

МЕТОДИКА УПРАВЛІННЯ ТОПОЛОГІЄЮ НАЗЕМНО-ПОВІТРЯНИХ РАДІОМЕРЕЖ ВІЙСЬКОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Запропоновано методику управління топологією наземних вузлів з використанням телекомунікаційних аероплатформ. Завдання управління зведена до задачі ситуаційного управління. Запропоновано правила з пошуку оптимального положення і переміщення ТА для задоволення різних цільових функцій управління мережею (забезпечення зв'язності, заданого покриття, якості передачі даних).

Романюк В.А., Степаненко Є.А. Методика управління топологією наземно-воздушних мереж радіосвязи воєнного призначення. Предложена методика управления топологией наземных узлов с использованием телекоммуникационных аероплатформ. Задача управления сведена к задаче ситуационного управления. Предложены правила по поиску оптимального положения и перемещения ТА для удовлетворения различных целевых функций управления сетью (обеспечение связности, заданного покрытия, качества передачи данных).

V. Romaniuk, E. Stepanenko Methodology of topology management of ground-air radio military communication networks. A method for managing the topology of ground nodes using telecommunication aerial platforms is proposed. The task of management is reduced to the task of situational management. The proposed rules for finding the optimal position and moving the TA to meet the various target network management functions (ensuring connectivity, given coverage, data transmission quality).

Ключові слова: наземно-повітряна мережа, алгоритми управління топологією, правила зміни положенням ТА.

Постановка завдання. Процес функціонування мереж радіозв'язку військового призначення відбувається в умовах:

високої мобільності вузлів (абонентів) мережі;

значного віддалення підрозділів один від одного, яке може значно перевищувати максимальну дальність радіозв'язку штатних радіозасобів;

обмеженості дальності радіозв'язку із-за обмеженості потужності передавачів, можливостей штатних антен, умов розповсюдження радіохвиль, місцевості та впливу радіоелектронного впливу супротивника тощо;

вогневого враження тощо.

Ці умови призводять до втрати радіозв'язності як між абонентами, так і мережами, погіршення якості радіоканалів, перенавантаження напрямів, маршрутів, радіоканалів передачі, тощо. Застосування телекомунікаційних аероплатформ (ТА) на базі БпЛА дозволяє значно покращити показники функціонування мереж військового радіозв'язку та будувати нові архітектури систем радіозв'язку військового призначення – наземно-повітряні мережі (НПМ) [1 – 11]. При цьому, основними перевагами повітряних мереж є швидке розгортання ТА в певних точках простору та можливість отримання радіоканалів прямої видимості.

Сукупність наземних вузлів формують наземні мережі типу MANET (Mobile Ad-Hoc Networks) [1]. Під вузлом наземної мережі будемо розуміти транспортний засіб, бойову машину, командно-штабну машину, мобільну базову станцію, військовослужбовця тощо, які оснащені засобами радіозв'язку. Сукупність ТА будуть створювати транспортну повітряну мережу типу FANET (Flying Ad-Hoc Networks), яка призначена для виконання таких основних завдань (рис. 1): забезпечення зв'язності між незв'язними сегментами наземної мережі, швидкої організації резервної (додаткової) мережі (напрямів, маршрутів, каналів) радіозв'язку з наземними вузлами, збільшення зони покриття, покращення показників якості інформаційного обміну (пропускної здатності, часу передачі, тощо) за рахунок зміни її топології (та відповідно зменшення інтенсивності змін топології наземної мережі), можливостей побудови коротших маршрутів передачі та перерозподілу трафіка.

Ефективне управління НПМ неможливо без відповідної системи управління, яка повинна забезпечити збір, аналіз та прийняття рішення по управлінню в режимі реального

часу. Посадовим особам центру управління мережею (ЦУМ) необхідно оперативно приймати рішення (технологічні, організаційні) щодо змін топології мережі. *Топологія визначає потенційні показники функціонування мережі (зв'язність, покриття, пропускну здатність, час доставки тощо) по передачі інформаційних потоків та якості обслуговування користувачів.* Тому розробка методики управління топологією НПМ є актуальною науковою задачею.

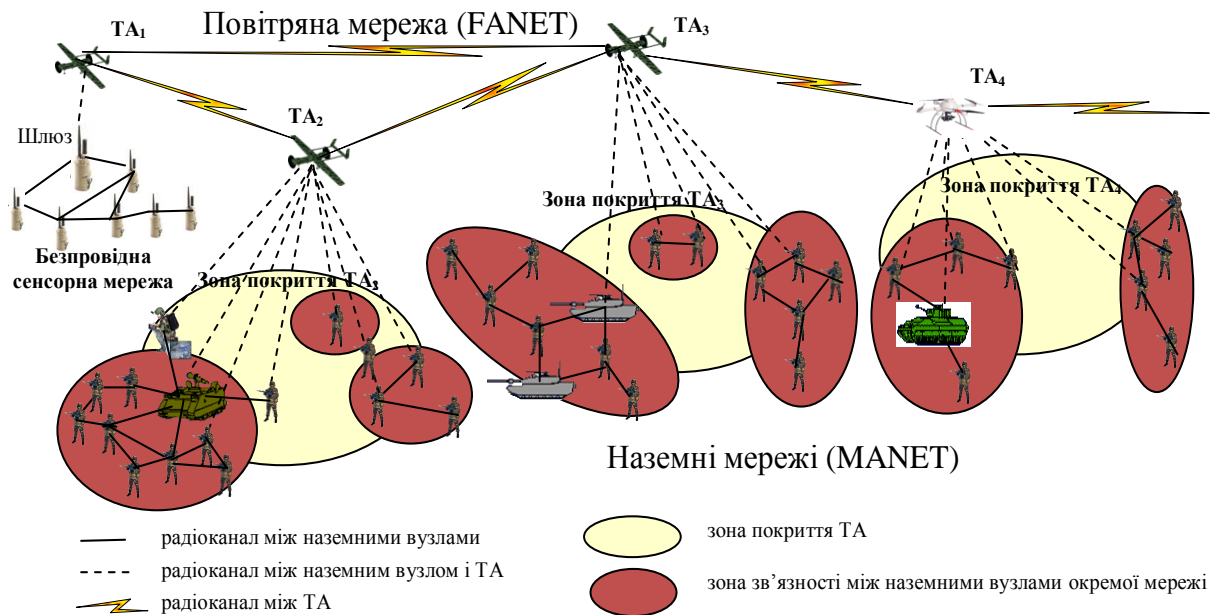


Рис. 1. Варіант топології наземно-повітряної мережі

Аналіз останніх публікацій.

Системні підходи, щодо створення НПМ, розглянуті в роботах [1 – 3]. Так в монографії [1] запропонована архітектура перспективної мобільної компоненти військового призначення та розглянуті основні характеристики та методи управління мережами типу MANET. В роботах [2, 3] більш детально розглянуті особливості побудови, методи реалізації FANET на різних рівнях еталонної моделі взаємодії відкритих систем.

В [4] проведена класифікація завдань управління топологією НПМ та наведені математичні моделі її опису, розглянуті цільові функції управління мережею ТА. Серед основних визначені наступні цільові функції: забезпечення зв'язності, оптимум покриття, якість передачі даних. Наведений узагальнений алгоритм управління НПМ.

В [5] наведені математична постановка задач синтезу топології та декілька постановок і алгоритмів рішення задач побудови топології за допомогою ТА.

В [6] деталізовані цільові функції управління НПМ, запропоновано алгоритми побудови топології мереж радіозв'язку з ТА, які базуються на модифікованих алгоритмах кластерного аналізу FOREL (*k*-середніх) та дозволяють забезпечити зв'язність мережі, визначати зони покриття при мінімізації (заданої) кількості телекомунікаційних аероплатформ.

В монографії [7] наведені дослідження зон стабільного та нестабільного покриття ТА в залежності висоти підйому, кривизни поверхні Землі, кута місця, наявності спрямованих антен, приведена методика оцінювання показників функціонування самоорганізуючих радіомереж з ТА. Розроблені математичні моделі оцінки дальності радіозв'язку, пропускну здатності, параметри зон обслуговування, зон покриття, приведені алгоритми керування польотом ТА. Запропонований ряд правил для пошуку рішення по знаходженню положення ТА.

В [8] розглянуті способи побудови магістральної мережі в 3-х рівневих мережах поля бою: солдатської, гелікоптерів та дронів. Для побудови транспортної мережі пропонується

використовувати низку правил знаходження домінуючих множин теорії графів. На думку авторів це дає певну гнучкість (дозволяє враховувати діаметр мережі, різні радіуси передачі, інтерференцію тощо) в порівнянні з методами кластеризації. Робиться висновок, що методи, основані на кластеризації, не завжди є придатні для мереж поля бою, внаслідок високої мобільності вузлів та відповідно значної частоти перекластеризації в багаторівневих мережах. В роботах [9, 10] розглянуті способи досягнення різних цільових функцій при переміщенні ТА для підтримки та встановлення зв'язності між наземними вузлами, між ТА, забезпечення зон покриття, досягнення максимально можливого ступеня охопту, тощо.

В [11] наведена модель переміщення ТА на основі нечіткої логіки, яка враховує наявний ресурс енергії ТА для виконання завдання.

Таким чином, для забезпечення ефективного процесу передачі даних у системі управління НПМ необхідно реалізувати відповідні методики та алгоритми управління. Запропоновані на сьогодні методики і алгоритми управління ТА вирішують лише часткові завдання, не враховують особливості функціонування повітряної мережі військового призначення, а саме – багатокритеріальний характер цільових функцій, тому методика управління НПМ потребує подальшого вдосконалення.

Метою роботи є розробка методики управління топології НПМ для підвищення (забезпечення) якості процесу передачі даних в НПМ.

Виклад основного матеріалу.

Задачі управління мережею, які повинні бути досягнуті за допомогою ТА, мають колективний характер і можуть бути розраховані централізовано (під управління ЦУМ) або децентралізовано (в умовах відсутності з ним зв'язку). ЦУМ та/або ТА повинні планувати та вирішувати різноманітні завдання управління топологією НПМ (цільові функції) за рахунок зміни положення, напряму, швидкості, висоти переміщення ТА при існуючій наземній мережі та її телекомунікаційних ресурсах (в певних умовах роботи без взаємодії з оператором ЦУМ).

Задачі управління повітряною мережею будуть вирішуватися як на етапі планування (визначення положення ТА – зон покриття), так і на етапі оперативного управління – визначення нових положень для працюючих ТА (зміна зон, маршруту переміщення ТА), додавання ТА (запуск нових ТА – додавання нових зон покриття).

Цілями системи управління мережею ТА можуть бути екстремум або підтримка (виступають як обмеження) заданих критеріїв ефективності функціонування всієї НПМ, її зони, напряму, маршруту між окремими парами вузлів „відправник-адресат” – забезпечення зв'язності, оптимуму продуктивності, покриття, якості маршрутів, каналів передачі тощо при обмеженнях на ресурси мережі та час виконання завдання, тощо [2 – 4].

Застосування повітряної мережі додає значний телекомунікаційний ресурс у вигляді повітряної транспортної магістралі, а також дозволяє швидко змінювати топологію наземних мереж з метою: досягти зв'язності незв'язних підмереж, значно скоротити довжину маршрутів передачі даних, збільшити пропускну здатність, здійснити перерозподіл трафіка та і в цілому значно покращити якість інформаційного обміну.

Модель мережі. Розглядається неоднорідна ієрархічна мережа радіозв'язку. Наземні вузли випадковим чином розміщені на певній території, мобільні, оснащені системою позиціонування. Телекомунікаційні аероплатформи і наземні вузли оснащені однаковим радіообладнанням, підтримують однакові протоколи інформаційного обміну, мають обмежені дальність радіозв'язку і швидкість обміну. Кожен наземний вузол мережі має власну систему управління, діє в кооперації з іншими вузлами мережі, ТА і системою управління мережею. ТА має можливість переміщатися в трьох вимірах із змінною швидкістю на обмеженій висоті та обмежений час. ТА має два прийомопередавача (один для зв'язку з наземними вузлами, другий – для зв'язку між ТА), дві антени (всеспрямовану та спрямовану), систему позиціонування, а також власну систему управління, що дозволяє самостійно приймати рішення в умовах відсутності зв'язності з центром управління мережею.

Нехай задані наступні вихідні дані:

I – кількість наземних вузлів та їх координати в момент часу t $(x_i, y_i)_t, i = \overline{1, I}$;

K – кількість ТА, координати та висоти польоту ТА $(x_k, y_k, h_k)_t, k = \overline{1, K}$;

A – розмір району розгортання наземних вузлів;

d_{\max}, D_{\max} – максимальні дальності радіозв'язку між наземними вузлами, між ТА у припущенні граничної моделі радіоканалу;

$s_{\min} (t_{3\max})$ – мінімально (максимально) допустиме значення пропускної здатності (затримки передачі) в маршруті m_{ab} , a, b – вузол відправник та адресат;

$\Gamma = \|\gamma_{ab}(t)\|$ – матриця тяжіння;

$M_{ab} = \|l(m_{ab})\|, a, b = \overline{1, I}$ – маршрутна таблиця найкоротших шляхів між a та b , де $l(m_{ab})$ – кількість ретрансляцій у маршруті;

$R = \sqrt{d_{\max}^2 - h^2}$ – зона покриття ТА, що дозволяє здійснювати обмін ТА із наземними вузлами кластера мережі в межах даної зони. Від значення R залежить розмір площі покриття і, відповідно, кількість вузлів у кластері та обсяг навантаження цих вузлів на ТА.

Швидкість передачі в радіоканалі наземний вузол-ТА залежить від протоколу каналного рівня та відстані, яка в умовах використання ГГц діапазону має досить обмежене значення.

Представимо НПМ у вигляді неспрямованого графу $G(V, E)$, що складається з множини вершин (вузлів та ТА) $V = \{v_i\} \cup \{b_k\}$ та множини ребер

$E = \{(i, j) | d_{ij} \leq d_{\max}\} \cup \{(i, k) | d_{ik} \leq d_{\max}\} \cup \{k, w\} | d_{kw} \leq D_{\max}\}, i, j = \overline{1, I}; k, w = \overline{1, K}$, що

визначають матриці зв'язності наземної мережі $C_n = \|c_{ij}\|$, повітряної мережі $C_p = \|c_{kw}\|$, між наземною та повітряною мережею $C_{np} = \|c_{ik}\|$, де в найпростішому випадку $c_{ij} = \{0, 1\}$, $c_{kw} = \{0, 1\}$ $c_{ik} = \{0, 1\}$ – булеві змінні (рис. 2). Тобто зв'язність всієї НПМ $C = C_n + C_p + C_{np}$.

При представленні у вигляді вагового графу в якості ваги ребра може виступати протяжність відповідної радіоканалу (d_{ij}, d_{ik}, d_{kw}) або їх пропускна здатність (s_{ij}, s_{ik}, s_{kw}).

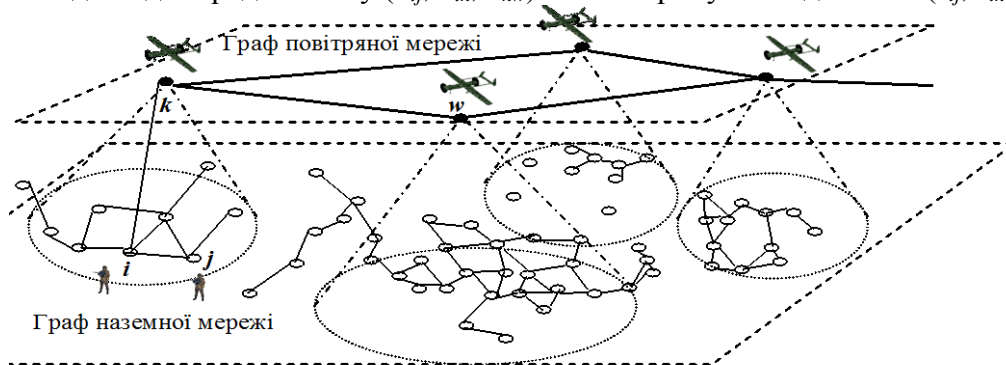


Рис. 2. Приклад графової моделі НПМ

Під час функціонування наземних радіомереж та впливу противника на неї, найбільш вірогідним варіантом стану мережі буде її незв'язна топологія. В даному випадку для її, відновлення за допомогою ТА, в першу чергу, необхідно отримати мінімальну зв'язність топології, а далі при наявності резерву сил і засобів нарощувати зв'язність, пропускну здатність напрямів та всієї мережі. В цілому завдання управління топологією НПМ може мати за мету $Z_\psi, \psi = \overline{1, \Psi}$ [6]:

а) Z_1 – встановлення (підтримання) зв'язності мережі:

Z_{11} – забезпечити зв'язність максимальної (заданої, визначеної) кількості незв'язних підмереж;

Z_{12} – забезпечити зв'язність максимальної (заданої, визначеної) кількості вузлів;

Z_{13} – забезпечити зв'язність заданої кількості ТА до базової станції (стаціонарної компоненти) тощо.

б) Z_2 – задоволення (оптимізація) зон радіопокриття:

Z_{21} – максимальний (визначений) сумарний відсоток площі покриття;

Z_{22} – максимальний (визначений) сумарний відсоток покриття вузлів;

Z_{23} – забезпечити визначення покриття за визначений час тощо.

в) Z_3 – задоволення (оптимізація) показників якості обслуговування користувачів у мережі в цілому, її зоні, напрямку, маршруті, між окремими вузлами (наприклад, за показником пропускну здатності, часу доведення повідомлень тощо).

Необхідно: для заданої наземної мережі $(x_i, y_i)_t, i = \overline{1, I}, C_n = \|c_{ij}\|$ знайти в режимі реального часу задану (мінімальну) кількість ТА (кластерів) k з координати їх положення у просторі (x_k, y_k, h_k) , що дозволяє побудувати матрицю зв'язності C^* для забезпечення виконання визначених цільових функцій $Z_\psi, \psi = 1 \dots \Psi$.

$$C_\psi^* = \arg \underset{\Omega}{opt} Z_\psi(C), \quad (1)$$

при обмеженнях $\Omega = \Omega_1 \times \Omega_2 \times \Omega_3 \times \Omega_4 \times \Omega_5$:

на множину та параметри керуючих впливів Ω_1 :

$$\{k \leq K, t_{pk} \leq t_{pk\text{доп}}, t_{пр} \leq t_{пр\text{доп}}\}, \quad (2)$$

де k – множина задіяних ТА, t_{pk} – час розгортання k -го ТА, $t_{пр}$ – час прийняття рішень по відновленню топології;

ресурсі мережі Ω_2 :

$$\text{кількість наземних вузлів } |i| \leq I; \text{ кількість ТА } |k| \leq K; \quad (3)$$

технічні характеристики вузлів Ω_3 :

по швидкості переміщення $v_i \leq v_{i\text{max}}, v_k \leq v_{k\text{max}};$

висоті $h_{\min} \leq h \leq h_{\text{max}}$ та часу польоту $T_{п} \leq T_{п\text{max}};$

дальності передачі в радіоканалі $d_{ij} \leq d_{\text{max}}, d_{ik} \leq d_{\text{max}}, d_{kw} \leq D_{\text{max}};$

розмір зони покриття k -ї ТА $R_k \leq R_{\text{max}}, i$ -го наземного вузла $r_i \leq d_{i\text{max}},$ де i, j – наземні

вузли, k, w – ТА, $i, j = \overline{1, I}, k, w = \overline{1, K};$

вимог до інформаційного обміну Ω_4 :

$$\{g_{ij} \leq s_{ij}(c_{ij}) \leq s_{\text{max}}, s(m_{ab}) \geq s_{\min}, t_{ab3} \leq t_{3\text{max}} (l_{ab} \leq l_{\text{max}})\}, \quad (4)$$

t_3 – затримка передачі, g_{ij} – інтенсивність потоків за шляхами m_{ab} , які проходять крізь канал $(i, j) \in m_{ab}$ – маршрут відправником a та адресатом b ; s_{ij} – пропускну здатність; r_i – радіус передачі; l – довжина маршруту.

вимог щодо витрат енергії батареї $e \in \Omega_5$:

$$\{p_{\min} \leq p_{ij}(c_{ij}) \leq p_{\text{max}}, e_i \leq e_{i\text{нвmax}}, e_k \leq e_{\text{ТАmax}}\},$$

p_{ij} – потужність передачі в каналі i - j , e_i – енергія батареї наземного вузла, e_k – енергія батареї ТА.

Множину всіх варіантів управління мережею можна розбити на кілька завдань (груп): встановлення (відновлення) зв'язності всієї мережі, певних підмереж, вузлів; забезпечення заданого покриття території, визначених вузлів; забезпечення заданої якості функціонування мережі (підмережі, напрямів, маршрутів передачі, радіоканалів, вузлів).

Виходячи з пріоритетів цільових функцій управління, можемо сформулювати наступну послідовність вирішення задачі управління положенням ТА НІМ – забезпечити:

1. Зв'язну топологію всієї НІМ (окремих підмереж, напрямів, вузлів).
2. Максимальну (задану) зону покриття території, вузлів наземної мережі.
3. Максимум (задану) пропускну здатність мережі $S(C)$ (напрямку, маршруту):

$$C^* = \arg \max_{\Omega} S(C).$$

Пропускна здатність мережі визначається, як сумарна пропускна здатність усіх M -маршрутів мережі, тобто

$$S(C) = \sum_{m=1}^M \sum_{a=1}^I \sum_{b=1}^I s(m_{ab}), a \neq b, \text{ де } s(m_{ab}) = \min_{(i,j) \in m_{ab}} \{s(c_{ij})\}.$$

4. Задану (мінімальну) середню затримку передачі в мережі, напряму, маршруті.

Кожне із запропонованих завдань має на меті отримання варіантів рішення за допомогою наявного ресурсу з врахуванням обмежень Ω . Складність та результат рішення C^* залежить від цільової функції управління Z_{ψ} та розмірності мережі.

Задачу управління топологією НПМ представимо, як процес ситуаційного управління. В загальному вигляді рішення завдань ситуаційного управління повинно включати наступні складові:

об'єкт управління – мережа (топология та параметри її елементів: каналів, маршрутів, напрямів; обладнання, ресурси тощо);

блок аналізу (оцінює і порівнює: відповідають топология по зв'язності, покриттю та параметрам інформаційного обміну вимогам чи ні?);

класифікатор ситуації (для класифікації ситуації на мережі та спрощення отримання керуючого впливу);

вирішальний елемент (для пошуку рішення) та управляючий вплив.

Загальний алгоритм реалізації методики наведений на рис. 3.

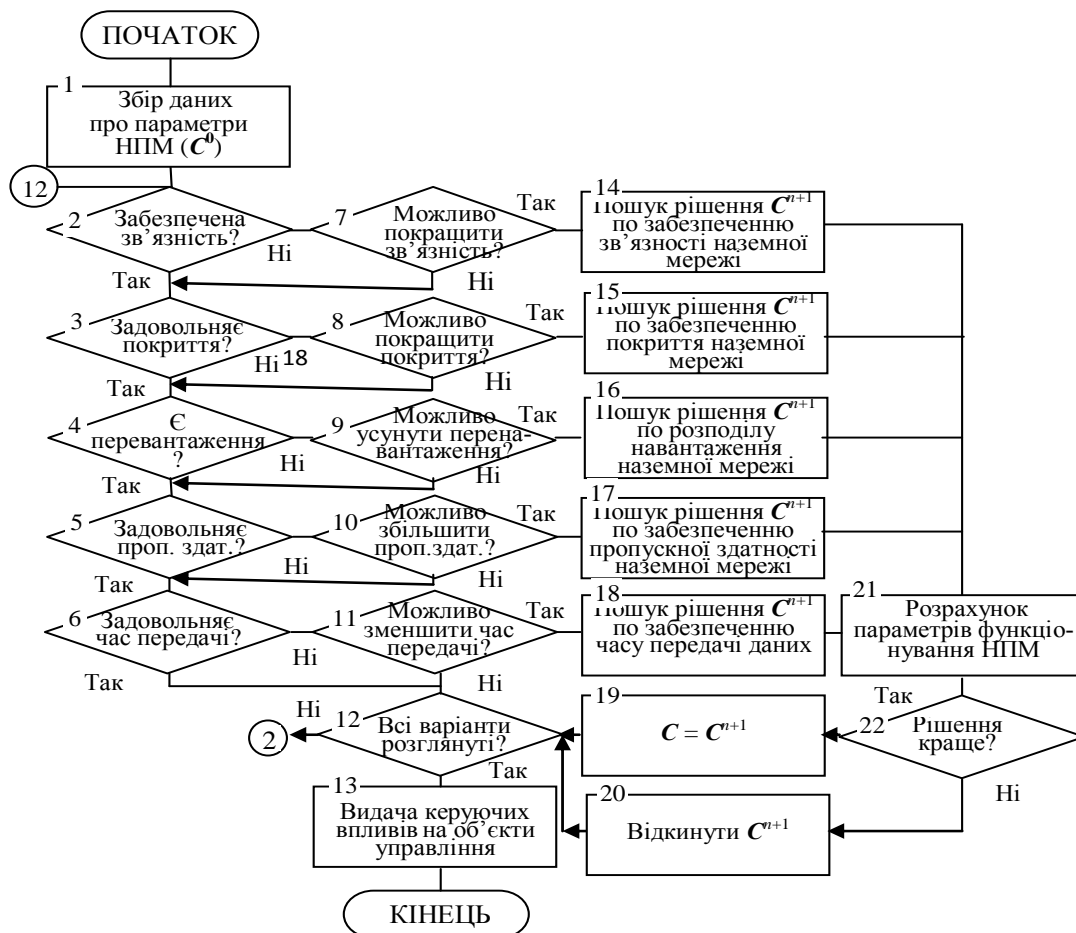


Рис. 3. Схема-алгоритм реалізації методики

Розглянемо узагальнені етапи реалізації методики.

1. Збір та ввід інформації про стан НПМ (існуючий початковий варіант топології C^0):

множина наземних вузлів $i = 1 \dots I$, площа та їх координати розміщення (x_i, y_i) ;

множина ТА $k = 1 \dots K$, початкова та кінцева точка польоту;

характеристики ТА (час та швидкість польоту, максимальна і мінімальна висоти польоту тощо) та наземних вузлів, дальності радіозв'язку ТА і вузлів, цільові функції управління мережею та ієрархія їх пріоритетів тощо.

2. Аналіз умов функціонування – перевірка на відповідність параметрів функціонування мережі вимогам зв'язності, покриття та інформаційного обміну (перевірка обмежень Ω). Розрахунок та ідентифікація її стану (блоки 2 – 6 алгоритму) – аналіз зв'язності, покриття та якості функціонування мережі за обраними показниками ефективності.

3. Перевірка можливості отримання нового рішення (блоки 7 – 11).

4. Пошук рішення по розміщенню (переміщенню, запуску нових) ТА (блоки 12 – 16).

5. Розрахунок параметрів НПМ (блок 21) та аналіз рішення (22, 19, 20).

Якщо показники $n+1$ отриманого рішення $\Pi(C^{n+1})$ кращі ніж показники n -го $\Pi(C^n)$, то рішення залишається, якщо ні – воно відкидається та розглядаються наступні варіанти.

Якщо всі варіанти перебрані, тоді КНЕЦЬ, інакше – перехід на блок 2.

6. Доведення рішення до об'єктів управління (ТА, наземні вузли).

Розглянемо більш детально реалізацію певних блоків.

Блок 2. Перевірка наземного сегмента на зв'язність.

Для цього можуть бути використані алгоритми Прима або Краскала.

Блок 14. Якщо наземний сегмент незв'язний, то необхідно знайти та виділити точки (вузли), що мають найближче розташування між незв'язними підмережами.

Пошук рішення (зони) по покриттю виділених точок здійснюється за допомогою одного з ітераційних алгоритмів кластерного аналізу FOREL (FORmal ELeMent) та k -середніх [6]. Кінцевим рішенням алгоритму є визначення мінімальної кількості точок проекції на площині, висоти розміщення ТА (кластерів) для подальшого корегування маршрутів та навантаження наземних вузлів.

Якщо цільова функція – мінімум кількості ТА, тоді використовується алгоритм FOREL.

Якщо можливо задіяти всі ТА, тоді реалізується алгоритм k -середніх.

В алгоритмі розглянуті два принципи виділення зон: виділення апріорно заданої кількості зон (тобто ТА) і виділення зон апріорно „заданого розміру” (тобто R) (визначається максимальною дальністю радіозв'язку між ТА і вузлами мережі).

Блоки 15 – 18. Пошук рішення по забезпеченню рівня покриття, вимогам інформаційного обміну (пропускна здатність, якість маршрутів, якість передачі по маршрутах, навантаженні), витратам ресурс енергії батарей абонентів тощо. Для цього:

а) визначаються виділені (критичні) напрями, маршрути, наземні вузли, їх координати та параметри. Наприклад, перевантажені (для подальшого перерозподілу трафіку через ТА або вузли підмережі); „виснажених” – мають малий ресурс енергії батарей (для об'льоту ТА на малої відстані від них), важливих – за своїми функціями тощо;

б) ранжування виділених вузлів по важливості функцій та згідно ієрархії пріоритетів критеріїв ефективності;

в) перевірка можливості покращення показників функціонування НПМ на множині правил управління ТА для виділених вузлів згідно ранжування.

Якщо присутні такі умови, то застосовувати правила з бази знань для видачі керуючого впливу (зміна положення ТА, потужності та/або діаграми спрямованості антени, введення нових ТА, що призведе до зміни топології, маршрутів передачі НПМ та відповідно перерозподілу трафіка за визначеним маршрутом).

В загальному випадку задача пошуку топології у вигляді матриці зв'язності C НПМ відноситься до класу NP-повних. Отримання точного рішення для мережі, яка нараховує десятки (сотні) вузлів, пов'язана з значними обчислювальними та часовими витратами. Тому, для скорочення перебору варіантів топологій пропонується використовувати множину

правил, об'єднаних в базу знань, які змінюють зв'язність мережі для покращення її параметрів функціонування. Правила продукційного типу: ЯКЩО <ситуація> ТО <рішення>. Це дозволяє отримати в реальному масштабі часу рішення, близькі до оптимального і використовувати їх для оперативного управління НПМ.

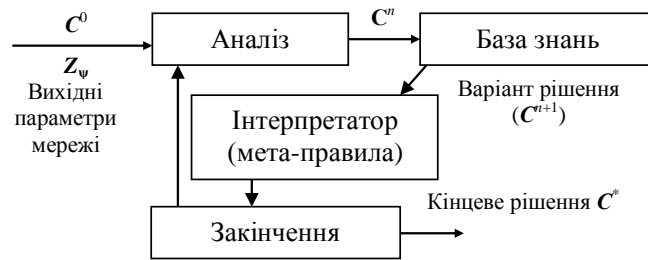


Рис. 4. Схема пошуку варіантів топології НПМ з використанням бази знань

Використання бази знань включає в себе ітераційну процедуру (що складається з модулів Аналіз, База знань, Інтерпретатор, Закінчення) (рис. 4).

Правила бази знань працюють для досягнення різних цілей управління мережею. Для визначення поточної цільової функції пропонується ввести блок ідентифікації стану мережі, який з множини можливих цілей управління будує ієрархію цілей [6], тобто пропонується введення мета-правил на всю множину правил прийняття рішень. Момент визначення необхідності перебудови топології буде визначатися наступними подіями: відсутність зв'язності, невиконання якості обслуговування передачі даних, бажання досягти оптимуму або заданих значень параметрів функціонування мережі та ін.

Якщо кілька правил успішно зіставляються з фактами, то інтерпретатор на підставі метаправил робить вибір одного правила. Метаправила визначають перевагу ζ -правил, залежно від ψ -ої цілі мережевого управління (МПр $_{\zeta}$: Пр $_{\zeta} \rightarrow w_{\zeta\psi}$). Те правило, що більшою мірою покращує необхідні параметри мережі при визначеній цільовій функції, матиме більшу вагу.

Правила класифікуються (рис. 5):



Рис. 5. Класифікація правил бази знань по управлінню ТА

за цілями управління – на мережеві (забезпечення зв'язності всієї мережі, забезпечення покриття певних зон, використання мінімуму ТА (k), забезпечення максимуму пропускної здатності ($\max S$) або її граничне значення ($S > S_{\text{зад}}$), мінімум середньої затримки передачі ($\min \bar{T}_3$), мінімум потужності передачі ($\min P$) тощо та локальні (забезпечення зв'язності між певними підмережами, вузлами, оптимізація пропускної здатності $\max s(m_{ab})$, затримки передачі на маршруті $\min t_3(m_{ab})$, потужності передавачів $\min p(m_{ab})$ між певними вузлами a та b), тощо;

за параметрами управління – кількість ТА (бажано мінімальна кількість), їх положення у просторі, висота (визначає зв'язність, розмір зони покриття) та швидкість польоту

(визначає час прибуття в заданий район та початок виконання завдання), кількість вузлів в зоні покриття (визначає рівень навантаження на ТА і можливість його перерозподілу), потужність передачі (визначає витрати енергії ТА і вузлів, маршрути передачі);

за об'єктами керування: ТА, напрямок передачі, маршрут, радіоканал, вузол; параметри управління передачею даних;

за управляючим впливом – зміна положення та висоти польоту ТА, зміна потужності передачі, зміна діаграма спрямованості антени, перерозподіл навантаження між вузлами.

Розглянемо декілька основних правил по управлінню топологією мережі за допомогою ТА, які умовно поділені на групи, що реалізують відповідні цілі управління.

Правила 1-ї групи забезпечення зв'язності наземних мереж.

Правило 1.1: Якщо є незв'язні компоненти наземної мережі, то розмістити (перемістити) *задану* множину ТА для об'єднання якомога більшості компонент.

Правило 1.2: Якщо є незв'язні компоненти наземної мережі, то розмістити (перемістити) *мінімальну* множину ТА для об'єднання якомога більшості компонент.

Правило 1.3: Якщо необхідно зв'язати незв'язні підмережі М1 та М2 наземної мережі, то розмістити (перемістити) *мінімальну* множину ТА для отримання зв'язних підмереж.

Правило 1.4: Якщо необхідно мати зв'язність з базовою станцією (вона зв'язана зі стаціонарною компонентою), то розмістити (перемістити) *мінімальну* множину ТА для забезпечення цієї зв'язності.

Правила 2-ї групи по забезпеченню покриття наземних вузлів.

Правило 2.1: Якщо невідома інформація про координати розміщення вузлів наземної мережі, то розмістити (перемістити) множину ТА для покриття *найбільшої* площі району розміщення вузлів. Основна ідея правила полягає в розосередженні ТА як найдалі один від одного по всьому району для покриття зон з максимальною площею. Мета – максимізувати розкид зон при збереженні зв'язності між ТА. Це здійснюється з використанням сил тяжіння і відштовхування між ТА. Величина такої сили обернено пропорційна відстані між ТА. Це означає, що чим ближче ТА стають один від одного, тим сильніше вони відштовхують один одного. Крім того, щоб уникнути покриття вже в покритій зоні вводиться додаткова сила, яка обернено пропорційна дальності передачі вузла та застосовується для підрахунку напрямку руху ТА. На кожній ітерації для визначення наступної зміни напрямку руху ТА потрібно обчислити результуючий вектор сили, що діє на ТА його сусідів ТА в межах їх дальності передачі [11].

Правило 2.2: Якщо необхідно покрити вузли наземної мережі, то розмістити (перемістити) множину ТА для покриття найбільшої кількості вузлів.

Правило намагається розмістити ТА в середині кола з найбільшим скупченням вузлів.

Правило 2.3: Якщо необхідно покрити певні вузли наземної мережі, то розмістити (перемістити) множину ТА для покриття визначеної кількості вузлів тощо.

Правила 3-ї групи по забезпеченню якості передачі даних.

Правило 3.1. Якщо необхідно підвищити пропуску здатність мережі, то необхідно розмістити (перемістити) множину ТА для покриття максимальної кількості перенавантажених вузлів.

Правило 3.2. Якщо необхідно підвищити пропуску здатність мережі, то необхідно розмістити (перемістити) множину ТА для скорочення довжини маршрутів передачі.

Правило 3.3: Якщо середня затримка передачі даних (кількість ретрансляцій) деяких маршрутів передачі більше необхідної, тоді розмістити ТА для зменшення часу затримки (кількості ретрансляційних ділянок) у маршруті.

Наприклад, на рис. 6 наведений приклад розміщення ТА, яке зменшує довжину маршруту між вузлами a та b з 7 до 2 ретрансляційних ділянок.

Правила 4-ї групи по перерозподілу навантаження.

Правило 4.1. Якщо необхідно підвищити пропуску здатність мережі, то необхідно розмістити (перемістити) множину ТА для покриття максимальної кількості перенавантажених вузлів.

Правило 4.2. Якщо вузол перевантажений, то знайти в найближчий до нього недовантажений вузол в зоні покриття та перенаправити трафік.



Рис. 6. Приклад застосування правила для зменшення довжини маршруту передачі даних

Правила 5-ї групи спрямовані на зниження витрат енергії вузлів.

Правило 5.1. Якщо вузол має малий ресурс енергії батареї, то забезпечити обмін даними між ТА і вузлом на мінімальній відстані.

Правило 5.2. Якщо вузол має малий ресурс енергії батареї і використовується в маршруті передачі, то забезпечити новий маршрут передачі, який не застосовує (зменшує навантаження) цей вузол.

При визначенні початкового та наступних положень ТА при їх переміщенні необхідно враховувати низку додаткових вимог та обмежень на використання ТА:

необхідність зв'язності між ТА (в умовах граничної дальності передачі – D_{\max});

необхідність зв'язності ТА з базовою станцією, яка підключена до стаціонарної мережі зв'язку (тобто, при побудові повітряної мережі необхідно поступово нарощувати дерево зв'язності між ТА при умові забезпечення якості обслуговування наземних вузлів);

необхідність зв'язності декілька ТА, які одночасно підключені до БС (вимоги живучості щодо наявності не менш двох каналів зв'язку з БС);

бажано забезпечити визначену граничну довжину маршруту передачі даних у мережі (підмережі), в тому числі для повітряної мережі (між ТА і базовою станцією);

обмеженість пропускної здатності радіоканалів вузол-ТА (визначається протоколом доступу) при покритті певної кількості вузлів в зоні покриття (намагатися побудувати зону покриття з певною кількістю вузлів);

враховувати динаміку змін зон покриття для зменшення перекриття зон.

Одним з можливих способів покращення рішення, яке отримано для реалізації пріоритетної цільової функції, є визначення обмеженого діапазону переміщення для кожного ТА для покращення рішень для менш пріоритетних цільових функцій. На рис. 7 наведений приклад переміщення ТА в межах дозволеної відстані Δ для збільшення зв'язності з 3-х до 4-х підмереж.

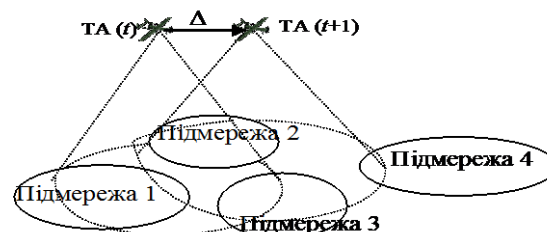


Рис. 7. Корегування позиціонування безпосередньо ТА для покращення зв'язності

На рис. 8а наведений приклад існування вузла i , який немає зв'язності. Рішенням може бути переміщення ТА для отримання зв'язності між собою та цим вузлом (рис. 8б).

Для оцінки результатів функціонування алгоритму здійснена його програмна реалізація в середовищі MATLAB. Проведені експерименти та отримані залежності показників

функціонування НППМ від розмірності мережі та кількості ТА. Показано, що запропонована методика дозволяє отримувати рішення в реальному масштабі часу для мереж, що нараховують сотні наземних вузлів та десятки ТА, побудувати зв'язну наземну мережу, мінімізувати кількість ТА, задіяних для виконання завдання; значно покращити якість інформаційного обміну, визначати положення ТА для досягнення різних цільових функцій управління та здійснювати управління положенням ТА у режимі реального часу.

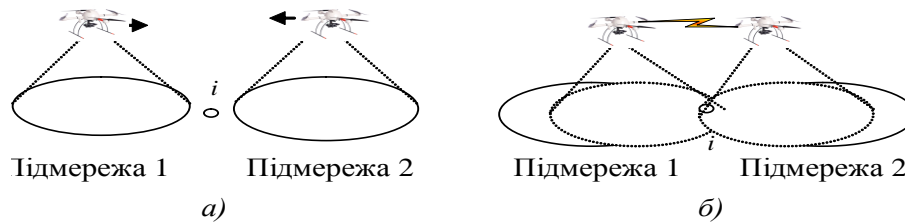


Рис. 8. Приклад переміщення ТА

Напрямом подальших досліджень є вдосконалення правил пошуку нових положень ТА при різноманітних ситуаціях на НППМ, в тому числі пошук кооперативного рішення між ТА без наявної зв'язності з центром управління мережею.

ЛІТЕРАТУРА

1. Самоорганизующиеся радиосети со сверхширокополосными сигналами. / [С.Г. Бунин, А.П. Войтер, М.Е. Ильченко, В.А. Романюк]. – К.: НПП „Издательство „Наукова думка” НАН України”. – 444 с.: ил.
2. Peker Bekmezci, Ozgur Koray Sahingoz, Samil Temel Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): A survey // Ad Hoc Networks, no. 11, 2013. – Pp. 1254 – 1270.
3. Романюк В.А. Літаючі самоорганізуючі радіомережі / В.А. Романюк, Є.О. Степаненко, І.В. Панченко, О.І. Восколович // Збірник наукових праць ВІТІ. – 2017. – № 1. – С. 104 – 114.
4. Романюк В.А. Задачі управління топологіями мереж зв'язку тактичної ланки управління / В.А. Романюк, Є.О. Степаненко // Збірник наукових праць ВІТІ. – 2017. – № 2. – С. 101 – 109.
5. Романюк В.А. Задачі синтезу топології мереж мобільної компоненти з використанням телекомунікаційних аероплатформ / В.А. Романюк, Є.О. Степаненко // Збірник наукових праць ВІТІ. – 2017. – № 3. – С. 149 – 157.
6. Романюк В.А. Алгоритми побудови топології мереж радіозв'язку з телекомунікаційними аероплатформами / В.А. Романюк, Є.О. Степаненко // Збірник наукових праць ВІТІ. – 2018. – № 3. – С. 70 – 78.
7. Романченко І.С. Моделі застосування інформаційно-телекомунікаційних технологій на основі безпілотних авіаційних комплексів у надзвичайних ситуаціях/ І.С. Романченко, С.Л. Данилюк, С.М. Чумаченко [та ін.]. – К.: НАУ, 2016. – 232 с.
8. Papakosta D., Baras P., Katsaros D., Tassioulas L. Backbone Formation in Military Multi-Layer Ad Hoc Networks Using Complex Network Concepts // IEEE Military Communications Conference, MILCOM, 2016.
9. Ming Zhu, Fei Liu, Zhiping Cai, Ming Xu Maintaining Connectivity of MANETs through Multiple Unmanned Aerial Vehicles // Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering, Volume 2015, [shttp://dx.doi.org/10.1155/2015/952069](http://dx.doi.org/10.1155/2015/952069).
10. Z. Han, L. Swindlehurst, and K. J. R. Liu, „Optimization of MANET Connectivity Via Smart Deployment / Movement of Unmanned Air Vehicles,” IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 58, No. 7, September 2009, vol. 58, no. 7, pp. 3533 – 3546, 2009.
11. Mohamed-Ayoub Messous, Hichem Sedjelmaci, Sidi-Mohammed Senouci Implementing an emerging mobility model for a fleet of UAVs based on a fuzzy logic inference system // Pervasive and Mobile Computing, 2017.