації швидкості і висоти польоту телекомунікаційні аероплатформи (ТА) можуть ефективно доповнювати існуючі наземні мережі зв'язку [1 – 5]. Сукупність ТА будуть створювати повітряні мережі (ПМ) типу FANET (Flying Ad-Hoc Networks), які призначені для виконання наступних основних завдань [1, 2]: забезпечення зв'язності між незв'язними сегментами наземної мережі, швидка організація резервної (додаткової) мережі (каналів) радіозв'язку з наземними абонентами; збільшення зони покриття в порівнянні з наземними ретрансляторами; покращення показників якості інформаційного обміну (пропускної здатності, часу передачі), тощо. Застосування ТА дозволяє будувати нову *наземно-повітряну архітектуру* систем радіозв'язку цивільного і військового призначення, однак потребує вирішення системою управління мережею множини задач планування і оперативного управління: тривимірного розгортання ТА; розрахунку часу і траєкторії польоту; управління топологією, забезпечення заданої якості інформаційного обміну тощо.

Одним із завдань управління наземно-повітряною мережею є оптимізація пропускної здатності повітряної мережі. Відомо, що швидкість передачі даних у сучасних широкосмугових радіоканалах, крім інших факторів, суттєво залежить від відстані між вузлами. Крім цього, гранична пропускна здатність ТА обмежена протоколом каналного рівня. 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.

#### **Аналіз останніх публікацій і напрямки вирішення завдання.**

На сьогоднішній час значна кількість публікацій присвячена дослідженню процесів управління наземно-повітряними мережами, зокрема підвищенню їх пропускної здатності.

В [3] запропонований алгоритм оптимізації пропускної здатності в зоні обслуговування ТА шляхом визначення його положення тільки між двома наземними вузлами. За результатами роботи алгоритму кластеризації [4] мережа наземних вузлів буде розбита на множину зон покриття, які обслуговуються відповідними телекомунікаційними аероплатформами. Тобто вирішено завдання пошуку зв'язної топології наземно-повітряних мереж. В [5] розглянута модель визначення положення ТА для максимізації пропускної здатності наземних вузлів в зонах покриття ТА. В [6] запропонована узагальнена методика управління топологією наземно-повітряних мереж. Наведені правила корегування положення ТА для досягнення певної цільової функції управління, в тому числі для збільшення пропускної здатності ПМ. Приведено правило збільшення швидкості передачі в радіоканалі між ТА для зменшення рівня завантаженості між ними за рахунок зменшення відстані між ТА. В роботі [7] вирішувалось завдання збільшення пропускної здатності повітряної мережі за рахунок визначення можливого положення ТА у просторі тільки в межах своїх зон покриття шляхом визначення відстані між ТА, однак, запропонований алгоритм має значну обчислювану складність.

Пропонується розвиток моделей, запропонованих в [6, 7], для визначення положення ТА в ПМ для максимізації її пропускної здатності за рахунок розширення можливого кола переміщення ТА, розробки алгоритму реалізації моделі меншої складності.

**Мета статті:** розробити модель знаходження положення сукупності ТА у просторі для максимізації (забезпечення заданого рівня) пропускної повітряної мережі (напряму мережі).

**Виклад основного матеріалу.** Пропускна здатність є важливим показником ефективності функціонування мережі. Вона визначається як фактична швидкість передачі інформації і зазвичай вимірюється в бітах на секунду. Формула Шенона дає теоретичний максимум

$s = \Delta F \log_2(1 + SNR)$ , де  $s$  – пропускна здатність в бітах на секунду,  $SNR = P_c / P_{ш}$  – співвідношення потужностей сигнал/шум в каналі,  $P_c$  – потужність сигналу на вході приймача в каналі,  $P_{ш}$  – потужність шуму,  $\Delta F$  – ширина смуги каналу в герцах.

Якщо припустити, що усі ТА знаходяться достатньо високо, і, принаймі, сусідні ТА перебувають у межах прямої видимості один з одним, то ослаблення радіосигналу між ними можна розраховувати за формулою втрат у вільному просторі:

$$L_0 = 10 \lg \left( \frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2,$$

де  $r$  – відстань між радіостанціями,  $\lambda$  – довжина хвилі.

При цьому потужність сигналу на вході приймача  $P_c$  визначається, як

$$P_c = \frac{P_{tx} \cdot G_{tx} \cdot G_{rx}}{L_0},$$

де  $P_{tx}$  – потужність передачі передавального вузла,  $G_{tx}$  і  $G_{rx}$  – коефіцієнти посилення на передавальному і приймальному вузлах відповідно.

Відомо, що в протоколах сімейства IEEE 802.11, в широкосмугових режимах роботи радіозасобів Aselsan, Harris [8 – 10] дані можуть передаватися з різною швидкістю, значення якої залежить від ширини смуги каналу та сигнально-кодової конструкції, яка використовується.

Наприклад, у стандарті IEEE 802.11n є 16 конструкцій та 4 значення ширини смуги каналу. При цьому, чим більша ширина каналу та позиційність модуляції, тим гіршою стає чутливість приймача і тим більше значення відношення сигнал/шум необхідне на його вході для забезпечення заданої достовірності прийому. Крім цього очевидно, що значення  $SNR$  при зменшенні відстані між радіозасобами буде зростати [9].

Значення ширини каналу повинне визначатися на етапі проектування радіомережі, виходячи з кількості ТА, величини зони покриття та необхідної пропускної спроможності.

Тобто, якщо прийняти енергетичні параметри обладнання ( $P_{tx}$ ,  $G_{tx}$ ,  $G_{rx}$ ) та частоту незмінними, *швидкість передачі (пропускну спроможність) в радіоканалі можна регулювати, змінюючи відстань між ТА і обираючи відповідну сигнально-кодову конструкцію.*

*Модель мережі.* Розглядається неоднорідна ієрархічна мережа радіозв'язку. Наземні вузли випадковим чином розподілені на певній території, мають радіозасоби певної потужності (військовослужбовці, транспортні засоби), мобільні, оснащені системою позиціонування.

ТА і наземні вузли оснащені однаковим радіоустаткуванням і підтримують однакові протоколи інформаційного обміну (наприклад, IEEE 802.11, Aselsan тощо), мають обмежені дальність радіозв'язку і швидкість обміну [10]. Кожен вузол мережі має власну систему управління, діє в кооперації з іншими вузлами мережі і ТА.

Кожна ТА фактично представляє собою безпроводний маршрутизатор, оснащена двома комплектами радіообладнання (один для зв'язку з наземними вузлами, другий для зв'язку з іншими ТА), 4-ма антенами (двома всеспрямованими та двома спрямованими [11]). У початковій фазі обслуговування вузлів, коли ТА здійснює пошук будь-якого вузла, ТА використовує всеспрямовану антену, при передачі даних конкретному вузлу – спрямовану.

Телекомунікаційна аероплатформа має можливість переміщуватися в трьох вимірах із змінною швидкістю або зависати на обмеженій висоті та на обмежений час. ТА має власну систему управління, що дозволяє самостійно приймати рішення в умовах відсутності зв'язності з центром управління мережею. Коли в зону радіозв'язку ТА входить інша ТА, здійснюється обмін службовими повідомленнями про наявну інформацію свого стану (параметри передачі та радіоканалу, рівень навантаження, зв'язність, наявні маршрути тощо). Вважається, що кожен ТА знає свої координати, а також координати і параметри сусідніх ТА.

*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  $a-b$ ,  $a, b \in K$ ,  $a$  – відправник,  $b$  – 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 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 [11];

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 може одночасно вести інформаційний обмін з сусідніми ТА без інтерференції. Це припущення може бути досягнуто наступними шляхами: 1) кожна ТА обладнана декілька кількома прийомопередавачами (інтерфейсами); 2) кожна ТА реалізує технологію MU-MIMO (Multi-User Multiple-Input-Multiple-Output). Всі ТА мають однакову максимальну дальність передачі, яка значно більше дальності передачі між ТА-наземний вузол. Реалізовано частотно-територіальне планування зон обслуговування наземних вузлів. Значення SNR постійно вимірюється в ТА з метою динамічного призначення сигнально-кодової конструкції для кожного фрейму даних, який передається.

*Необхідно:* знайти положення ТА, яке максимізує пропускну здатність мережі (окремого напрямку передачі) при визначеному навантаженні та маршрутах передачі або задовольнити задане навантаження в повітряній мережі (на напрямку передачі).

Пропускна здатність мережі ТА  $S$  визначається сумою пропускну здатностей  $s_{ab}$  в напрямках передачі  $a-b$ , пропускна здатність напрямку дорівнює сумі пропускну здатностей  $l$ -маршрутів передачі, пропускна здатність маршруту  $s_{mab}$  дорівнює мінімальному значенню пропускну здатностей 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) пропускну здатності всіх напрямків передачі:

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

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

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

при обмеженнях:

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

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

на рівень вхідного навантаження  $i$ -х наземних вузлів на кожному ТА в своїй зоні обслуговування  $\Theta_u$  –

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

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

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

1. Намагаємось визначити положення кожного ТА у просторі при забезпеченні заданого рівня покриття (визначених) наземних вузлів (7), яке призводить до зменшення

відстані з сусідніми ТА, що може призвести до збільшення пропускної здатності радіоканалів між ТА.

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

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

На рис. 1 продемонстрований варіант зміни положення чотирьох ТА для забезпечення заданих чотирьох напрямів передачі з навантаженням  $g_{13}=3, g_{14}=3, g_{34}=6, g_{24}=4$  по визначених маршрутах 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 рішення по переміщенню ТА (відбулись зміни пропускних здатностей радіоканалів між ТА:  $s_{12} = 8 \rightarrow s_{12} = 7, s_{23} = 6 \rightarrow s_{23} = 10, s_{24} = 9 \rightarrow s_{24} = 12$ ) при аналогічному навантаженні  $G = 16$  пропускна спроможність мережі дорівнює  $S = 3 + 3 + 6 + 4 = 16$  (рис. 1б).

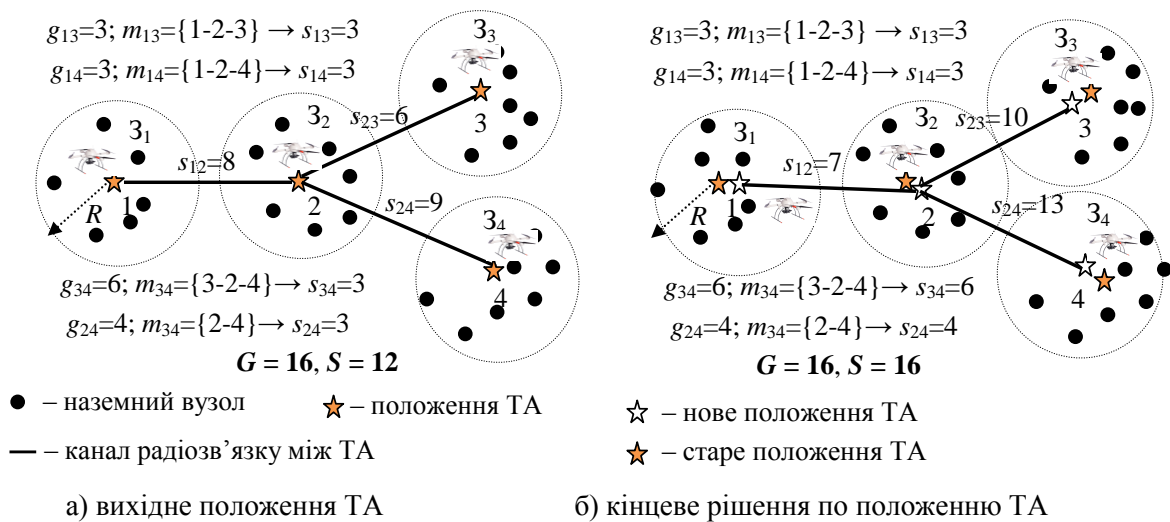


Рис. 1. Рішення про зміну положення ТА для збільшення пропускної здатності повітряної мережі

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

Наприклад, якщо наземна мережа не має режиму маршрутизації за протоколами MANET, тобто ТА повинні покривати всі наземні вузли або цільова функція управління визначає необхідність покриття всіх наземних вузлів ТА.

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. 2).

Цільова функція 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 пропускної здатності.

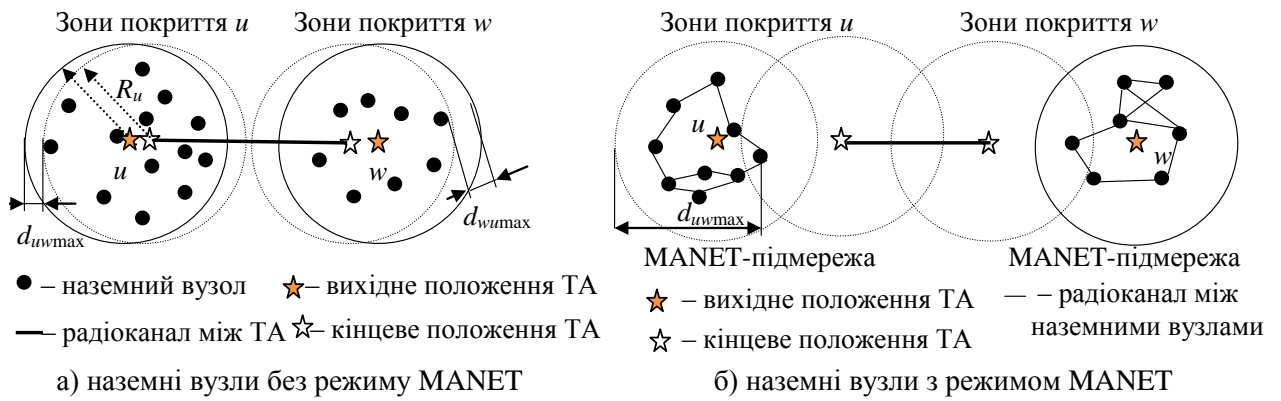


Рис. 2. Ілюстрація відстані можливого переміщення ТА

Враховуючи, що практично неможливо розрахувати пропускну здатність у кожній точці всередині кола переміщення ТА, яке містить безліч точок, визначимо сітку точок всередині кола, як показано на рис. 3. Для досягнення заданої точності обчислень крок сітки можна регулювати [5].

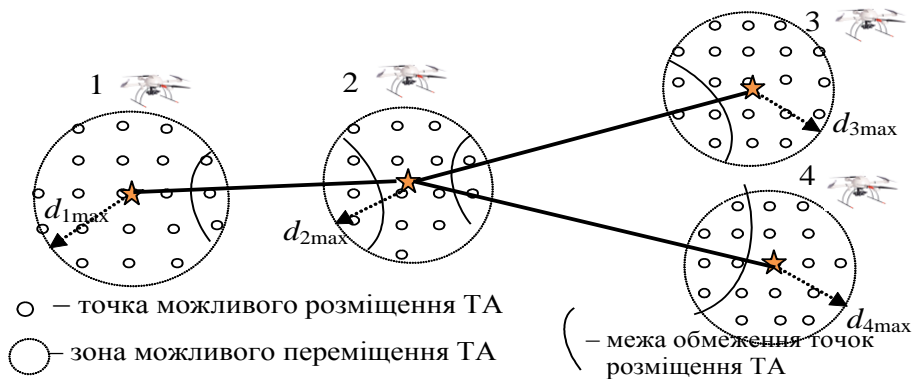


Рис. 3. Можливі місця розміщення ТА в зоні переміщення

Алгоритм пошуку рішення включає наступні кроки:

1. Збір даних про стан повітряної мережі.
2. Аналіз виконання вимог інформаційного обміну.

Перевірка наявної пропускну здатності напрямів передачі визначеному рівню навантаження (обмеження 3). Визначення невідповідності існуючій пропускну здатності напрямів рівню навантаження.

3. Визначення пріоритету цільових функцій (ЦФ) управління мережею:
4. Для кожної  $u$ -ої ТА розрахувати відстань максимального переміщення  $d_{uwmax}$  між всіма сусідніми  $w$ -ми 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 по переміщенню для цієї ЦФ [5];

ЯКЩО ЦФ – максимізація пропускну здатності в повітряній мережі,

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

5. Для кожної  $u$ -ої ТА розрахувати діаметр кола  $d_{imax}$  допустимого переміщення для кожної ТА, як мінімальне значення із всіх  $d_{uwmax}$  зі своїми сусідами.

6. Визначення множини можливих місць розміщення ТА в колі переміщення у вигляді решітки точок.

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

Визначення 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 5 та 3).

ЯКЩО 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. 1 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 в маршрутах передачі 2-3 та 2-4.

3. Для визначення розміру діаметра кола можливого переміщення ТА використовується мінімальне значення із всіх  $d_{uwmax}$  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  $d_{uwmax}$  розраховується в напрямі цього вузла (вузлів), значення якого може бути значно більшим. Це значно зменшує кількість точок можливого розміщення ТА і зменшує 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, якій 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 MATLAB.

Обмеження: відсутність джерел перешкод поза мережею та застосування моделі розповсюдження радіохвиль у вільному просторі. На прикладному рівні вхідний трафік

представлений у вигляді трафіку 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 запропонованої моделі пропускну здатність

мережі збільшується в середньому на 20 – 25 %. Більший вигравш пропускної здатності досягається при значних величинах зон можливого переміщення вузлів. І вигравш 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 в 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.

Таким чином, розроблена аналітична модель та алгоритм її реалізації щодо визначення положення ТА у просторі для оптимізації пропускної здатності повітряної мережі при реалізації певного протоколу доступу до каналу. Результати моделювання продемонстрували збільшення пропускної здатності повітряної мережі в середньому на 20 – 25 %. Рішення отримані в реальному масштабі часу, тобто модель може бути використана для оперативного управління положенням мережі ТА.

Напрямом подальших досліджень є розробка вирішальних правил переміщення ТА при наявності сукупності цільових функцій управління наземно-повітряною мережею.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Mohammad Mozaffari, Walid Saad, Mehdi Bennis, Young-Han Nam, Merouane Debbah. A Tutorial on UAVs for Wireless Networks: Applications, Challenges, and Open Problems. <https://arxiv.org/abs/1803.00680>, 2018.
2. Lav Gupta, Raj Jain, Gabor Vaszkun Survey of Important Issues in UAV Communication Networks // IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 18, Issue 2, 2016, Page(s) 1123 – 1152, DOI: 10.1109/COMST.2015.2495297.
3. Erlend Larsen, Lars Landmark and Øivind Kure. Optimal UAV Relay Positions in Multi-Rate Networks // Published in Wireless Days, 2017, DOI:10.1109/WD.2017.7918107.
4. Романюк В.А., Степаненко Є.О. Алгоритми побудови топології мереж радіозв'язку з телекомунікаційними аероплатформами // Збірник наукових праць ВІТІ. – 2018. – № 3. – С. 70 – 78.
5. Степаненко Є.О. Модель позиціонування телекомунікаційної аероплатформа для оптимізації пропускної здатності вузлів зони покриття // Збірник наукових праць ВІТІ. – 2019. – № 1. – С. 97 – 104.
6. Романюк В.А., Степаненко Є.О. Методика управління топологією наземно-повітряних радіомереж військового призначення // Збірник наукових праць ВІТІ. – 2018. – № 4. – С. 92 – 103.
7. Shams ur Rahman, You-Ze, Cho, Ajmal Khan. Positioning of UAVs for Throughput Maximization in Software Defined Disaster Area UAV Communication Networks Journal of Communications and Networks, · October 2018, DOI: 10.1109/JCN.2018.000070.
8. Гепко И.А., Олейник В.Ф., Чайка Ю.Д., Бондаренко А.В. Современные беспроводные сети: состояние и перспективы развития. Киев: ЭКМО, 2009. – 672 с.
9. IEEE Std 802.11. IEEE Standard for Information technology. Specific requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control and Physical Layer Specifications. 2016.
10. Гурський Т.Г., Степаненко Є.О., Шишацький А.В. Оцінка граничної дальності зв'язку на сучасних радіо- та радіорелейних лініях // Збірник наукових праць ВІТІ. – 2019. – № 1. – С. 6 – 17.
11. Abdel Pah Alshbatat and Liang Dong. Adaptive MAC Protocol for UAV Communication Networks Using Directional Antennas // International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC), 2010, DOI: 10.1109/ICNSC.2010.5461589.