

АЛГОРИТМИ ПОБУДОВИ ТОПОЛОГІЇ МЕРЕЖ РАДІОЗВ'ЯЗКУ З ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИМИ АЕРОПЛАТФОРМАМИ

Запропоновано алгоритми побудови топології мереж радіозв'язку з телекомунікаційними аероплатформами, що виконують роль повітряних шлюзів та формують повітряну мережу. Алгоритми базуються на модифікованих алгоритмах кластерного аналізу FOREL, k-середніх та дозволяють забезпечити зв'язність мережі, оптимізувати зони покриття, мінімізувати кількість телекомунікаційних аероплатформ.

Романюк В.А., Степаненко Є.А. Алгоритмы построения топологии сетей радиосвязи с телекоммуникационными аэроплатформами. Предложены алгоритмы построения топологии наземных сетей с использованием телекоммуникационных аэроплатформ, выполняющих роль воздушных шлюзов и формирующих воздушную сеть. Алгоритмы основаны на модифицированных алгоритмах кластерного анализа FOREL, k-средних и позволяют найти решения, обеспечивающие связность сети, оптимизацию зон покрытия, минимизацию количества телекоммуникационных аэроплатформ.

V.Romaniuk, E.Stepanenko Algorithms for building the topology between ground and flying ad hoc network. Algorithms for building the topology between ground and flying ad hoc network are presented. The algorithms are based on modified algorithms cluster analysis FOREL, k-averages and allow ensuring network connectivity, to optimize coverage areas, to minimize the number airborne gateway.

Ключові слова: топологія, алгоритми кластеризації, FOREL, k-середніх, мережа телекомунікаційних аероплатформ.

Постановка завдання в загальному вигляді. Застосування телекомунікаційних аероплатформ (ТА), що реалізують сучасні технології бездротових мереж, дозволяє будувати нові наземно-повітряні архітектури систем радіозв'язку цивільного і військового застосування [1 – 7]. У багатьох країнах світу, в тому числі на Україні, проводяться дослідження із застосування безпілотних літальних апаратів в якості ТА (повітряних базових станцій, шлюзів, маршрутизаторів, ретрансляторів), здатних на вимогу надавати бездротовий зв'язок в потрібні райони. Завдяки мобільності, оперативності, адаптації швидкості і висоти польоту, ТА можуть ефективно доповнювати існуючі наземні мережі зв'язку (забезпечити зв'язність, додаткову пропускну здатність, покриття важкодоступних районів, тощо).

Найбільш важливими перевагами використання ТА мереж є можливість забезпечити зв'язок в реальному масштабі часу без наявності будь-якої телекомунікаційної інфраструктури і можливість отримання радіоканалів прямої видимості.

Сукупність ТА будуть створювати повітряні мережі типу FANET (Flying Ad-Hoc Networks), які призначені для виконання таких основних завдань [1, 2]: організація зв'язності між незв'язними сегментами наземної мережі, швидка організація резервної (додаткової) мережі (каналів) радіозв'язку з наземними абонентами; збільшення зони покриття; покращення показників якості інформаційного обміну (пропускну здатності, часу передачі), тощо.

Однак, застосування ТА передбачає вирішення низки оптимізаційних задач планування і оперативного управління: тривимірного розгортання ТА; розрахунку часу і траєкторії польоту; управління топологією, якістю інформаційного обміну, ресурсами мережі і т.д.

Таким чином, розробка алгоритмів побудови топології наземних телекомунікаційних мереж з використанням ТА є актуальною науковою задачею.

Аналіз останніх публікацій і напрямки вирішення завдання.

На сьогоднішній час значна кількість досліджень присвячена дослідженню процесів управління наземно-повітряними мережами.

Так в роботі [2] запропоновано варіант кооперативного управління трафіком в наземно-повітряних ad-hoc мережах, що працюють в координації один з одним, з використанням нейронних, нечітких і генетичних алгоритмів.

В роботі [3] описані окремі математичні постановки задач розміщення ТА при забезпеченні зв'язності мережі, мінімізації кількості ТА і наведено ряд евристик їх вирішення.

В [4] розглянута ієрархія цільових функцій управління мережами з ТА.

В [5] запропонований евристичний алгоритм введення додаткових ТА до існуючої мережі FANET для забезпечення зв'язності з наземними мережами MANET.

В [6] запропонований алгоритм підвищення пропускної здатності наземної мережі за рахунок визначення положення ТА у просторі та побудови маршрутів заданої якості.

В [7] запропонований алгоритм побудови зв'язної безпроводової сенсорної мережі із застосуванням ТА.

Однак, в даних роботах завдання побудови зв'язковою топології мережі з використанням ТА розглядається у відриві від необхідності врахування декількох цільових функцій управління або розглядаються мережі малої розмірності, не наводиться формальний алгоритм розрахунку положення ТА.

У дисертації Парамонова А.І. [8] розглядається задача знаходження точок розміщення базових станцій мереж 5-го покоління на основі кластеризації із застосуванням алгоритмів k -середніх та FOREL. В якості метрики групування вибрано відстань між базовою станцією і абонентом, що визначає величину пропускної здатності, досягнути в місці знаходження абонента. Даний підхід пропонується взяти за основу для розробки алгоритмів побудови топології за допомогою ТА для наземних мереж радіозв'язку.

Мета статті: розробити алгоритми побудови зв'язної топології наземних мереж радіозв'язку з ТА при реалізації різних цільових функцій управління мережею (в першу чергу, необхідно мінімізувати кількість ТА, яка буде використовуватися для виконання завдання).

Виклад основного матеріалу.

Під вузлом наземної мережі будемо розуміти транспортний засіб, бойову машину, командно-штабну машину, мобільну базову станцію, військовослужбовця і т.п., які оснащені засобами радіозв'язку. З різних причин (обмеженість дальності радіозв'язку наявного обладнання, умови поширення радіохвиль через рельєф місцевості або вплив РЕБ противника, значне віддалення підрозділів один від одного, відмови та знищення частки вузлів, їх високої мобільності, зниження енергії батарей у мобільних абонентів, тощо) в мобільній компоненті (МК) можуть утворюватися незв'язні підмережі.

Швидке розгортання ТА в певних точках простору дозволяє з'єднати незв'язні фрагменти мереж та/або здійснити перерозподіл трафіка через мережу ТА іншим абонентам – як мобільної, так і стаціонарної компонент. На рис. 1 показаний приклад п'яти незв'язних підмереж M_1, \dots, M_5 . Розгортання двох ТА дозволяє забезпечити зв'язність всіх вузлів підмереж мобільної компоненти між собою і зв'язність зі стаціонарною компонентою.

Модель мережі. Розглядається неоднорідна ієрархічна мережа радіозв'язку. Наземні вузли, випадковим чином, розподілені на певній території, мають різні ресурси, мобільні, оснащені системою позиціонування (наприклад, GPS). ТА і вузли оснащені однаковим радіоустаткуванням і підтримують однакові протоколи інформаційного обміну (наприклад, IEEE 802.11), мають обмежені дальність радіозв'язку і швидкість обміну. Кожен вузол мережі має власну систему управління, діє в кооперації з іншими вузлами мережі і ТА.

Телекомунікаційна аероплатформа має можливість переміщатися в трьох вимірах із змінною швидкістю на обмеженій висоті та обмежений час. ТА володіє власною системою управління, що дозволяє самостійно приймати рішення в умовах відсутності зв'язності з центром управління мережею. Коли в зону радіозв'язку вузла входить ТА, він відправляє йому повідомлення про наявну інформацію стану локального фрагменту мережі.

Вважається, що кожен ТА знає свої координати, а також координати і параметри наземних вузлів інших ТА.

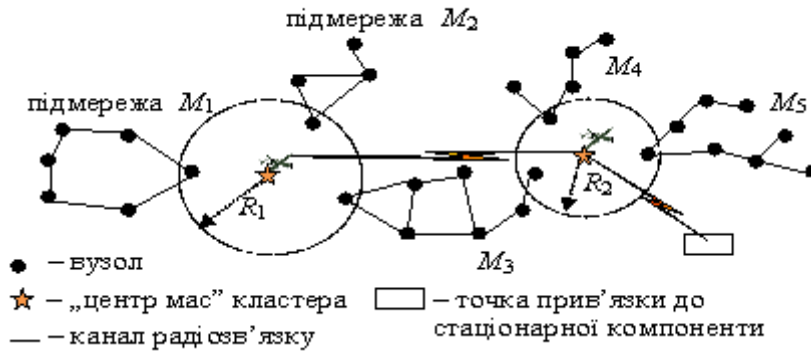


Рис. 1. Варіант точок розміщення ТА – „центри мас” обраних вузлів підмереж

Цілями системи управління мережі ТА можуть бути [3, 4] екстремум або підтримка (виступають як обмеження) заданих критеріїв ефективності функціонування всієї мобільної компоненти (її зони, напряму, маршруту між окремою парою „відправник-адресат”) $Z_i = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_n\}$ – забезпечення зв'язності, оптимуму продуктивності, покриття, якості маршрутів передачі, ресурсів на реалізацію завдання, часу виконання завдання, тощо.

Наявність сукупності критеріїв ефективності обумовлює багатокритеріальний характер задач синтезу та значно ускладнює розробку формальних методів. Для пошуку рішення пропонується визначати головний критерій ефективності (виходячи з поточної ситуації на МК), який підлягає оптимізації, а інші переводити в розряд обмежень.

Наприклад:

- за критерієм мінімуму використовуваного апаратного ресурсу – знайти зв'язну топологію з мінімальною кількістю ТА при заданих обмеженнях (в якості обмежень можуть виступати кожний із критеріїв ефективності);

- за критерієм зв'язності (структурної надійності) – знайти зв'язну (ν -зв'язну) топологію мережі при заданих обмеженнях;

- за критерієм часу – забезпечити зв'язну топологію мережі на заданий час при визначених обмеженнях; розгорнути мережу ТА за мінімальної час в визначеному районі за мінімальний час, тощо.

- за критерієм якості передачі (пропускна здатність, затримка передачі, джитер) – забезпечити зв'язну топологію із заданою якістю на визначених напрямках мережі;

- за критерієм якості маршрутів – забезпечити зв'язну топологію із заданою якістю та кількістю маршрутів передачі між визначеними абонентами, тощо.

В табл. 1 наведений фрагмент залежностей цілей та підцілей при вирішенні задач оптимізації [3]. Тобто, забезпечення зв'язності топології є пріоритетною задачею при управлінні мережею ТА. Після забезпечення зв'язності здійснюється реалізація інших цільових функцій.

Будемо вважати, що зона покриття та радіозв'язку ТА являє собою коло (кластер) радіусу R , що дозволяє здійснювати обмін ТА із вузлами кластера мережі в межах даної зони. Відзначимо, що від величини R залежить розмір площі покриття і, відповідно, кількість вузлів в зоні та навантаження цих вузлів на ТА.

Величина R визначається висотою польоту, максимальною дальністю передачі радіозасобів ТА і вузлів. В умовах використання гігагерцового діапазону дальність радіозв'язку матиме досить обмежене значення.

Основне завдання полягає в знаходженні зв'язної топології мережі мінімальною кількістю ТА (кіл або зон радіуса R), що покривають всю (задану) множину точок (вузлів).

Пошук рішення по розміщенню в просторі мінімальної кількості ТА для рішення конкретного завдання оптимізації будемо здійснювати за допомогою алгоритмів k -середніх и FOREL (FORmal ELement) [8, 9]. Розглянемо їх більш докладніше.

Приклади залежності ціль-підціль

Цілі (підціль)	Підціль певного рівня ієрархії
Z_1 – покриття та встановлення (підтримка) зв'язності вузлів МК (її фрагменту) з використанням ТА	Z_{11} – з максимальною кількістю сенсорів, абонентів, МБС в заданій зоні Z_{12} – максимальна (задана) зона покриття Z_{13} – з визначеними вузлами (сенсорами, абонентами, МБС, тощо) Z_{14} – з використанням мінімуму ТА Z_{15} – побудова, підтримка, оптимізація топології Z_{16} – побудова (перебудова) маршруту заданої якості між визначеними абонентами, МБС, ТА Z_{17} – максимум (забезпечення заданої) пропускної здатності між визначеними абонентами, МБС Z_{18} – мінімум (обмеження) часу доставки пакетів між визначеними абонентами Z_{19} – збільшення часу функціонування мережі Z_{1w} – балансування трафіка між повітряною та наземними мережами
Z_{15} – побудова, підтримка, оптимізація топології МК (її фрагменту)	Z_{151} – побудова та підтримка маршрутів передачі Z_{152} – мінімум взаємних завад при передачі вузлами Z_{153} – максимум (забезпечення) пропускної здатності Z_{154} – мінімум (обмеження) витрат енергоресурсу вузлів
Z_{16} – побудова та підтримка маршруту передачі даних	Z_{161} – забезпечити задану кількість та якість маршрутів Z_{162} – мінімум службового трафіка
Z_{19} – збільшення часу функціонування наземної мережі, мережі ТА	Z_{191} – мінімум (обмеження) витрат енергії батареї вузлів Z_{192} – оптимізація ресурсу ТА Z_{193} – оптимізація маршрутів польоту
Z_{17} – оптимізація пропускної здатності між елементами МК	Z_{12} – оптимізація покриття Z_{15} – оптимізація топології Z_{171} – оптимізація напрямів передачі Z_{16} – оптимізація маршрутів передачі
Z_{18} – мінімум часу доставки повідомлень, тощо	Z_{181} – побудова додаткових маршрутів Z_{15} – оптимізація топології Z_{16} – оптимізація маршрутів

Алгоритм k -середніх [8, 9]

Класичний варіант алгоритму k -середніх вирішує завдання кластерного аналізу шляхом мінімізації сумарного квадратичного відхилення елементів кластерів від центрів мас цих кластерів. Функція мінімізації може бути записана як:

$$M = \sum_{i=1}^k \sum_{x_j \in S_i} (x_j - \mu_i)^2, \quad (1)$$

де k – число кластерів; S_i – множина елементів i -го кластера; μ_i – координати центру мас i -го кластера; x_j – координати центру мас j -го елемента кластера.

Значення $(x_j - \mu_i)$ представляють собою евклідову відстань між елементом кластера і центром мас кластера. Розглянемо цей алгоритм для двовимірного простору (площини). В даному випадку кожен елемент розглядається як точка на площині та характеризується своїми координатами (x_j, y_j) . Координати центру мас i -го кластера визначаються як:

$$x_i^{\mu} = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} x_j \quad y_i^{\mu} = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} y_j. \quad (2)$$

Також кожен об'єкт (точка) може характеризуватися (крім координат) деяким параметром („масою”) m_j . Тоді центр мас буде визначатись як (центр мас плоскої фігури):

$$x_i^u = \frac{1}{m_i^\Sigma} \sum_{j=1}^{n_i} m_j x_j, \quad y_i^u = \frac{1}{m_i^\Sigma} \sum_{j=1}^{n_i} m_j y_j, \quad m_i^\Sigma = \sum_{j \in S_i} m_j. \quad (3)$$

Алгоритм кластеризації включає наступні основні кроки:

1. Задаються межі області, координати об'єктів (точок)

$I = \{I_1, I_2, \dots, I_n\}$ та необхідне число кластерів (k).

2. Вибір координат k -точок m_1, m_2, \dots, m_k в заданих межах області. На початковому етапі ці точки приймаються за центри мас кластерів. Вибір координат цих точок може проводитися випадково.

3. Всі об'єкти з даної області $I = \{I_1, I_2, \dots, I_n\}$ розподіляються по кластерам за принципом близькості кожного з об'єктів до центрів мас. Тобто, кожен з об'єктів приписується до найближчого центру мас. Для завдання на площині близькість оцінюється евклідовою відстанню. (якості оцінки відстані може бути обрана й інша метрика, наприклад, загасання сигналу, швидкість передачі даних і т.д.).

4. Для кожного з отриманих кластерів обчислюються координати центрів мас за формулами (2) або (3) $m^{\wedge}_1, m^{\wedge}_2, \dots, m^{\wedge}_k$. Отримані результати порівнюються з координатами точок m_1, m_2, \dots, m_k . Якщо вони різні, то процес пошуку кластерів триває (перехід до п. 5). Якщо координати збігаються, то кластери визначені, і процес пошуку завершується (перехід до п. 6).

5. Приймаються нові (знайдені) центри мас кластерів $m_1 = m^{\wedge}_1, m_2 = m^{\wedge}_2, \dots, m_k = m^{\wedge}_k$.
Перехід до п. 3.

6. Завершення пошуку. Вивід координат центрів мас кластерів та даних про належність об'єктів до кластерів.

Узагальнена схема-алгоритм k -середніх приведена на рисунку 2.

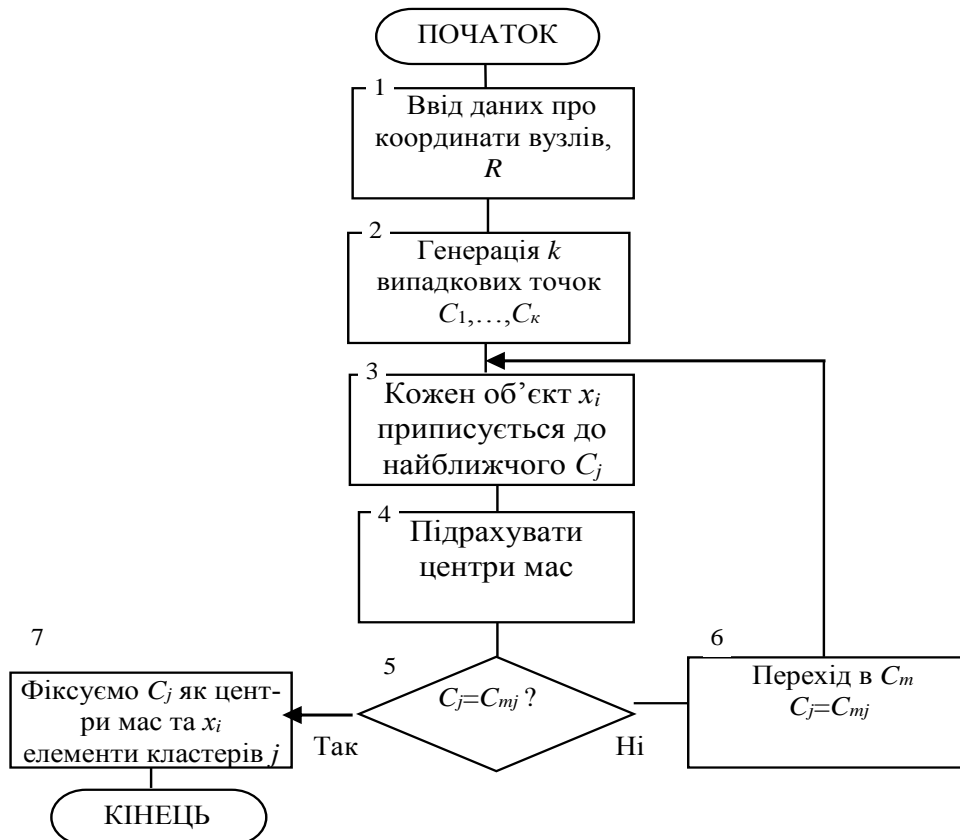


Рис. 2. Схема-алгоритму k -середніх

В процесі пошуку може виявитися, що один або кілька кластерів виявляться порожніми, в цьому випадку можна почати процес заново з нових стартових точок, або змінити координати центрів мас „порожніх” кластерів, випадковим чином, і продовжити пошук.

В результаті виконання алгоритму задана множина об’єктів буде розбита на k -кластерів (підмножин) і будуть визначені координати центрів мас цих кластерів.

До переваги даного алгоритму можна віднести невисоку обчислювальну складність. Недоліки: не гарантує глобального мінімуму, необхідність завдання числа кластерів, кінцеве рішення значно залежить від початкового наближення.

Алгоритм FOREL (FORmal ELement) [8, 9]

Аналогічно розглянутому вище алгоритму, алгоритм кластерного аналізу FOREL також мінімізує сумарне квадратичне відхилення елементів кластерів від центрів мас цих кластерів.

В алгоритмі FOREL задається розмір кластера (в нашому завданні розмір зони покриття ТА).

У двовимірній задачі на геометричній площині під R розуміється максимальна відстань від елемента кластера до його центру мас (радіус). Кожен елемент також розглядається як точка на площині і характеризується своїми координатами (x_j, y_j) . Координати центра мас i -го кластера визначаються згідно (2) або (3). Алгоритм кластеризації включає в себе наступні основні кроки:

1. Задаються границі області, координати об’єктів (точок) $I = \{I_1, I_2, \dots, I_n\}$ і максимальний розмір кластера (R), номер кластера.

2. Вибирається випадкова точка m_i в заданій області. Цю точку на початковому етапі приймаємо за центр мас кластера.

3. Всі об’єкти, що знаходяться на відстані не більше R , приписуються до даного кластера.

4. Для отриманого кластера обчислюється центр мас m_i' відповідно до формул (2) або (3). Якщо обчислені координати центру мас збігаються з точкою m_i , то вважаємо, що кластер i визначено, всі приписані до цього кластера точки позначаються номером кластера і виключаються з подальшого розгляду.

Перехід до п. 5 (пошук наступного кластера). Якщо обчислені координати центру мас не збігаються з точкою, то процес пошуку триває, тобто приймаємо $m_i = m_i'$, перехід до п. 3.

5. Перевіряємо, чи залишилися об’єкти, не віднесені ні до одного кластеру.

Якщо немає, то всі кластери визначені, завершення пошуку (до п. 6). Якщо об’єкти залишилися, то перехід до п. 2 (пошук чергового кластеру).

6. Виводимо дані про належність об’єктів до кластерів, центрів мас отриманих кластерів. Кінець пошуку.

Примітка. Під час пошуку чергового кластера може виявитися, що на віддаленні менше R від обраного центру мас немає жодного об’єкта.

В такому випадку слід зробити вибір нового центру мас (випадковий вибір). Узагальнена схема-алгоритму FOREL приведена на рис. 3.

До переваг даного алгоритму можна віднести: можливість зміни числа кластерів в залежності від величини R , збіжність алгоритму збільшується зі збільшенням R . Недоліки: значна обчислювальна складність $O(n^2)$, кінцеве рішення значно залежить від початкового наближення.

Для його усунення необхідно організувати кілька прогонів алгоритму з різними початковими рішеннями і вибрати краще на основі заданого функціонала.

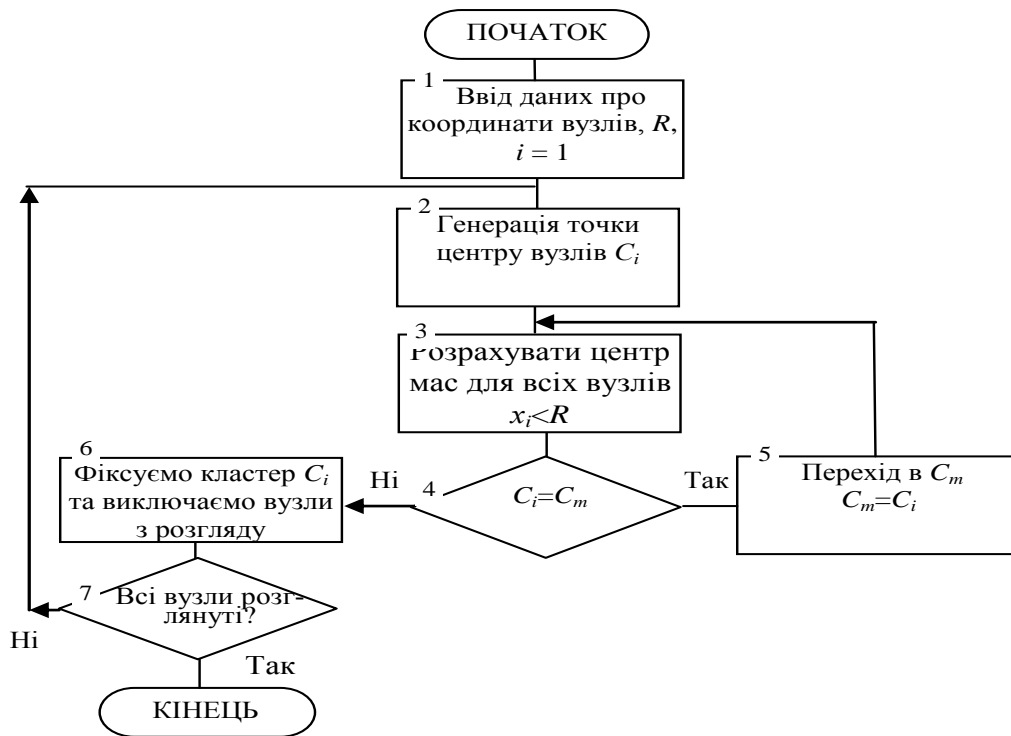


Рис. 3. Схема-алгоритма FOREL

Узагальнений алгоритм

Узагальнений алгоритм побудови зв'язної топології для досягнення тієї чи іншої цільової функції управління мережею.

1. Введення вихідних даних: множина вузлів $i=1..N$ та їх координати розміщення (x_i, y_i) ; множина ТА $b=1..N_{ТА}$; максимальна і мінімальна висоти польоту, дальності радіозв'язку ТА та вузлів, що визначають значення радіусу покриття $R = [R_{\min}, R_{\max}]$; цільові функції управління та ієрархія їх пріоритетів.

2. Збір інформації про стан мережі та ідентифікація її стану – аналіз якості функціонування мережі за обраними показниками ефективності [3].

3. Перевірка наземного сегмента на зв'язність.

Для цього можуть бути використані алгоритми Прима або Краскала [7].

Якщо сегмент незв'язний, то виділити точки (вузли), що мають найближче розташування між незв'язними підмережами.

4. Знаходження рішення з покриття виділених точок за допомогою одного з алгоритмів кластерного аналізу:

ЯКЩО цільова функція – мінімум ТА,

ТО реалізувати алгоритм **FOREL**.

Для цього задаємо максимум R та знаходимо кількість кластерів $n_{кл}$.

ЯКЩО $n_{кл} \geq N_{ТА}$ (задача не вирішується заданою кількістю ТА)

ТО вибрати найбільш важливі підмережі та перехід до п. 2.

ІНАКШЕ виконати алгоритм.

(При необхідності оптимізації якості функціонування мережі – виконати алгоритм для різних значень R . Вибрати найкращий варіант топології за ступенем досягнення поточної

цільової функції управління).

КІНЕЦЬ.

ЯКЩО цільова функція – використати задану кількість ТА,

ТО реалізувати алгоритм **k-середніх**.

(При необхідності оптимізації якості функціонування мережі – виконати алгоритм

для різної кількості кластерів $n_{\text{клmin}} \leq n_{\text{кл}} \leq n_{\text{клmax}}$ при задоволенні вимоги $R \leq R_{\text{max}}$ і вибрати найкращий варіант топології за ступенем досягнення цільової функції управління).

КІНЕЦЬ.

5. Досягнення цільових функцій управління по ієрархії пріоритетів за рахунок визначення числа й координат виділених (критичних) вузлів в маршрутах, напрямках передачі, підмережах, які вимагають зв'язності через ТА – перевантажених (для перерозподілу трафіку), що мають малу енергію батарей і т.д.

ЯКЩО необхідна прив'язка до стаціонарної компоненти,

ТО виділити точку з координатами прив'язки.

Перехід до п. 4 з новими виділеними точками.

Кінцевим рішенням є визначення мінімальної кількості точок проекції на площині та висоти розміщення ТА. В узагальненому алгоритмі розглянуті тільки два принципи виділення кластерів: виділення апріорно заданого числа кластерів (ТА) і виділення кластерів апріорно заданого „розміру”. Додаткові вимоги і обмеження встановлюються відповідно до конкретних вимог інформаційного обміну в мережах [3]. Наприклад, вимоги до максимально допустимої кількості кластерів (кількість ТА), до максимального або мінімального розміру кластера, числу елементів (вузлів) кластера, параметрів інформаційного обміну і т. д. Наприклад, мінімізація числа кластерів означає мінімізацію числа ТА. Використання максимальної кількості кластерів призводить до зменшення числа вузлів в кластерах і, відповідно, зменшенню навантаження на кожен ТА, появи більшої кількості маршрутів передавання можливості рівномірного розподілу трафіку і т.д.

Для реалізації вимог інформаційного обміну, підвищення його якості пропонується наступна модифікація базового алгоритму для кожного з методів кластеризації.

1. Вибираємо кількість кластерів для методу k -середніх (величину R для FOREL).

2. Розбиваємо мережу на *задану* для методу k -середніх кількість кластерів (для FOREL – кількість кластерів – результат рішення при заданій величині R).

3. Аналіз умов задоволення вимог за кількістю ТА і параметрам інформаційного обміну.

4. Перевірка граничного значення кількості ТА, виконання параметрів інформаційного обміну. У разі виконання – КІНЕЦЬ, інакше – перехід до кроку 5.

5. Повторюємо алгоритм для іншої кількості кластерів для методу k -середніх (для зміненого значення R для FOREL).

5. Оцінюємо величину поліпшення параметрів інформаційного обміну. При поліпшенні – перехід до кроку 5, інакше – крок 4.

З огляду на те, що розглянуті методи дають можливість отримати близькі до оптимальних рішення, а не єдине можливе рішення, то в практичних додатках може бути корисним використання обох методів і вибір найбільш прийняттого результату. Так, на відміну від використання алгоритму FOREL, при використанні алгоритму k -середніх потрібно багаторазове рішення задачі кластеризації. Однак, використання даного методу може бути корисним, тому що при обмеженні максимальної кількості ТА, він дозволяє отримати більш рівномірний їх розподіл по зонах обслуговування.

Для оцінки результатів функціонування алгоритмів здійснена їх програмна реалізація в середовищі MATLAB. Проведені експерименти і отримані залежності: числа кластерів від розмірності мережі при застосуванні різних алгоритмів кластеризації, числа і розміру кластерів від дальності радіозв'язку наземних вузлів.

Із збільшенням числа кластерів відстань між кластерами зменшується, кластери більш щільно розташовуються один до одного, цю закономірність можна використовувати для побудови топології повітряної мережі і отримання додаткових маршрутів передачі.

У той же час, від висоти польоту і дальності радіозв'язку залежить потужність, що витрачається на передачу і швидкість (час) обміну. Чим менша дальність, тим вища

швидкість передачі. Збільшення дальності радіозв'язку призводить до збільшення витрати енергії на передачу як на ТА, так і вузла. Крім цього, граничне збільшення дальності радіозв'язку обмежене малою потужністю передавачів вузлів мобільних абонентів.

Показано, що запропоновані алгоритми дозволяють отримати близькі до оптимальних рішення, в реальному масштабі часу для мереж, що нараховують сотні наземних вузлів і десятки ТА.

Висновки. Таким чином, завдання побудови топології наземно-повітряних мереж зведене до задачі кластеризації виділених вузлів (побудови зон покриття) телекомунікаційними аероплатформами. Система управління телекомунікаційною аероплатформою, використовуючи запропоновані модифіковані ітераційні алгоритми кластерного аналізу FOREL і k -середніх, дозволяє побудувати зв'язну топологію мережі мінімальною (заданою) кількістю телекомунікаційних аероплатформ, які будуть реалізовувати певну цільову функцію управління мережею.

Напрямок подальших досліджень є розробка правил переміщення ТА в наземно-повітряних мережах при різній мобільності вузлів мережі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Mohammad Mozaffari, Walid Saad, Mehdi Bennis, Young-Han Nam, and Merouane Debbah A Tutorial on UAVs for Wireless Networks: Applications, Challenges, and Open Problems. <https://arxiv.org/abs/1803.00680>, 2018.
2. Sharmal V. G-FANET: an ambient network formation between ground and flying ad hoc networks / V. Sharma, R. Kumar // Telecommunication System, 2016.
3. Романюк В.А. Задачі синтезу топології мереж мобільної компоненти з використанням телекомунікаційних аероплатформ / В.А. Романюк, Є.О. Степаненко // Збірник наукових праць ВІПІ. – 2017. – № 3. – С. – 112.
4. Романюк В.А. Цільові функції управління телекомунікаційними аероплатформами в тактичних мережах зв'язку / В.А. Романюк // VIII науково-практична конференція ВІПІ. – 2015. – С. 37 – 41.
5. Zhu M. Maintaining Connectivity of MANETs through Multiple Unmanned Aerial Vehicles/ M. Zhu, F. Liu, Z. Cai, M. Xu // Mathematical Problems in Engineering Volume, 2015.
6. Lysenko O. Increasing of MANET throughput using quasi-optimal UAVs placement control / O. Lysenko, I. Uriadnikova, S. Valuiskyi, S. Chumachenko, P. Kirchu, A. Semenchenko // Science & Military, 1/2013.
7. Нуралиев И.Н. Обеспечение связности наземных сегментов летающей сенсорной сети с помощью БПЛА / И.Н. Нуралиев, Р.В. Киричек, В.И. Парамонов, А.Е. Кучерявый // 2-я международная конференция „Интернет верей и 5G”, 2016.
8. Парамонов А.И. Разработка и исследование комплекса моделей трафика для сетей общего пользования: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.12.13 / Парамонов Александр Иванович. – СПб, 2014. – 325 с.
9. Загоруйко Н. Г. Прикладные методы анализа данных и знаний. / Н. Г. Загоруйко. – Новосибирск: ИМ СО РАН, 1999. – 270 с.