

ЗАДАЧІ СИНТЕЗУ ТОПОЛОГІЙ МЕРЕЖ МОБІЛЬНОЇ КОМПОНЕНТИ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ АЕРОПЛАТФОРМ

Проведено класифікацію задач синтезу топологій мобільної компоненти мереж зв'язку військового призначення з використанням мережі телекомунікаційних аероплатформ. Дано математичні постановки приватних завдань синтезу та визначено напрямки їх вирішення.

Романюк В.А., Степаненко Є.А. Задачи синтеза топологий мобильной компоненты с использованием телекоммуникационных аэроплатформ. Проведена классификация задач синтеза топологий мобильной компоненты сетей связи военного назначения с использованием сети телекоммуникационных аэроплатформ. Даны математические постановки частных задач синтеза и определены направления их решения.

V. Romaniuk, E. Stepanenko Problems of topologies synthesis in military networks with UAV Ad-hoc Networks. Classification of the problems of topologies synthesis in military multi-layer ad-hoc networks with UAV is carried out. The mathematical statements of particular synthesis problems are given and the directions of their solution are determined.

Ключові слова: синтез топологій, мобільна компонента, мережа телекомунікаційних аероплатформ.

Постановка завдання в загальному вигляді. У багатьох країнах світу, в тому числі на Україні, проводяться дослідження із застосування повітряних телекомунікаційних аероплатформ (ТА) в інтересах забезпечення зв'язку підрозділів (військ) [1 – 9]. Найбільш важливою перевагою мереж на ТА (FANET – Flying ad-hoc networks) є здатність забезпечувати зв'язок в реальному часі без наявності будь-якої інфраструктури.

Ідея використання для узгодженого виконання завдань зв'язку групи недорогих ТА на БпЛА може використовуватися як в цивільній так і військовій сферах. ТА (повітряні вузли) можуть використовувати існуючі стандартні бездротові технології передачі даних (наприклад, Wi-Fi, WiMAX, LTE) і бути застосовані не тільки як джерело відеоданих з камери на борту БпЛА, а також в якості ретранслятора (маршрутизатора), утворюючи багатозв'язну меш (mesh) топологію мережі. При цьому вихід з ладу одного або декількох вузлів, як правило, не тягне за собою повне припинення виконання завдання. Для цього кожен БпЛА повинен бути оснащений маршрутизатором з двома радіозасобами (з можливістю використання спрямованих антен): 1-й – для зв'язку з наземними абонентами: сенсор або шлюз сенсорного поля, мобільний абонент (військовослужбовець, транспортний засіб, бойова одиниця), мобільна базова станція, стаціонарний вузол зв'язку; 2-й – для взаємного обміну інформацією між ТА.

Сукупність ТА будуть створювати повітряні транспортні мережі та призначені для виконання таких основних завдань [1]:

швидка організація резервної (додаткової) мережі (каналів) радіозв'язку з наземними абонентами, забезпечення оперативного зв'язку у важкодоступній зоні (районі виконання бойового завдання, гірська місцевість тощо), ретрансляція (маршрутизація) інформаційних потоків мобільних абонентів (МА) через ТА;

збільшення зони покриття (розгортається при існуючій інфраструктурі зв'язку, наприклад, для швидкого відновлення після часткового або повного руйнування, розвантаження базових станцій в місцях скупчення людей і т.п.);

опитування і збір даних з віддалених сенсорних вузлів (полів), які накопичили інформацію за час автономної роботи і т.п.;

повітряний моніторинг території при проведенні розвідувальних і пошуково-рятувальних завдань, передача на наземну станцію відеоданих і зображень в реальному режимі часу і т.д.;

контроль небезпечних техногенних ділянок, цілодобовий контроль над стратегічними об'єктами, охорона кордонів, моніторинг транспортного трафіку і т.п.

Переваги застосування мережі телекомунікаційних аероплатформ (МТА) полягають у наступному:

1. Істотно розширяється територія виконання бойового завдання за рахунок передачі даних через проміжні повітряні вузли та забезпечується зв'язність між географічно розділеними угрупованнями військ (зонами мобільної компоненти);
2. Підвищується надійність зв'язку між МБС та між МА за рахунок появи альтернативних незалежних маршрутів передачі.
3. Підвищується продуктивність мережі за рахунок: використання радіоканалів між ТА з більшою пропускну здатністю в порівнянні з радіоканалами між МБС, підвищення ефективності управління мобільним компонентом (зменшується обсяг переданої службової інформації та зменшується час її збору), скорочення в кілька разів довжин маршрутів передачі інформації тощо.
4. Можливість підвищення тривалості функціонування мережі шляхом поетапної заміни ТА.
5. В умовах виведення з ладу (знищення) одного або декількох БпЛА підвищити живучість мережі можливо шляхом автоматичної реконфігурації її топології.
6. Забезпечується задана якість обслуговування абонентів (QoS) за рахунок застосування детермінованих протоколів множинного доступу.
7. Забезпечується дистанційний збір розвідувальної інформації або її знімання з виділених датчиків сенсорних мереж.
8. Істотно знижується вартість технічних рішень.

Вузли мобільного компонента повинні швидко адаптуватися до частих змін топології та рівня трафіка, а також ефективно використовувати обмежені мережеві ресурси. У таких умовах забезпечити інформаційний обмін із заданою якістю неможливо без ефективної системи управління (СУ) мобільним компонентом, складовою частиною якої є підсистема управління МТА. В [8] розглянуті основні функції та завдання системи управління перспективної мобільної компоненти тактичної ланки управління. Функціональна модель системи управління складається з наступних основних підсистем управління: радіоресурсом, топологією, маршрутизацією, навантаження, безпеки тощо. Однією з основних задач управління мобільною компонентою є управління її топологією. *Топологія визначає потенційні показники функціонування мережі (зв'язність, маршрути передачі, пропуску здатність, живучість, тощо) по передачі інформаційних потоків та якості обслуговування користувачів.*

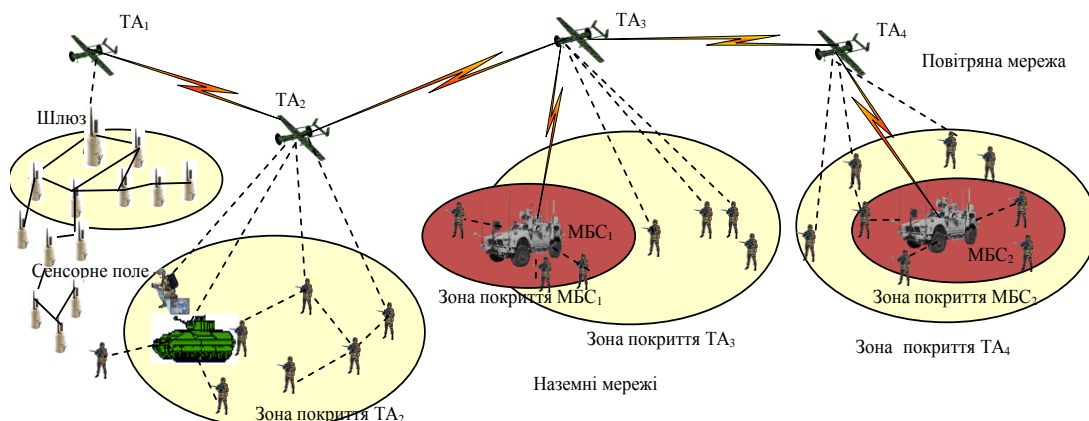


Рис. 1 Приклад топології мережі з використанням мережі ТА

На рис. 1 наведений приклад топології перспективної мобільної компоненти мереж зв'язку військового призначення. Фактично формуються три топології 3-х рівнів: топологія бойових радіомереж, топологія мережі мобільних базових станцій, топологія мережі на ТА.

Можливими маршрутами передачі даних з врахуванням функціонування цих 3-х мереж є: МА-МА, МА-МБС-МА, МА-МБС-...-МБС-МА, МА-ТА-МА, МА-ТА-...-ТА-МА, МА-МБС-ТА-...-ТА-МБС-МА. З урахуванням наявності сенсорних мереж формується її топологія. ТА буде виконувати функцію збору інформації моніторингу від сенсорних вузлів.

Аналіз останніх публікацій. Аналізу завдань управління БпЛА, в тому числі пов'язаних з формуванням топології радіомереж, присвячена значна кількість робіт.

Автори в [1] формулюють загальні проблеми побудови мереж з ТА (FANET), в тому числі й побудови її топології. В [2, 9] дається загальна постановка та математичних опис пошуку топологій мереж зв'язку тактичної ланки управління.

В [3] визначені цільові функції управління мережею ТА.

В монографії [4] наведені дослідження зон стабільного та нестабільного покриття ТА в залежності від 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, пропускної здатності, параметри зон обслуговування, зон покриття, приведені алгоритми керування польотом ТА. Запропонований ряд евристик для пошуку рішення по знаходженню необхідної топології.

Дослідження [5] показали, що використання БпЛА є ефективним рішенням моніторингу і збору даних з віддалених сенсорних полів за короткий проміжок часу. В роботі розглядаються варіанти (моделі мобільності БпЛА) обльоту сенсорних полів, розбитих на кластери. Показано, що модель мобільності БпЛА грає ключову роль в скороченні числа недоступних вузлів і часу виконання завдання. Досліджується вплив різних моделей мобільності на формування кластерів при зборі даних з сенсорних мереж.

Значна кількість робіт присвячена завданням переміщення БпЛА (забезпечення зв'язності між ними, обльоту перешкод, автономність роботи та інші [6]). В [7] розглянуті реалістичні моделі польоту БпЛА: кругова, овальна, прямолінійна, в вигляді вісімки, скануюча. В роботі [10] розглядається колективна поведінка та групове управління БпЛА на основі технології багатоагентних систем, групове виявлення наземних об'єктів системою спостереження.

В [11] авторами розглянута методика управління топологією мобільних радіомереж з самоорганізацією, визначені цільові функції управління. Для скорочення перебору можливих варіантів топологій запропоновано використовувати базу правил, яка дозволяє отримувати близькі до оптимальних рішення в реальному масштабі часу при реалізації конкретної цільової функції управління.

В [12] розглянутий алгоритм синтезу магістральної топології в 2-х рівневих мобільних меш-мережах. Кожна точка доступу має два радіомодуля: один для низькошвидкісного зв'язку з МА, другий – для швидкісного зв'язку між точками доступу. Запропоновані евристики для визначення точок доступу, які будуть складати магістраль передачі даних. Показано, що часова складність алгоритму та об'єм службового трафіка не залежать від кількості вузлів.

В [13] розглянуті способи побудови магістральної мережі у 3-х рівневих мережах поля бою: солдатської, гелікоптерів та телекомунікаційних аероплатформ. 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 [14] запропоновано використання нейронних мереж, нечіткої логіки, генетичних алгоритмів для балансування трафіку в умовах кооперації дій повітряної та наземних мереж.

В [15] розроблено два децентралізованих алгоритма управління топологією радіомережі з неоднорідними потужностями передачі.

В [16] запропонований евристичний алгоритм введення додаткових ТА до існуючої мережі ТА для забезпечення зв'язності з наземною мережею MANET, яка переміщується.

Таким чином актуальність тематики використання ТА для забезпечення зв'язності різних мереж призвела до значної кількості публікацій. Науковці розглядають різні аспекти побудови мережі МТА: моделі переміщення, збору інформації, локальні алгоритми побудови топологій багаторівневих систем тощо. Однак, системно не визначені задачі управління топологією МТА стосовно багатоієрархічних неоднорідних мереж військового призначення.

Тому *метою статті* є визначення множини задач, цільових функцій управління топологією повітряних мереж, які кооперативно працюють з наземними мережами (мережа мобільних абонентів, мережа мобільних базових станцій, сенсорними мережами) та розгляд часткових задач синтезу топології мережі мобільної компоненти з використанням мережі ТА.

Викладення основного матеріалу.

Розглянемо особливості та обмеження при побудові топологій МК з ТА:

- топологія мережі ТА займає вищий рівень в ієрархії топологій мобільної компоненти ($T_{МТА} - T_{ММБС} - T_{ММА}$), має суттєвий вплив на інші топології та будується для покращення параметрів наземних мереж МК з наявними топологіями нижчих рівнів;

- топології всіх мереж швидко змінюються (динаміка змін топології МТА найвища), що відзначає особливості покриття, встановлення зв'язку, розподілу радіоресурсу та побудови маршрутів передачі;

- вузли наземних мереж постійно переміщуються, тому необхідно враховувати напрямки переміщення абонентів, динаміку змін топології та реалізовувати відповідні алгоритми руху ТА, покриття та враховувати при побудові маршрутів передачі;

- обмеженість ресурсів та палива ТА обмежує час виконання завдання, крім цього необхідний час для підльоту до заданого району виконання завдання;

- обмеженість обладнання (кількості радіозасобів) на ТА визначає особливість забезпечення розподілу ресурсів між ТА та ТА-абоненти зони покриття (потребує відповідних протоколів каналного рівня);

- особливість оцінки якості обслуговування покриття, якості топології та QoS передачі даних;

- можливість зникнення зв'язку ТА з центром управління та необхідність забезпечення його автономної роботи з координацією дій з іншими ТА.

Фактично мережа ТА представляє собою повітряну транспортну мережу, яка повинна:

- підтримувати зв'язність між ТА (постійно підтримувати мережу ТА) та забезпечувати високошвидкісну передачу даних;

- забезпечувати необхідне покриття та зв'язність з наземними абонентами, МБС;

- мати зв'язність з наземним магістральними вузлом;

- мати можливість забезпечити автономний режим роботи без наземного центру управління.

Залежно від основного критерію ефективності розрізняють наступні варіанти постановки задач синтезу топології БЛА (рис. 2).

1. По типу задіяних мереж мобільної компоненти необхідно здійснити синтез:

- безпосередньо топології мережі ТА із забезпеченням зв'язністю з хоча б одним вузлом наземної транспортної мережі;

- топології мережі мобільних базових станцій (ММБС) з використанням мережі ТА;

- топології мобільних абонентів з використанням мережі ТА;

- топології безпроводних сенсорних мереж з використанням ТА;

- інші комбінації рівнів МК або всіх рівнів разом.

2. За типом та кількістю критеріїв ефективності.

Цілями системи управління мережі ТА можуть бути екстремум або підтримка (виступають як обмеження) заданих критеріїв ефективності функціонування всієї мобільної компоненти (її зони або напряму між окремою парою „відправник-адресат”) $K_i = \{K_1, K_2, \dots, K_n\}$ – забезпечення зв'язності, оптимуму продуктивності, якості маршрутів передачі, мінімум

ресурсів на реалізацію завдання, мінімуму часу виконання завдання, максимум покриття тощо. Наприклад:

K_1 – забезпечення зв'язності заданої кількості (виділених) абонентів, сенсорів та/або МБС;

K_2 – продуктивність всієї МК або її зони, напряму, маршруту, радіоканалу;

K_3 – ступінь покриття зонами ТА фіксованої кількості (виділених, пріоритетних) МБС, абонентів, сенсорів;

K_4 – структурна надійність (зв'язність) МК, рівня МК, зони, напряму, маршруту;

K_5 – якість маршрутів мобільної компоненти, її певного рівня або її зони (K_5^1 – довжина маршрутів передачі в зонах мережі, K_5^2 – середній час доставки, K_5^3 – пропускна здатність, тощо);

K_6 – кількість ТА, 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 МТА за мінімальний час у визначеному районі за мінімальний час тощо.

– за критерієм якості передачі (пропускна здатність, затримка передачі, джиттер) – 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.

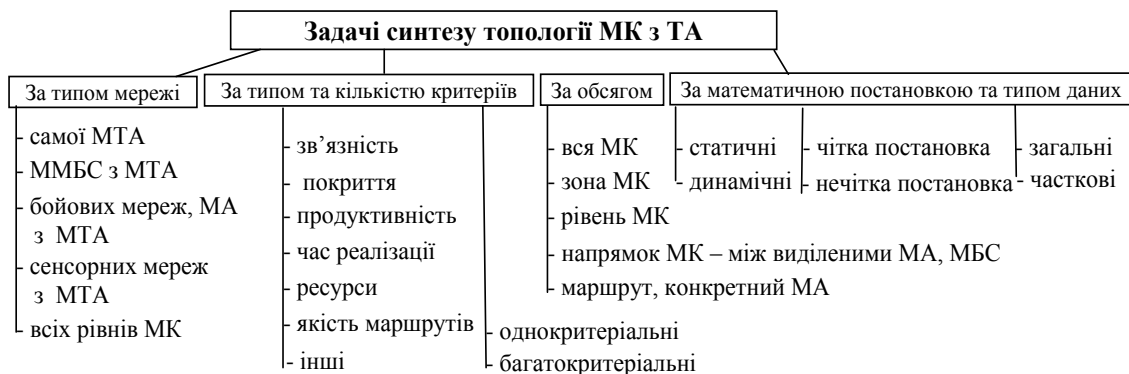


Рис. 2 Класифікація задач синтезу топології МБЛА

3. За обсягом впливу МТА на топологію МК розрізняють вплив на: всю МК, її зони, рівні МК, напряму – між виділеними вузлами, абонентами, маршруту тощо;

4. За математичною постановкою та типом вихідних даних.

Важливою особливістю задач управління є динамічний характер МТА. Тому доцільно розглядати мережу як систему, що розвивається. Побудова мережі представляє багатоетапний процес її розвитку з деякої початкової топології в кінцеву. Звідси впливає постановка задачі динамічного програмування: задана загальна кількість ТА на операцію. Потрібно розподілити їх за етапами (число в загальному випадку невідомо) таким чином, щоб забезпечити оптимум прийнятих критеріїв ефективності.

Показниками оцінки ефективності результату процесу управління МТА можуть виступати ступінь досягнення та час виконання i -ї задачі (мети) управління за певними ресурсами.

Необхідно відзначити, що синтез топології мереж великої розмірності наштовхується на ряд труднощів, пов'язаних з великою розмірністю МК, багатокритеріальністю задачі та недовершеністю існуючих методів оптимізації. Перераховані труднощі викликають необхідність використання декомпозиційного підходу: загальна задача синтезу топології розбивається на ряд підзадач за певними пріоритетами критеріїв ефективності. Зазначені часткові задачі синтезу не є незалежними. Для цього на етапі проектування мережі будується граф у вигляді дерева цілей, вершинами якого є цілі, а дуги відображають вплив досягнення підцілі (часткові задачі управління) у ціль (основна задача) [8] (рис. 3).

Рішення перерахованих часткових задач у сукупності складає загальну задачу синтезу, та здійснюється, як правило, з використанням наближених евристичних методів.

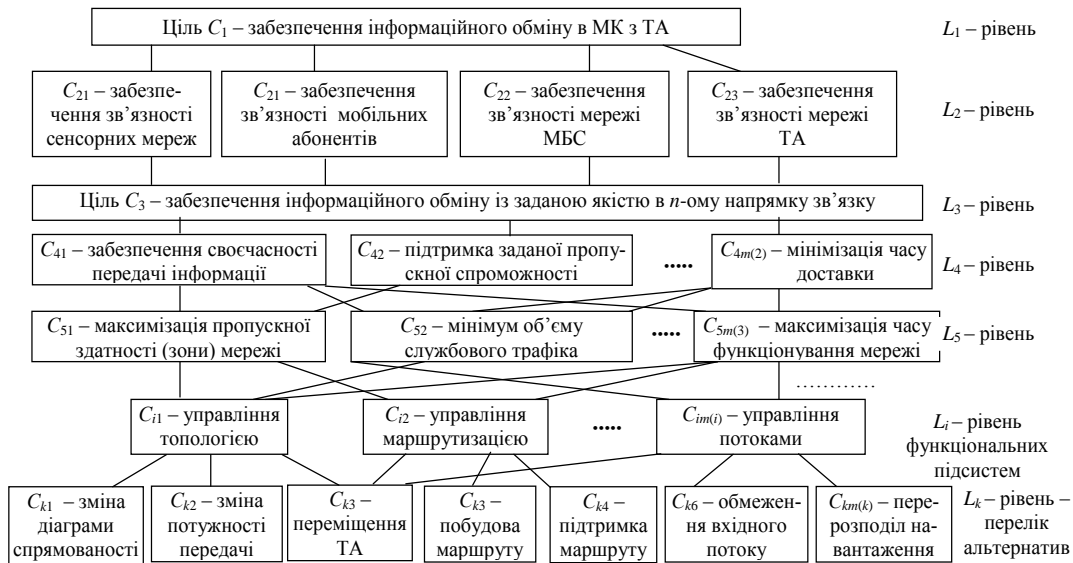


Рис. 3 Ієрархія процесу ухвалення рішення з управління МК з ТА

Наприклад, для пошуку магістральної топології МТА можливо використовувати декілька алгоритмів теорії графів: остовне дерево, домінуючі множини, дерево Штейнера тощо.

В [13] пропонується використовувати модель домінуючої множини в графі. Накладення моделі домінуючої множини на модель зв'язності, яка враховує геометрію мережі (геометричний випадковий граф с логнормальною радіомоделлю та прокольною моделлю інтерференції) дозволяє із значним ступенем точності відобразити фізичні властивості реальної мережі. Взаємне переміщення вузлів накладає додаткові особливості на моделі представлення функціонування мереж. Розрізняють наступні моделі переміщення вузлів: модель випадкового переміщення, модель випадкового напрямку, модель Гаусса-Маркова та інші. Розглянемо ряд часткових задач синтезу топології МТА за критерієм зв'язності (здатність будь-якої пари вузлів здійснювати інформаційний обмін, використовуючи проміжні вузли як ретранслятори). Зв'язність виступає як основний критерій до мобільної компоненти. Тому, першочерговою метою управління топологією МТА є забезпечення зв'язності всіх (певних зон) МК або пріоритетних абонентів.

Введемо позначення: множина мобільних базових станцій $B = \{b_1, b_2, \dots, b_i, \dots, b\}$, $i = \overline{1, I}$, положення на місцевості $X = \{x_1, \dots, x_i, \dots, x\}$;

множина кластерів $C = \{C_1, C_2, \dots, C_j, \dots, C_J\}$, $j = \overline{1, J}$ і q_j – число МА в кожному кластері (кластер – окремий підграф мережі МБС, у якому фіксована підмножина МБС B_q^j зв'язана між собою за допомогою наявних маршрутів передачі й не пов'язані з іншими МБС);

$h = \text{const}$ – висота польоту БЛА (будемо вважати, що всі МБС перебувають на однаковій висоті); r_u, r_b, R – максимальні дальності радіозв'язку між ТА-ТА, МБС-МБС і ТА-МБС,

відповідно (у припущенні граничної моделі радіоканалу), $r_u > r_b$; $r_z = \sqrt{R^2 - h^2}$ – максимальний радіус зони покриття БЛА; множина ТА $U = \{u_1, u_2, \dots, u_k, \dots, u\}$, $k = \overline{1, K}$ і проекція їхнього положення на місцевості $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_k, \dots, y_K\}$.

Постановка задачі: забезпечити зв'язну топологію мобільних базових станцій мінімальною кількістю ТА. Тобто необхідно знайти мінімальну кількість ТА й розташування їх проекцій на місцевості (центрів зон з радіусом r_z), за умови, що хоча б одна МБС кожного кластера належить зоні покриття ТА (рис. 4).

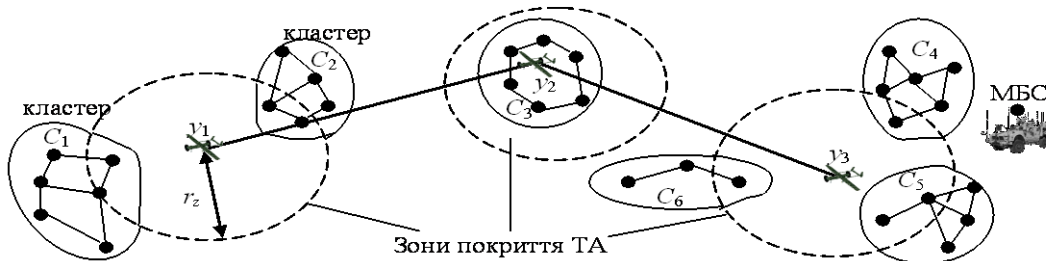


Рис. 4 Шість кластерів покриті трьома ТА

Математична постановка задачі формулюється в такий спосіб

$$\min K, \quad (1)$$

при виконанні обмежень

$$\min_{y_1, y_2, \dots, y_K} \max_j \min_{x \in C_j} |x - y_k| \leq r_z, \quad k = \overline{1, K}, \quad j = \overline{1, J}, \quad (2)$$

$$|y_k - y_v| \leq r_u, \quad k, v \in U \quad k \neq v, \quad (3)$$

де $|x - y|$ – Евклідова відстань між крапками x та y на місцевості.

Нерівність (2) – максимальна відстань між центром зони покриття та кластерами повинна бути мінімізована. Нерівність (3) визначає необхідність підтримки зв'язності (мінімальної відстані r_u) між ТА.

Ця задача відноситься до класу обчислювальної геометрії та близька до задачі розміщення p -центрів відповідного графа – знаходження мінімальної кількості кіл фіксованого радіуса та їхнього положення, що покривають задану кількість крапок [17]. Задача є NP -повною. Тому одержання точного рішення для мереж великої розмірності є скрутним і для її рішення необхідно використовувати евристичні методи. Загальний алгоритм пошуку p -центрів описаний в [17]. Однак, на відміну від задачі пошуку p -центрів наша задача ускладнюється зняттям обмеження на розташування p -центрів у вершинах (ребрах) графа, і необхідністю забезпечення зв'язності між ТА.

Загальний алгоритм знаходження топології ТА полягає в наступному:

1. Одержання початкового рішення (початкової топології);

знаходження „центрів мас” кожного кластера C_j^0 , $j = \overline{1, J}$;

знаходження центра зони покриття, як центра покриття центрів мас C_j^0 .

2. Пошук нового рішення, що задовольняє виразам (2) і (3).

3. Аналіз отриманого рішення. Якщо поліпшення рішення можливе, то перехід до кроку 2, інакше – КІНЕЦЬ.

Число ітерацій алгоритму значно залежить від варіанта початкового рішення. Розглянемо ще кілька постановок задач синтезу топології МК.

Постановка задачі: знайти зв'язну топологію МК, яка мінімізує (обмежує) довжину маршрутів передачі між виділеними МБС.

Математична постановка

$$\min L(b_j, b_i) \text{ або } L(b_j, b_i) \leq L_{\max},$$

при виконанні обмежень

$$|x_i - y_k| \leq r_z, k = \overline{1, K}, j = \overline{1, J},$$

$$|y_k - y_v| \leq r_u, k, v \in U, k \neq v,$$

де i – виділений вузол, $L(b_j, b_i)$ – довжина маршруту між j -ої МБС й i -ої МБС, у тому числі через ТА.

Постановка задачі: *знайти зв'язну топологію МК, що забезпечує максимальну продуктивність МК.*

Очевидно, що ця задача є загальною та для її рішення вона повинна бути декомпована та погоджена за рядом підзадач, конкретний перелік яких і математична постановка визначається ситуацією в мережі, наявністю ресурсів і типом вихідних даних. Тобто вирішення загальної задачі буде представляти цільову ієрархію послідовності часткових задач управління (рис. 3), кожна з яких повинна враховувати:

– параметри всієї МК (надійності, безпеки й ін.), параметри кожного рівня МК (пропускні здатності радіоканалів всіх рівнів, розмірності мереж, граничне число абонентів на кожну МБС, навантаження й т.д.)

– наявні ресурси кожного рівня МК (апаратний ресурс – кількість ТА, МБС і МА; математичне забезпечення управління – множина методів та алгоритмів управління інших функціональних підсистем СУ; часовий ресурс й ін.);

– вимоги щодо обслуговування абонентів (тип трафіку, навантаження й ін.).

Для вирішення задачі знаходження топології пропонується використати евристики (правила), об'єднані в базу правил (складають основний елемент системи підтримки прийняття рішень [12] центру управління МК). Кожне правило залежно від цілі управління припускає реалізацію певного керуючого впливу: переміщення ТА, зміна потужності передачі або діаграми спрямованості інтелектуальної антени ТА. Правила об'єднані в групи, кожна з яких намагається досягнення певної цілі (часткової постановки задачі). Для виключення комбінаторного вибуху пропонується використати мета-правила, що встановлюють порядок застосування груп правил у залежності від ієрархії цілей (підцелей) управління (табл. 1).

Таблиця 1

Приклади залежності ціль-підціль

Цілі	Підцілі
Покриття та встановлення (підтримка) зв'язності ТА	з максимальною кількістю сенсорів, абонентів, МБС в заданій зоні з визначеними сенсорами, абонентами, МБС з використанням мінімуму ТА побудова, підтримка, оптимізація топології побудова (перебудова) маршруту заданої якості між визначеними абонентами, МБС максимум (забезпечення заданої) пропускної здатності між визначеними абонентами, МБС мінімум (обмеження) часу доставки пакетів між визначеними абонентами збільшення часу функціонування мережі балансування трафіку між повітряною та наземними мережами
Побудова, підтримка, оптимізація топології	Побудова та підтримка маршрутів передачі Мінімум взаємних завад передач вузлів Максимум (забезпечення) пропускної здатності Мінімум (обмеження) витрат енергоресурсу вузлів
Побудова та підтримка маршруту передачі даних	Забезпечити задану кількість та якість маршрутів Мінімум службового трафіка
Збільшити час функціонування мережі ТА	Мінімум (обмеження) витрат енергії батареї вузлів Оптимізація ресурсу ТА та маршрутів польоту
Оптимізація пропускної здатності між МА, МБС	Оптимізація покриття, топології, напрямів, маршрутів передачі
Мінімум часу доставки повідомлень тощо	Побудова додаткових маршрутів Оптимізація топології, маршрутів

Таким чином, визначені задачі синтезу топологій мобільної компоненти, яка використовує мережу телекомунікаційних аероплатформ. Визначені критерії синтезу та здійснена математична постановка задач синтезу її топології. Тому, що дані задачі належать до класу NP-повних, то для їх рішення пропонується застосовувати евристики (правила), що дозволяють здійснювати пошук топології, яка задовольняє заданим цілям управління.

Подальшим напрямком досліджень є розробка правил пошуку рішень по синтезу топології мережі ТА з метою реалізації цільової ієрархії прийняття рішень системою управління МК.

ЛІТЕРАТУРА

1. 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.
2. Міночкін А.І. Задачі управління топологією мережі безпілотних летальних апаратів мобільного компоненту мереж зв'язку військового призначення / А.І. Міночкін, В.А. Романюк // Збірник наукових праць № 2. – К.: ВІТІ НТУУ „КПІ”. – 2005. – С. 83 – 90.
3. Романюк В.А. Цільові функції управління телекомунікаційними аероплатформами в тактичних мережах зв'язку / В.А. Романюк // VIII науково-практична конференція ВІТІ. – 2015. – С. 37 – 41.
4. 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.
5. Rashed S. Analyzing the Effects of UAV Mobility Patterns on Data Collection in Wireless Sensor Networks / S. Rashed, M. Soyuturk // Sensors, 2017, 17 (2).
6. Zhao Z. Topology Control and Mobility Strategy for UAV Ad-hoc Networks: A Survey / Z. Zhao, T. Braun // Conference Joint ERCIM eMobility and MobiSense Workshop, 2012.
7. Bouachir O. A Mobility Model For UAV Ad hoc Network / O. Bouachir, A. Abrassart, F. Garcia, N. Larrieu // International Conference on Unmanned Aircraft Systems, 2014. – pp. 383 – 388.
8. Міночкін А.І. Концепція управління мобільною компонентою мереж зв'язку військового призначення / А.І. Міночкін, В.А. Романюк // Збірник наукових праць № 3. – К.: ВІТІ НТУУ „КПІ”. – 2005. – С. 51 – 60.
9. 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.
10. Городецкий В.И. Прикладные многоагентные системы группового управления / В.И. Городецкий, О.В. Карсаев, В.В. Самойлов, С.В. Серебряков // Искусственный интеллект и принятие решений, №2, 2009.
11. Ju H.-J Backbone Topology Synthesis for Multi-Radio Meshed Wireless LANs / H.-J. Ju, I. Rubin, // In Proceeding INFOCOM, 2006.
12. Міночкін А.И. Управление топологией мобильной радиосети / А.И. Міночкін, В.А. Романюк // Зв'язок. – 2003. – № 2. – С. 28 – 33.
13. Papakosta D. Backbone Formation in Military Multi-Layer Ad Hoc Networks Using Complex Network Concepts / D. Papakosta, P. Baras, D. Katsaros, L. Tassioulas // IEEE Military Communications Conference, MILCOM, 2016.
14. Sharmal V. G-FANET: an ambient network formation between ground and flying ad hoc networks / V. Sharmal, R. Kumar // Telecommunication System, 2016.
15. Li N. Hou Topology control in heterogeneous wireless networks: problems and solutions / N. Li, C. Jennifer // In Proceeding IEEE INFOCOM, 2004.
16. 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.
17. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход. – М.: Мир, 1978.