

д.т.н. Романюк В.А. (ВІТІ)
Степаненко Є.О. (ВІТІ)
к.т.н. Панченко І.В. (ВІТІ)
к.т.н. Восколович О.І. (ВІТІ)

ЛІТАЮЧІ САМООРГАНІЗУЮЧІ РАДІОМЕРЕЖІ

Розглянуто основні підходи до побудови та функціонування літаючих самоорганізуючих мереж радіозв'язку на основі БпЛА. Представлений короткий огляд існуючих методів (протоколів) фізичного, каналного, мережевого, транспортного і прикладного рівнів передачі даних і визначено напрями їх подальших досліджень.

Романюк В.А., Степаненко Є.А., Восколович А.И., Панченко И.В. Летающие самоорганизующиеся радиосети. Рассмотрены основные подходы к построению и функционированию летающих самоорганизующихся сетей радиосвязи на основе БпЛА. Представлен краткий обзор существующих методов (протоколов) физического, каналного, сетевого, транспортного и прикладного уровней передачи данными и определены направления их дальнейших исследований.

V.Romaniuk, E.Stepanenko, A.Voskolovich, I.Panchenko Flying ad-hoc networks. The main approaches to the construction and operation of flying self-organizing radio communication networks based on UAV are considered. A brief review of the existing methods (protocols) of the physical, channel, network, transport and application levels of data transmission is presented and directions for their further research are determined.

Ключові слова: БпЛА, мульти-БпЛА, самоорганізуючі радіомережі.

Постановка завдання в загальному вигляді. Оснащення безпілотних літальних апаратів (БпЛА) радіозасобами разом з бездротовими маршрутизаторами та інформаційними системами управління, здатними здійснити колективне виконання завдання БпЛА, призвело до появи нового актуального науково-технічного напрямку – самоорганізуючих літаючих мереж зв'язку (ЛМЗ) [1 – 12].

Літаючі мережі можуть бути застосовані для виконання таких основних завдань:

для швидкої організації резервної мережі (каналів) радіозв'язку з наземними абонентами, забезпечення оперативного зв'язку у важкодоступній зоні (районі виконання бойового завдання), ретрансляція (маршрутизація) інформаційних потоків через БпЛА;

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.

Найбільш важливою перевагою літаючих мереж є здатність забезпечувати зв'язок в реальному часі без наявності будь-якої інфраструктури.

Для цих цілей в даний час зазвичай використовується комплекс, що складається з одного або декількох БпЛА, які передають відеодані з бортової камери на наземну станцію за прямим радіоканалом. Таке рішення має множини недоліків:

дорогі БпЛА покладаються на потужне радіоустаткування;

вони обмежені якістю радіоканалу і зарядом акумуляторною батареєю (запасом палива), що, в свою чергу, впливає на охоплення території і максимальний час виконання бойових завдань;

вони уразливі перед засобами РЕБ і можуть бути навмисно виведені з ладу.

У зв'язку з цим з недавнього часу світовим науковим співтовариством досліджується ідея використання для узгодженого виконання бойових завдань групи недорогих БпЛА. Такі вузли можуть використовувати 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.

Застосування самоорганізуючої мережі на БпЛА дозволяє:

істотно розширити територію виконання бойового завдання за рахунок передачі даних через проміжні вузли;

підвищити максимальну тривалість її проведення (аж до цілодобової) шляхом поетапної заміни вузлів з розрядженими акумуляторними батареями;

в умовах виведення з ладу одного або декількох БпЛА підвищити живучість мережі шляхом автоматичної реконфігурації топології мережі;

істотно знизити вартість технічних рішень.

Аналіз останніх публікацій. Аналізу літаючих самоорганізуючих мереж FANET (Flying Ad Hoc Network) присвячено значна кількість публікацій [1 – 12]. На відміну від мобільних радіомереж типу MANET (Mobile Ad Hoc Network) [13] і автомобільних радіомереж VANET (Vehicular Ad Hoc Network) вони представляють особливий вид самоорганізуючих радіомереж на основі безпілотних літальних апаратів.

Використання БпЛА дає не тільки безліч можливостей для надання нових послуг, але задає ряд проблем їх функціонування. Швидка зміна топології в просторі через високу мобільність вузлів, обмежені енергетичні можливості БпЛА накладають багато додаткових труднощів реалізації радіомережі на різних рівнях еталонної моделі взаємодії відкритих систем (EMBOC): фізичному, каналному, мережному, транспортному, прикладному рівнях.

Метою статті є розгляд різних аспектів побудови та невирішені завдання щодо організації функціонування мереж типу FANET.

Основний матеріал. Особливості FANET припускають необхідність вирішення низки додаткових наукових та інженерних задач в порівнянні з радіомережами типу MANET і VANET [1]. Порівняльна характеристика ad-hoc мереж представлена в табл. 1.

Порівняльна характеристика різних ad-hoc мереж

Таблиця 1

Характеристика	MANET	VANET	FANET
Мобільність, напрям переміщення вузлів	Відносно невисока швидкість переміщення (2 м/с) в випадком напрямі або групове переміщення абонентів в визначеному напрямі (для військових).	Висока швидкість переміщення: (20 – 30 м/с) по шосе, (6 – 10 м/с) в місті. Прогнозоване переміщення по дорогам місцевості (для військових)	Висока швидкість переміщення (0 – 100 м/с) в просторі, повітряні вузли координують свої дії та здійснюють переміщення згідно завдання (роева стратегія)
Топологія	Випадкова	“Зірка” у взаємодії з дорожньою інфраструктурою, випадкова між автомобілями або при переміщенні поза шляхами	“Зірка” з централізованим управлінням, випадкова при децентралізованому, типа меш при змішаному
Щільність розміщення вузлів	Низька	Висока	Дуже низька
Тип системи управління	Децентралізоване управління	Децентралізоване управління	Централізоване або децентралізоване
Зміна топології	Динамічна, непередбачувана, можливий розподіл мережі на підмережі	Більш динамічна ніж MANET, рух лінійний, можливий розподіл мережі на підмережі	Повільна або швидка, можливий розподіл мережі на підмережі, взаємодія координується вузлами
Збереження енергії батарей	Кожний вузол повинен економити енергоресурс батарей	Не потребує, вузол може використовувати окрему батарею або акумулятор машини	Малі БпЛА повинні економити ресурс батарей. Вага батарей впливає на характеристики БпЛА і час польоту.

Можливі варіанти призначення ЛМЗ, організації системи управління, топологія, типи БпЛА представлені на рис. 1.

ЛМЗ можуть бути побудовані на БпЛА різних типів, що відрізняються за своїми

характеристиками: маса, висота, швидкість і час польоту, вага корисного навантаження, тип силової установки, способи запуску і приземлення, радіус дії, режим управління, ціна, літакового або вертолітного типу та ін. Умовно БПЛА зазвичай поділяють на три великі категорії: дистанційні пілотовані апарати, автоматичні і гібридні. У свою чергу в цих категоріях поділяють мікро, міні, середні і важкі. Ставлення БПЛА до того чи іншого класу визначають по масі, дальності та висоті польоту, часу, яке апарат здатний провести в повітрі:

важкі – мають стелю до 20 км, можуть провести в повітрі без дозаправок більше 24 годин;

середні – мають масу до 1000 кг, здатні провести в повітрі 10 – 12 годин і піднятися на висоту до 9 – 10 км;

міні – 50 кг, кілька годин можуть провести в повітрі, стеля обмежена 3 – 5 км;

мікро – до 10 кг, близько години в повітрі та вище кілометра їм не піднятися.

Типи безпілотних літальних апаратів найчастіше досить відносно поняття. Особливо в наш час високих технологій. Найчастіше на ринку з'являються БПЛА, які не вписуються в наведену класифікацію.

ЛМЗ можуть бути призначені для організації мережі радіозв'язку, для опитування сенсорних полів або являти собою комбінацію даних функцій. Організація управління може бути реалізована централізованим, децентралізованим або змішаним способами. По можливості виконання завдань без управління з наземного центру управління (ЦУ) ЛМЗ можуть поділятися на автономні та неавтономні.

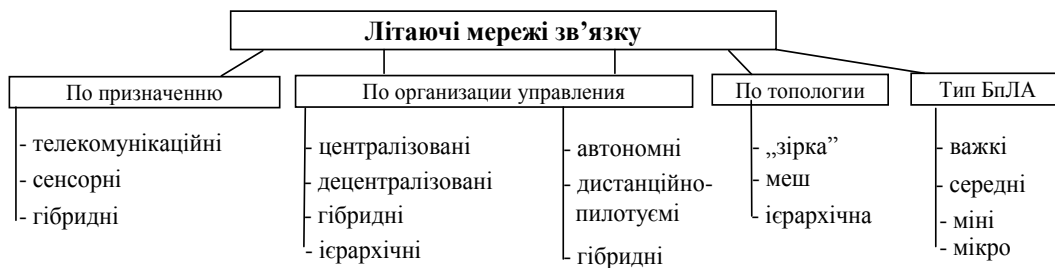


Рис. 1. Класифікація літаючих мереж

Можливі варіанти топології мережі показані на рис. 2:

типу „зірка” (з'єднання точка-точка, прямий зв'язок БПЛА з центром управління, вузли пов'язані між собою через наземний ЦУ – втрата взаємодії між вузлами при відмові ЦУ, налаштовується тільки канал БПЛА-ЦУ, легко масштабується);

меш (з'єднання багатоточка-багатоточка, хоча б один з вузлів пов'язаний з ЦУ, кожен вузол виконує функції маршрутизатора, режим ad-hoc між вузлами, зв'язність між вузлами не постійна);

ієрархічна – в кожній меш-мережі може формуватися головний вузол, який буде здійснювати функції управління в кожній підмережі.

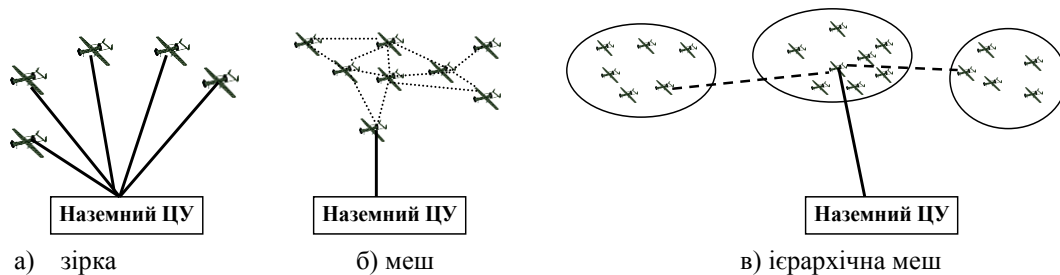


Рис. 2. Варіанти ЛМЗ топології

Розглянемо особливості функціонування ЛМЗ на кожному з рівнів ЕМ ВОС.

На фізичному рівні. Продуктивність мережі в значній мірі залежить від фізичного рівня еталонної моделі взаємодії відкритих систем (ЕМВОС), який має ряд особливостей в порівнянні з іншими типами бездротових мереж [5 – 7]: моделі поширення радіохвиль;

використання спрямованих антен; вплив відбиття від поверхні землі; необхідність усунення перешкод від бортового електронного обладнання БпЛА; вплив просторового положення БпЛА щодо Землі (тангаж, крен, нищпорення і т.д.) на якість радіоканалу; природні кліматичні умови (опади, хмарність та т.п.); необхідність застосування методів захисту від РЕБ і ін. Внаслідок дії зазначених факторів якість каналів радіозв'язку може сильно змінюватися.

Наприклад, на рис. 4. представлена топологія, де кожен відомий БпЛА ретранслює свої дані через головний БпЛА на наземну базову станцію. За результатами досліджень [5] було відзначено, що статистика помилок в бездротових каналах між БпЛА не є величиною постійною. Авторами була запропонована Марковська модель з двома станами для включення ефектів завмирання сигналів з розподілом Райса в залежності від зміни відстані між БпЛА. Результати моделювання показали, що запропонована модель здатна розрахувати величину втрат пакетів із змінним значенням помилок.

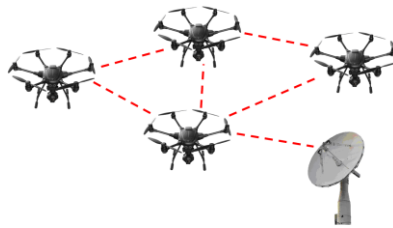
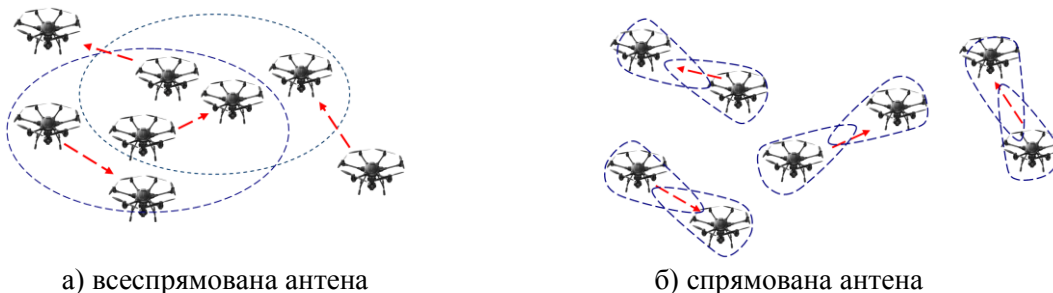


Рис. 4. Схема організації радіоканалів

В роботі [6] розглядається модель розповсюдження радіохвиль для FANET. Отримані результати узгоджуються з емпіричними даними, які отримані для мереж VANET. Запропонована модель оцінює потужність сигналу в умовах багатопроменевого поширення з урахуванням ефекту завмирання сигналу і представляється у вигляді функції двох параметрів: середнього значення потужності отриманого сигналу та інтенсивності завмирання.

Аналіз ефективності ретрансляції на основі мережі БпЛА був змодельований аналітично з урахуванням завмирання каналів [7]. Загальна аналітична формула була надана для ймовірності відключення зв'язку в сценаріях БпЛА-БпЛА і БпЛА-земля. Було відзначено, що модель завмирання каналу повинна бути обрана відповідно до умов експлуатації. Наприклад, релеєвське завмирання є більш придатним для застосування на малих висотах і в людних місцях, m -розподіл Накатами і розподіл Вейбулла краще підходять для космічних польотів на великих висотах.

Відстань між БпЛА, як правило, більше, ніж для вузлів в мережах MANET і VANET, а це безпосередньо впливає на конструкцію антени. Існують два основних типи антен, які використовуються в FANET: спрямованої і всеспрямованої дії. Всеспрямовані антени мають природну перевагу в умовах частой зміни місця розташування вузлів, тому що не вимагають знання інформації про місцезнаходження вузла, але більш уразливі від впливу навмисних перешкод. Однак спрямовані антени мають велику дальність передачі (що зменшує кількість переприйомів в маршруті передачі і дозволяє збільшити продуктивність мережі і зменшити затримку передачі), менші взаємні перешкоди і менше енергоспоживання (рис. 5).



а) всеспрямована антена

б) спрямована антена

Рис. 5. Фізична перевага використання спрямованих антен

Незважаючи на те, що вузли мережі розташовані в 3D-просторі, більшість існуючих досліджень використовують 2D-структуру топології FANET. Як показали дослідження, поведінка антени в 3D-просторі може відрізнитися від поведінки в 2D, а це може безпосередньо вплинути на фізичний рівень. Аналіз продуктивності існуючих протоколів фізичного рівня і розробки нових моделей фізичного рівня для 3D-простору багато в чому залишаються невивченими питаннями для мереж FANET [8].

Основною проблемою використання спрямованої антени в ЛСС є наявність помилок в роботі системи позиціонування БПЛА, впливу вітру і інших природних явищ, що призводять до складності підтримки діаграми спрямованості в потрібному напрямку.

Канальний рівень. Канальний рівень, точніше його MAC-підрівень, є дуже важливим для роботи радіомереж з комутацією пакетів і забезпечує адресацію і механізми управління доступом до каналів. Так як FANET є підмножиною MANET і VANET, то тому перші ЛСС використовували протокол IEEE 802.11 з всеспрямованими антенами.

Велика частина робіт по адаптації 802.11 MAC рівня ґрунтується на механізмі розподіленої координаті при доступі до середовища, який включає процедуру відправки RTS/CTS/DATA/ACK пакетів. Для зменшення ймовірності колізій на прийомних вузлах, всі вузли, які отримали RTS/CTS повідомлення, використовують NAV (Network Allocation Vector, вектор мережевого розміщення) для відстрочки своєї передачі. У протоколах з використанням спрямованих антен вектор мережевого розміщення розширюється для того, щоб відкладати передачу тільки в певному напрямку. Таким чином, зберігається можливість передачі інформації в «незайнятих» напрямках.

Запропоновані на сьогодні методи використовують алгоритми управління потужністю для зменшення інтерференції на вузлах, які знаходяться далі вузла призначення.

Наприклад, в [8] для обміну інформацією про рівень сигналу і шуму між відправником і отримувачем використовуються RTS/CTS повідомлення. Дані повідомлення відправляються з максимальною потужністю передавача. Вузол призначення обчислює відношення сигнал/шум і відправляє обчислене значення в CTS повідомленні. Передавач потім коригує потужність передачі, і пакети з даними вже передаються зі зменшеною потужністю.

В іншому методі в RTS повідомленнях міститься потужність передавача і граничне значення сигналу, яке може розпізнати приймач.

Протокол LODMAC (Location Oriented Directional MAC protocol for FANET) забезпечує як ефективний спосіб використання передачі даних за допомогою спрямованих антен, так і метод визначення і поширення даних про точне місцезнаходження вузлів [9]. У цьому випадку передбачається, що кожен БПЛА в FANET обладнаний двома приймачами. Один приймач застосовується для оцінки місця розташування і відповідає за управління обміном пакетів, а другий застосовується тільки для передачі даних. В якості спрямованої антени пропонується використовувати антену з комутованим променем, в якій кожен з променів займає досить вузький кут сектору. Значення кута головного променя робить істотний вплив на максимальну кількість активних БПЛА. Крім цього, при вузьких кутах можливе встановлення більшої кількості одночасних з'єднань.

На якість каналу зв'язку сильно впливає висока мобільність вузлів і значна різниця відстаней між вузлами. Внаслідок цього можливі затримки при передачі пакетів – це ще одна з проблем MAC-рівня в FANET, що особливо критично для додатків реального часу.

Мережевий рівень. Перші мережі FANET були розроблені на основі існуючих протоколів маршрутизації для MANET, які за способом побудови і підтримки маршрутів поділяються на три класи: таблично-орієнтовані (проактивні), зондові (реактивні) і гібридні [12, 13].

Проактивні протоколи маршрутизації заздалегідь будують маршрути між усіма вузлами мережі і підтримують на кожному вузлі актуальну таблицю маршрутизації. Для даних методів відомі два підходи для обчислення найкоротшого шляху в мережі (в залежності від того, якою інформацією володіє вузол про стан мережі).

1. Кожен вузол мережі володіє повною інформацією про стан мережі (клас „Link-State”). У цьому випадку кожен вузол використовує централізований алгоритм пошуку найкоротшого шляху Дійкстри (в Інтернеті протокол OSPF). Способи реалізації його функцій: розсилка маршрутною інформації – хвильова, охоплення мережі – глобальне, тип – за подіями та періодична; маршрутна таблиця розміру N^2 (де N – число вузлів) зберігається в кожному вузлі; ретрансляція пакетів – послідовна. Недоліки: високі вимоги до апаратних ресурсів, вимагає початкової синхронізації, наявність HELLO-пакетів, значний службовий трафік та ін. Для MANET запропонована його модифікація – метод OLSR (Optimized Link State Routing). Його основна відмінність – скорочення кількості передач при розсилці маршрутних повідомлень за рахунок зменшення числа вузлів, які її здійснюють. Недоліки: значний службовий трафік при високій динаміці топології мережі, висока обчислювальна складність при використанні декількох метрик для вибору маршруту з ростом розмірності мережі та ін.

2. Кожен вузол мережі має локальну інформацію про стан мережі (клас „Distance-Vector”). Даний клас методів реалізований на основі розподіленої версії алгоритму Беллмана-Форда – в Інтернеті протокол RIP. Представниками даного класу методів для MANET є: DSDV (Destination Sequenced Відстань Vector), WRP (Wireless Routing Protocol), ADV (Adaptive Distance Vector Routing) та ін. Дані методи передбачають ведення кожним вузлом однієї або декількох таблиць, що зберігають інформацію про маршрути доставки інформації по будь-якому адресату мережі. Кожен маршрут зберігається у вигляді окремого входу: адресат, сусідній вузол в найкоротший маршрут передачі до адресата і вартість маршруту. Вартість маршруту складається з суми метрик кожного каналу. В якості метрики зазвичай використовується число ретрансляційних ділянок, але можуть бути затримка доставки пакетів, якість каналу та інші.

Кожен вузол періодично і по подіям розсилає маршрутні повідомлення, що містять змінені входи маршрутних таблиць, своїм сусідам. Приймавши маршрутне повідомлення, вузол модифікує свої входи маршрутних таблиць. Після коригування маршрутних таблиць вузол розсилає маршрутні повідомлення своїм сусідам.

Алгоритм вимагає значної кількості ітерацій для збіжності, викликає зациклення маршрутів, в деяких ситуаціях генерує значну кількість маршрутних повідомлень.

Одним з перших проактивних протоколів був протокол DSDV. Його головною особливістю є виключення зациклення маршрутів за рахунок їх нумерації. DSDV виявився неефективний у великих мережах, де швидко змінюється топологія.

WRP вирішує проблему „кінцевого рахунку” на основі підтримки в таблицях інформації про вузол, що передує адресату в маршруті передачі. Особливості ADV – підтримуються маршрути тільки до активних вузлів, частота і обсяг маршрутною інформації адаптуються до умов функціонування мережі.

В цілому проактивні протоколи маршрутизації забезпечують мінімальну затримку доставки пакетів даних, а при зміні топології мережі ініціюють розсилку повідомлень про ці зміни, але вимагають постійного обміну службовою інформацією (тобто не можуть забезпечити режим радіомовчання). Через високу рухливості вузлів в ЛМЗ підтримка таблиць маршрутизації проактивними протоколами не є оптимальним.

Зондові методи маршрутизації: DSR (Dynamic Source Routing), AODV (Ad Hoc On-Demand Distance Vector), TORA (Temporally Ordered Routing Algorithm), ABR (Associativity-Based Routing), SSR (Signal Stability Routing) та інші [12, 13]. Основна відмінність зондових методів маршрутизації від проактивних – вузли будують маршрути в міру необхідності шляхом розсилки по мережі спеціальних пакетів (зондов-запитів) і збору зондів-відповідей, що містять інформацію про можливі маршрути передачі інформації. Зондова маршрутизація передбачає два основних етапи функціонування: створення маршруту і його підтримка в актуальному стані (рис. 6).

1. Створення маршруту. Відправник (1 вузол), не маючи маршруту до адресата і бажаючи передати йому пакет (8 вузлу), ширококомовно передає зонд-запит, який містить

ідентифікатори відправника і адресата (рис. 6). Вузол, який прийняв зонд-запит, перевіряє наявність запитуваного маршруту до адресата. При його відсутності він додає свій ідентифікатор (метод DSR) або змінює „ідентифікатор наступного вузла в шляху до адресата” (метод AODV) в поле зонда-запиту і передає його далі своїм сусідам. Інакше (або при досягненні зондом-запитом адресата) – відправнику надсилається зонд-відповідь із зазначенням найкоротшого маршруту у вигляді послідовності вузлів (DSR) або ідентифікатора наступного вузла передачі (метод AODV). Відправник, отримавши зонд-відповідь, поміщає маршрут в свій кеш (DSR) або таблицю (AODV). Проміжні вузли, що обробляють зонди, зберігають отримані маршрути для адресата і відправника (відбувається процес навчання маршрутами).

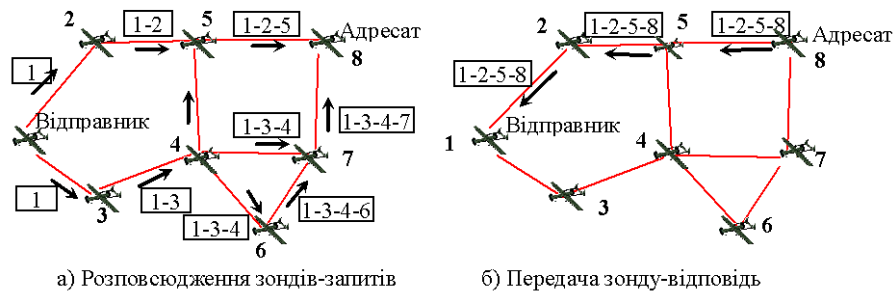


Рис. 6. Етап створення маршруту (метод DSR)

2. Підтримка маршруту може здійснюватися двома способами: активним і пасивним. У першому випадку, якщо проміжний вузол k виявив відмову каналу (який є складовою частиною маршруту для i -го вузла), то він посилає зонд-відмову вузлу i . При отриманні відправником зонда-відмови ініціюється створення нового маршруту. У другому випадку, вузол може прослуховувати наявність ретрансляцій сусідом і здійснювати пасивний контроль наявності маршруту на відстані однієї ретрансляційної ділянки.

AODV зберігає маршрутну інформацію у вигляді таблиць і періодично обмінюється з сусідами HELLO-повідомленнями. Формат зондів включає поле „наступний ідентифікатор на шляху до адресата”. Недолік: наявність постійного службового трафіка.

TORA – кожен вузол будує ваговий спрямований ациклічний граф з коренем у вузлі-відправнику та тупикової вершиною в вузлі-адресаті. Функціонування методу включає три етапи: створення маршруту, його підтримку і знищення. Перевага: забезпечення декількох маршрутів доставки інформації до адресата; недоліки. Необхідність тимчасової синхронізації вузлів, можливі тимчасові „коливання маршрутів” та ін.

ABR в якості метрики вибору маршрутів використовує стабільність радіоканалу, що визначається числом прийнятих за певний час сигналів „присутності” сусідів. Переваги: вибір більш стабільних маршрутів призводить до меншого числа перебудов маршрутів. Недоліки: вибрані маршрути не є найкоротшими, необхідність постійної передачі сигналу „присутності”.

SSR обирає маршрут, використовуючи часовий і енергетичний параметри: тривалість існування каналу і потужність сигналу. Кожен вузол містить сигнальну і маршрутну таблиці. Перевага: вибирає більш стабільні маршрути. Недоліки: проміжні вузли не можуть повідомити відправнику про наявний маршрут до адресата, що призводить до значної затримки при побудові маршруту; не завжди вибираються найкоротші маршрути.

Переваги зондових в порівнянні з проактивними методами маршрутизації: побудова маршруту по мірі необхідності, можливість будувати кілька маршрутів до адресата, з заданою якістю, недолік – затримка в часі для його побудови або відновлення.

Гібридні методи маршрутизації ZRP (Zone Routing Protocol), HWMP (Hybrid Wireless Mesh Protocol) [10, 12, 13] та ін. передбачають виділення кожним вузлом маршрутної зони, яка визначена числом ретрансляцій. Побудова і підтримка маршрутів до адресатів, які перебувають всередині маршрутної зони, здійснюється проактивним способом (періодична корегування маршрутних таблиць), а за її межами – зондовим методом (за потребою).

Перевага гібридних методів – це зменшення службового трафіку за рахунок адаптації розмірів маршрутної зони до ситуації на мережі, застосування хвильових алгоритмів для локальної розсилки маршрутної інформації всередині маршрутної зони.

В окрему групу можна виділити координатні методи маршрутизації, що використовують дані про місцезнаходження абонентів мережі [12, 13]. Координатні методи маршрутизації в основному задовольняють основним вимогам ЛМЗ і показують кращі результати при їх використанні для ЛМЗ, особливо в мережах з високою щільністю вузлів.

Таким чином, маршрутизація є однією з найбільш складних проблем для ЛМЗ. Існуючі рішення не можуть задовольнити всіх вимог ЛМЗ. Таким чином, залишається актуальним напрямком по розробці протоколів маршрутизації для конкретних ЛМЗ.

Транспортний рівень.

Основні функції транспортного протоколу для FANET полягають в наступному:

підтримка різних рівнів надійності передачі даних в залежності від використовуваних додатків в FANET;

реалізація механізму управління перевантаженням. Типовими наслідками перевантаження мережі є зниження коефіцієнта доставлених пакетів і збільшення затримки (наприклад, при перевантаженні мережі не забезпечується захист від зіткнень між БпЛА);

управління потоками передачі даних, особливо для неоднорідних мульті-БпЛА.

Перші транспортні системи FANET були реалізовані на основі існуючих протоколів TCP і UDP. В [11] моделюються перевантаження в ЛМЗ і показується невисока ефективність TCP в ЛМЗ. Тому створення нових ефективних протоколів транспортного рівня залишається невирішеним завданням.

На прикладному рівні для ефективної роботи ЛМЗ необхідно вирішувати наступні завдання управління: якістю обслуговування при передачі різних типів трафіку, витратою енергії батарей, топологією, цільовими функціями і т.д.

Забезпечення якості обслуговування передачі даних (QoS). Завдання підвищення якості передачі даних в самоорганізуючих мережах мобільних пристроїв може бути вирішена вдосконаленням різних методів передачі на різних рівнях EMBOS:

метод корекції помилок передачі за допомогою повторного запиту на каналному і управлінням темпу передачі на транспортному рівнях;

перешкодозахисного методу кодування (FEC),

метод мережевого кодування (Coding Network).

методів маршрутизації: використання методів багатоколінійної маршрутизації, вибором відповідної QoS метрики вибору маршруту, застосуванням координатної маршрутизації.

метод накладених мереж (P2P) на прикладному та ін.

Проблема мінімізації витрат енергії батарей. Можливі два сценарії підключення зв'язкового обладнання: від обладнання самого БпЛА (що в свою чергу зменшує час польоту і „час життя мережі”) і/або своєї батареї [1, 14]. Важливу роль в збереженні енергії грають співвідношення режимів роботи. Так для різних режимів передача/прийм/бездіяльність/сплячий для протоколу IEEE 802.11 (без MIMO) величина струму дорівнює 1280/940/820/100 мА, відповідно.

В роботі [1] проводяться найпростіші розрахунки часу життя мережі при різних варіантах використання батарей і аналізуються рішення щодо зменшення витрат енергії батарей на різних рівнях EMBOS.

На фізичному рівні – зменшення вузлом потужності передачі.

На каналному – наприклад, в протоколі IEEE 802.11 реалізований режим збереження енергії PSM (режим енергозбереження), в протоколі IEEE 802.11n – режим APSD (режим економії енергії), найпростіший протокол S-MAC (Sensor-Medium Access Control) – головний вузол в кластері планує часи роботи і сну, протокол, PAMAS (Power-aware Multi Access Protocol with Signaling) – прослуховуючи канал сигналізації, вузли, які не задіяні на передачу, вимикаються на цей час та ін.

На мережевому рівні можна використовувати протоколи EMM-DSR (Extended Max-

Min Dynamic Source Potring), Min Energy, Pulse, Power Aware і ін), які здійснюють побудову маршрутів з енергозалежними метриками: мінімальна потужність передачі вузла, максимальна ємність батареї, згортки цих параметрів; також не включають в маршрут вузли, що мають критичний рівень енергії тощо.;

На прикладному – при виборі головних вузлів кластерів вузлів з максимальної енергією батарей (SPAN), для мінімізації хвильового (потокowego) трафіка (CBRP): організація режиму сну, побудова енергоефективності топології тощо.

Крім цього для досягнення більшого ефекту може застосовуватися інтеграція рівнів EMBOC (крос-рівня) – реалізація методів зменшення витрат енергії в координації з усіма рівнями EMBOC [14].

Проблема побудови топології ЛМЗ з урахуванням топології наземних мереж. В залежності від основного критерію ефективності розрізняють наступні варіанти постановки завдань синтезу топології ЛМЗ [15] рис. 7:

за критерієм мінімуму використання апаратного ресурсу – знайти зв'язну топологію з мінімальною кількістю БпЛА при заданих обмеженнях (в якості обмежень можуть виступати пропускна здатність, час передачі пакетів тощо);

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

за критерієм часу – знайти зв'язну топологію мережі, що забезпечує мінімізацію максимальної затримки передачі повідомлень у мережі при заданих обмеженнях.



Рис. 7. Класифікація задач синтезу топології БпЛА

Важливою особливістю завдань управління є динамічний характер БпЛА. Тому доцільно розглядати її як систему, що розвивається, – побудова мережі представляється багатоетапним процесом її розвитку з деякої початкової топології в кінцеву. Звідси впливає постановка задачі динамічного програмування: задана загальна кількість БпЛА на операцію. Потрібно розподілити їх за етапами (в загальному їх кількість невідома) таким чином, щоб забезпечити оптимум прийнятого критерію ефективності.

Показниками оцінки ефективності результату процесу управління БпЛА можуть бути ступінь досягнення та час виконання i -й задачі (мети) управління.

Необхідно відзначити, що синтез топології мереж великої розмірності наштовхується на ряд труднощів, пов'язаних з великою розмірністю мережі, багатоекстремальністю розв'язуваної 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 мережі цілей, вершинами якого позначені цілями, а дуги відображають вплив досягнення підцілі (часткові задачі управління) у ціль (основна задача). Рішення перерахованих часткових задач, у сукупності складає загальну задачу синтезу, та здійснюється, як правило, з використанням наближених евристичних методів.

Проблема визначення і координації цілей управління ЛМЗ. Визначимо особливості задач управління тактичними радіомережами з БпЛА [16]:

реалізуються на різних етапах управління мережею (планування, розгортання або відновлення оперативного управління);

мають окремі функціональні призначення: переміщення БпЛА (управління маршрутом руху, координація польоту групи БпЛА, визначення району баражування тощо), покриття мережі (зони, пріоритетної групи абонентів, сенсорного поля, окремих сенсорів тощо), передачі даних (можуть бути реалізовані різними функціональними підсистемами – управління маршрутизацією, управління топологією, управління навантаженням, тощо);

різні об'єкти впливу (вся мобільна компонента, окрема мережа мобільної компоненти, її зона, напрямок передачі інформації, маршрут, канал, наземний вузол, безпосередньо БпЛА);

різні цільові функції, можуть заперечувати одна одній;

різняються математичною постановкою цільових функцій (чітка або нечітка, задачі масового обслуговування, маршрутні, тощо);

мають високу розмірність та динамічний характер;

важкість формування повної системи показників оцінки ефективності;

неповнота та часто недостовірність контрольної інформації про стан мережі та її елементів;

більшість з них залежать одне від одної;

вимагають узгодження та координації (в вузлах, маршрутах, зонах, в масштабах всієї мережі);

можуть бути реалізовані на різних рівнях еталонної моделі ЕМВОС.

В умовах змішаного управління (частка функцій виконується централізовано центрами управління мереж, а друга децентралізовано – вузлами) можна визначити дві взаємозалежні групи цілей:

мережеві (зонові) – оптимізація мережевих або зонних показників ефективності;

користувальницькі – досягнення заданої якості передачі між абонентами та функціонування елементів мережі за напрямком передачі.

До мережевих (зонних) цілей управління можна віднести оптимум наступних параметрів $C_i = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$:

C_1 – продуктивність всієї мережі, рівнів або зони мережі, БпЛА;

C_2 – потужність передачі вузлів мережі, її зони;

C_3 – ступінь покриття території (абонентів, сенсорів) мережа БпЛА;

C_4 – структурна надійність (зв'язність) мережі, її зони;

C_5 – кількість ресурсів (вузлів, мобільних базових станцій, аероплатформ, тощо), які необхідно задіяти до досягнення певної мети;

C_6 – час функціонування мережі, її зони, безпосередньо БпЛА;

C_7 – обсяги службового трафіка;

C_8 – годину планування, розгортання, відновлення мережі, її зони;

C_9 – параметри безпеки й т.д.

В [16] пропонується новий підхід – на етапі управління мережею цільові функції управління не є статичними, а визначаються в часі в залежності від етапів і функцій управління, а також параметрів стану об'єкта (об'єктів) управління (вузол, радіоканал, маршрут, зона, мережа) та наявних ресурсів.

Висновок. Таким чином літаючі мережі зв'язку найближчим часом знайдуть широке застосування в різних сферах діяльності. Організація роботи в мережі для групи БпЛА є однією з найскладніших завдань. Їх особливістю є висока мобільність вузлів, обмежений енергетичний ресурс, необхідність передачі різних типів трафіку. У статті розглянуті особливості побудови і функціонування, і можливі методи управління ЛМЗ на різних рівнях ЕМВОС. Представлений короткий огляд існуючих методів (протоколів) фізичного, каналного, мережевого, транспортного і прикладного рівнів. Показано, що існуючі методи (протоколи), розроблені для мереж MANET і VANET неефективні в FANET.

Напрямами подальших досліджень є розробка нових протоколів і алгоритмів FANET-мереж для різних рівнів еталонної моделі взаємодії відкритих систем та з метою підвищення ефективності передачі даних.

ЛІТЕРАТУРА

1. Gupta L. Survey of Important Issues in UAV Communication Networks / Lav Gupta, Raj Jain, Gabor Vaszkun // IEEE Communications Surveys and Tutorials, Volume PP, November 2015.
 2. Кучерявый А.Е. Летающие сенсорные сети / А.Е. Кучерявый, А.Г. Владыко, Р.В. Киричек, А.И. Парамонов, А.В. Прокопьев, И.А. Богданов, А.А. Дорт-Гольц // Электросвязь. – 2014. – № 9. – С. 2 – 5.
 3. Кучерявый А. Е. Теоретические и практические направления исследований в области летающих сенсорных сетей / А.Е. Кучерявый, А.Г. Владыко, Р. В. Киричек // Электросвязь, 2015. – № 7. – С. 9 – 11.
 4. Леонов А.В. Сети FANET / А.В. Леонов, В.А. Чаплышкин // Омский научный вестник № 3 (143). – 2015. – С. 297 – 301.
 5. Zhou Y. Modeling of packet dropout for UAV wireless communications / Y. Zhou, J. Li, L. Lamont, C. Rabbath // International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC), 2012, pp. 677 – 682.
 6. Abualhaol I. Y. Performance analysis of cooperative multi-carrier relay-based UAV networks over generalized fading channels / I. Y. Abualhaol, M. M. Matalgah // International Journal of Communication Systems, 2011, Vol. 24, № 8, pp. 1049 – 1064.
 7. Kung H. T. Measuring diversity on a low-altitude UAV in a ground-to-air wireless 802.11 mesh network / H. T. Kung, C.-K. Lin, T.-H. Lin, S. J. Tarsa, D. Vlah // IEEE Globecom Workshops, 2010, pp. 1799 – 1804.
 8. Alshbatat Abdel I. Adaptive MAC Protocol for UAV Communication Networks Using Directional Antennas / Abdel Ilah Alshbatat, Liang Dong // Networking, Sensing and Control (ICNSC), 2010 International Conference.
 9. Samil T. LODMAC: Location Oriented Directional MAC protocol for FANETs / T. Samil, B. Ilker // Computer Networks, 2015, Vol. 83, № 4, pp. 76–84.
 10. Tareque Md. On the Routing in Flying Ad hoc Networks/ Md. Tareque H., Md. Hossain S. // Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS), 2015, pp. 1 – 9.
 11. Jun Peng Performance of TCP Congestion Control in UAV Networks of Varies Radio Propagation Models / Peng Jun // International Journal of Computer Networks & Communications (IJNC), Vol. 8, No. 2, March 2016.
 12. Бунин С.Г. Самоорганизующиеся радиосети со сверхширокополосными сигналами / С.Г. Бунин, А.П. Войтер, М.Е. Ильченко, В.А. Романюк. – К.: НПП „Издательство „Наукова думка” НАН Украины”. – 444 с.: ил.
 13. Миночкин А.И. Маршрутизация в мобильных радиосетях – проблема и пути решения / А.И. Миночкин, В.А. Романюк // Зв’язок. – 2006. – № 7. – С. 49 – 55.
 14. Миночкин А.И. Управление энергоресурсом мобильных радиосетей / А.И. Миночкин, В.А. Романюк // Зв’язок. – 2004. – № 8. – С. 50 – 53.
 15. 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.
- 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.