

ЗАДАЧІ УПРАВЛІННЯ ЗБОРОМ ДАНИХ МОНІТОРИНГУ БПЛА В БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ

Розглядаються задачі визначення параметрів польоту БПЛА та кластеризації безпроводової сенсорної мережі при використанні БПЛА як повітряного шлюзу. Визначені цільові функції управління мережею. Представлена аналітична модель розрахунку витрат енергії батареї вузлом мережі та алгоритм визначення кількості кластерів в мережі.

Романюк А.В. Задачі управління сбором данных мониторинга БПЛА в беспроводных сенсорных сетях. Рассмотрены задачи определение параметров полета БПЛА и кластеризации беспроводной сенсорной сети при использовании БПЛА в качестве воздушного шлюза. Определены целевые функции управления сетью. Представлена аналитическая модель расчета расхода энергии батареи узлом сети и алгоритм нахождения необходимого количества кластеров сети.

A. Romaniuk The UAV monitoring data collection management tasks in wireless sensor networks. The tasks of determining the parameters of the flight UAV and clustering of the wireless sensor network are considered in delay tolerant networks. The target network management features are defined. The analytical model of calculating the energy consumption of the battery by the network node and the algorithm for finding the number of network clusters is presented.

Ключові слова: *сбір даних моніторингу, безпроводові сенсорні мережі з БПЛА, кластеризація.*

Постановка завдання в загальному вигляді. Сучасні технології безпроводових сенсорних мереж стають популярними в різних областях цивільного і військового застосування [1]. Безпроводові сенсорні мережі (БСМ) складаються з сукупності зв'язних сенсорних вузлів, побудованих за принципом самоорганізації [2]. Сенсорні вузли здійснюють моніторинг певних параметрів зовнішнього середовища заданої території. Наприклад, БСМ можуть використовуватися для спостереження за лісовими масивами, полями сільськогосподарського призначення, кордонами, для здійснення екологічного та метеорологічного моніторингу, пошуково-рятувальних місій, у військових цілях тощо. У багатьох випадках сенсорні вузли повинні бути розгорнуті на поверхні землі (води) у віддалених (важкодоступних або недоступних районах) в умовах відсутності телекомунікаційної інфраструктури. В таких умовах для збору даних моніторингу від сенсорних вузлів доцільне використання БПЛА в якості повітряних вузлів-шлюзів. При цьому розрізняють два способи побудови мереж.

1. БСМ з затримкою отримання даних моніторингу (Delay Tolerant Networks, DTN). Сенсорні вузли здійснюють моніторинг середовища, зберігають отримані дані і чекають можливості їх передачі на БПЛА при появі його в зоні радіозв'язку. БПЛА облітає за певним маршрутом територію моніторингу, встановлює зв'язок з сенсорними вузлами, збирає від них дані моніторингу, зберігає і по поверненню в вихідну (задану) точку польоту передає їх в центр обробки даних.

2. БСМ реального часу. У цих мережах БПЛА постійно підтримує радіозв'язок з сенсорними вузлами, приймає від них дані моніторингу і передає їх на базову станцію (при її відсутності радіозв'язку з базовою станцією через мережу БПЛА) і далі в центр збору даних для їх подальшого аналізу.

Характерними особливостями БСМ є значна розмірність (сотні, тисячі вузлів), обмеженість ресурсів вузлів (енергія батареї, продуктивність процесора, обсяг пам'яті, потужність передавача, пропускна спроможність радіоканалу) тощо. Мережа може бути призначена для роботи протягом декількох місяців або навіть років в важкодоступних районах. При цьому заміна батарей вузлів мережі може бути непрактичною або навіть не можливою. Отже, управління споживанням енергії сенсорними вузлами (зменшення, перерозподіл між вузлами) має вирішальне значення для збільшення часу їх функціонування.

При зборі інформації моніторингу з використанням БпЛА необхідно вирішувати ряд оптимізаційних задач: мінімізація часу збору БпЛА даних моніторингу, підвищення часу функціонування БСМ, мінімізація ресурсу БпЛА тощо, що є актуальною науковою задачею.

Аналіз останніх публікацій. До теперішнього часу проведено значну кількість досліджень щодо вирішення низки часткових завдань з управління мережами з використанням БпЛА: алгоритми кластеризації мережі [4], способи побудови маршрутів обльоту кластерів [5 – 9], алгоритми маршрутизації [2] та інші, які орієнтовані на конкретні параметри та умови функціонування БСМ.

Більшість запропонованих алгоритмів кластеризації: LEACH, HEED, PEGASIS, TEEN, APTEEN та інші [4] розглядаються у відриві від особливостей і обмежень, що накладаються використанням БпЛА. Крім цього не враховувалося необхідність врахування багатокритеріального управління мережею. Метрики вибору головних вузлів кластерів не враховують цільові функції управління вузлами. У роботах [5 – 9] розглядаються способи побудови параметрів (маршрутів) обльоту сенсорних мереж БпЛА. Однак вони також не враховують необхідність реалізації різних цільових функцій управління мережею.

Тому **метою статті** є аналіз завдань управління процесом збору даних моніторингу з використанням БпЛА (мережі DTN), побудови їх математичних моделей в залежності від різних цільових функцій управління мережею і наявних ресурсів.

Виклад основного матеріалу.

Способи збору інформації

Існує два основні підходи збору інформації з вузлів з використанням БпЛА в якості мобільного шлюзу в БСМ [10].

1) *Прямий збір БпЛА інформації моніторингу з кожного вузла мережі.* В цьому випадку БпЛА облітає сенсорне поле за розрахованим маршрутом і збирає дані з кожного сенсорного вузла, що зберігає дані моніторингу.

Переваги даного способу: мала витрата енергії сенсорного вузла на передачу при незначній відстані між ним та БпЛА, мала затримка передачі даних (одна ретрансляція). Недоліки: значне збільшення маршруту і часу польоту БпЛА (і відповідно підвищення вимог до його параметрів) і значне збільшення час збору інформації моніторингу. Даний спосіб може використовуватися при первісному обльоті території, на якій розгорнута БСМ, при невідомій інформації про топологію мережі та стан вузлів. В цьому випадку маршрут польоту будується з метою покриття всієї території спостереження (рис. 1). В процесі обльоту БпЛА збирає як інформацію моніторингу, так інформацію про стан мережі (стан вузлів і кластерів) для подальшого планування завдань управління.

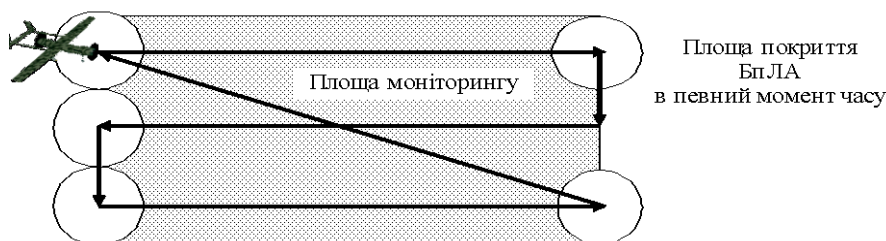


Рис. 1. Варіант маршруту обльоту площі моніторингу

2) *Збір БпЛА інформації моніторингу з виділених вузлів-рандеву* (рис. 2). При цьому способі мережа розбивається на кластери з виділенням вузлів-рандеву (ВР). У кластерах будуються маршрути передачі даних від вузлів-моніторингу до вузлів рандеву, які збирають і зберігають дані моніторингу свого кластера мережі до підльоту БпЛА. Далі БпЛА або центр управління мережею будує маршрут обльоту і збору даних тільки з вузлів-рандеву.

Переваги: зменшення часу польоту (скорочення часу збору інформації моніторингу), необхідно менше число БпЛА. Недоліки: необхідність реалізувати додаткові алгоритми управління мережею, реалізація яких потребує додаткового службового трафіка:

– розбиття мережі на кластери (повинна бути проведена оптимізація кількості та розмірів кластерів в залежності від різних цільових функцій, наприклад, мінімізувати витрату енергії вузлів в процесі передачі від вузлів-моніторингу до вузла-рандеву, мінімізувати час доставки від вузла-моніторингу до вузла-рандеву тощо);

– вибір вузлів-рандеву в кластерах за певними параметрами в залежності від цільових функцій управління мережею і ситуації на мережі;

– організація процесу маршрутизації збору даних до вузлів-рандеву (спосіб і метрики маршрутизації);

– побудова, оптимізація та коректування шляху обльоту БПЛА вузлів-рандеву.

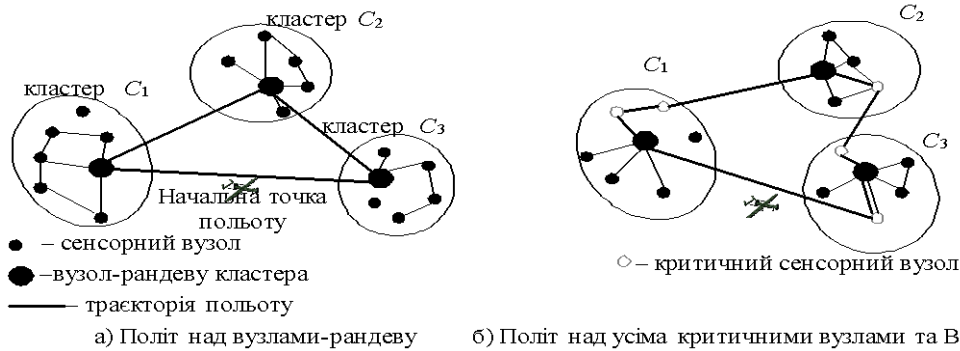


Рис. 2. Можливі стратегії обльоту кластерів БПЛА

Цільові функції управління БСМ

Цільовими функціями управління всією мережею можуть бути:

1. Мінімізація (обмеження) часу збору $T_{зб}$ інформації моніторингу – за мінімальний (обмежений) час польоту (одне коло обльоту) зібрати дані моніторингу від всіх (виділених) сенсорних вузлів при обмеженні на кількість БПЛА $N_{БПЛА} \leq N_{БПЛАзад}$, заданий обсяг даних моніторингу $V_{дм} \geq V_{дмзад}$ і час функціонування мережі $T_{ф} \leq T_{фзад}$:

$$T_{зб} \rightarrow \min \text{ або} \quad (1)$$

$$T_{зб} \leq T_{збзад} \quad (2)$$

Час збору залежить від характеристик БПЛА (тривалість, швидкість і висота польоту, параметри радіообладнання і ін.), довжини маршруту, висоти польоту тощо. Довжина маршруту залежить від кількості вузлів збору інформації (кількості кластерів), їх розміщення, способу вибору вузлів-рандеву і стратегії обльоту кластера. Зі збільшенням висоти польоту збільшується зона покриття та з'являється можливість встановлення радіозв'язку з більшою кількістю вузлів. Однак граничне збільшення дальності радіозв'язку обмежено малою потужністю передавачів вузлів. При цьому швидкість передачі даних залежить від відстані. Час обміну повинен не перевищувати часу наявності радіозв'язку між БПЛА і вузлом.

Є певний оптимум кількості кластерів $n_{кл}$ (розмірність, діаметр), що визначає компроміс між часом обльоту БПЛА і часом функціонування мережі.

2. Максимізація часу функціонування сенсорної мережі – $T_{ф}$.

$$T_{ф} \rightarrow \max \text{ або} \quad (3)$$

$$T_{ф} \geq T_{фзад}, \quad (4)$$

$$T_{зб} \leq T_{збзад}, V_{дм} \geq V_{дмзад}, N_{БПЛА} \leq N_{БПЛАзад},$$

при обмеженнях на задані: час $T_{зб}$, обсяги $V_{дм}$ збору даних моніторингу (ДМ) і кількість БПЛА $N_{БПЛА}$. Поняття „час функціонування” $T_{ф}$ може трактуватися різними способами і буде визначатися користувачем мережі як [11]:

– час роботи мережі до виходу з ладу першого вузла через витрату енергії його батареї (так званий період стабільної роботи мережі);

– час роботи мережі до виходу з ладу k -критичних вузлів мережі, що визначають функціонал мережі;

– час роботи мережі до виходу з ладу всіх вузлів.

Вже згадана мета може реалізовуватися різними способами (методами) за рахунок зменшення витрат (перерозподілу) енергії батареї вузлів на різних рівнях еталонної моделі взаємодії відкритих систем. Наприклад, за рахунок:

– зменшення відстані між сенсорним вузлом і БпЛА (підліт БпЛА на найближчу відстань до вузла), регулюванням рівня передачі на мінімальному рівні (фізичний рівень). Однак в цьому випадку буде потрібний обліт значної частини вузлів, що призведе до значного збільшення довжини маршруту;

– оптимізації кількості кластерів, числа вузлів в кластері, діаметра кластера (прикладної, вирішується центром управління мережею);

– періодичної ротації вузлів, які виступають в ролі вузлів-рандеву (прикладний рівень);

– оптимізації процесу вибору вузлів-рандеву в кластері (вибором стратегії обльоту кластера): найближчий вузол до маршруту переміщення БпЛА; що знаходяться в „центрі маси” кластера тощо;

– застосування ефективних MAC-протоколів. Наприклад, як варіант може бути здійснена оптимізація по застосуванню MAC-протоколу – на початковому етапі взаємодії БпЛА-кластер використовується випадковий протокол каналного рівня, а при радіозв’язку з конкретними вузлами в кластері – детермінований;

– побудови енергоефективної топології всередині кластерів (регулюванням потужності передачі і взаємного розташування вузлів);

– балансування трафіку в кластерах мережі, наприклад, за рахунок застосування багатошляхової маршрутизації [2];

– застосування енергоефективних маршрутів передачі в кластерах, тобто методів маршрутизації, що дозволяють перерозподіляти трафік в залежності від наявної енергії батарей в вузлах маршрутів передачі (мережевий рівень);

– мінімізації обсягу службового трафіку (мережевий, транспортний, прикладної) і ін.

3. Мінімізація кількості БпЛА, необхідних для збору даних із заданою якістю

$$N_{\text{БпЛА}} \rightarrow \min,$$

при обмеженнях на час збору інформації $T_{\text{зб}} \leq T_{\text{збзад}}$, обсяг зібраних даних моніторингу $V_{\text{дм}} \geq V_{\text{дмзад}}$ та час функціонування мережі $T_{\text{ф}} \leq T_{\text{фзад}}$.

Завдання управління мережею зі збору даних моніторингу

При плануванні збору інформації від БСМ за допомогою БпЛА необхідно вирішити ряд основних завдань: розрахувати кількість і розміри кластерів, провести кластерізацію мережі і визначити точки-рандеву, побудувати енергоефективну топологію в кластері [2], визначити маршрути передачі від вузлів-моніторингу до вузлів-рандеву при даній топології [2], розрахувати параметри польоту БпЛА по заданих цільових функцій.

При наявності інформації про стан БСС дані завдання вирішуються централізовано центром управління мережею (ЦУС). При її відсутності – децентралізовано: БпЛА і вузлами мережі у взаємодії. Базові параметри польоту розраховується ЦУС, БпЛА здійснює їх коригування при отриманні інформації про стан вузлів кластера при підльоті до нього.

1. Завдання знаходження параметрів обльоту (маршрут, висота, швидкість і час).

Формування і реалізація параметрів обльоту відбувається в два етапи.

На першому – центр управління мережею будує базовий найкоротший маршрут з обльоту вузлів-рандеву (одним з відомих алгоритмів вирішення задачі комівояжера [9]), визначає швидкість і висоту польоту, на другому – при підльоті до чергового кластера БпЛА коригує параметри обльоту в залежності від кількості вузлів-рандеву в зоні обслуговування,

обсягів даних та швидкості передачі, параметрів вузлів кластера, своїх ресурсів, що залишилися, і цільових функцій управління мережею. Так, наприклад, при існуванні „критичних” вузлів кластері („виснажених”, „перевантажених” тощо) їх обліт (обслуговування) здійснюється на мінімальній відстані до них з пріоритетом в обслуговуванні (рис. 2б).

Час польоту (збору даних) в мережі $T_{зб}$ визначається співвідношенням довжини маршруту обльоту L_m до середньої швидкості польоту v

$$T_{сб} = L_m/v.$$

Максимальний час обльоту визначає перша стратегія збору даних БпЛА – безпосередньо з кожного вузла – $T_{зб\ max} = L_{m\ max}/v$, мінімальний час – $T_{сб\ min} = L_{m\ min}/v$, де $L_{m\ min}$ – мінімальна довжина маршруту, що охоплює всі вузли-рандеву мережі за умови, що час, необхідний для передачі даних в k -му кластері, буде менше часу його обльоту $t_{перk} \leq t_{обk}$.

Скорочення маршруту польоту призводить до зменшення часу збору інформації і зменшення витрати енергії БпЛА, але збільшує витрату енергії сенсорних вузлів через збільшення відстані в радіоканалах вузол-БпЛА, необхідності витрат енергії вузлів на передачу даних моніторингу вузлів-рандеву плюс витрати на службовий трафік, необхідний на побудову кластерів, топології і маршрутів передачі.

Більш детально час польоту (збору даних) залежить від середньої швидкості польоту v , кількості кластерів мережі $n_{кл}$, кількості та розташування вузлів-рандеву $(x, y)_k$, базової довжини маршруту $L_{мб}$ (реальна довжина маршруту $L_{мп}$ буде враховувати конкретну стратегію обльоту кластерів), висоти польоту h , часу обльоту кожного кластера мережі $t_{обк}$, стратегії обльоту кластера St .

Цільовими функціями можуть бути – мінімізація або обмеження часу збору

$$T_{зб} \rightarrow \min \text{ или } T_{зб} \leq T_{сбззд}, \quad (5)$$

$$T_{зб} = L_{мб}/v; L_{мп} = f(n_{кл}, (x, y)_k, h, t_{обк}, St), k = 1 \dots n_{кл}, \quad (6)$$

при обмеженнях:

- на граничний час польоту БпЛА (довжину маршруту) – $T_{сб} \leq T_{полmax}$ ($0 < L_m \leq L_{mmax}$);
- на швидкість – $v = [v_{min}, v_{max}]$;
- кількість кластерів – $1 \leq n_{кл} \leq N$;
- координати розташування (x, y) вузлів-рандеву;
- висоту польоту – $h = [h_{min}, h_{max}]$;
- час обльоту кожного k -го кластера $t_{обк}$ більше часу передачі УР-БпЛА – $t_{обк} \geq t_{перурk}$.

Зменшення кількості кластерів $n_{кл}$ призводить до зменшення кількості вузлів рандеву, скорочення маршруту, але збільшує розмір кластера та енергію, що витрачається: кожним вузлом на побудову і підтримку маршрутів передачі передачу пакетів до вузла-рандеву, на створення і переформатування кластерів, УР на прийом і агрегування даних.

На рис. 3 показані якісні залежності цих значень від рішень по кластеризації мережі, де $|C|$ – кількість кластерів в мережі, L_m – довжина базового маршруту польоту БпЛА, $l_{кл}$ – максимальна довжина маршруту передачі даних в кластері від вузла-моніторингу до УР. При цьому можуть використовуватися різні стратегії St маршруту обльоту як в самому кластері (тільки УР, з урахуванням критичних вузлів, з мінімізацією загальної витрати енергії в кластері) так і між кластерами з урахуванням взаємного розташування УР (наприклад, з урахуванням „центроїдного” розташування).

Висота польоту h визначає розмір площі покриття. Збільшення висоти призводить до збільшення: витрат палива (енергії) у БпЛА, площі покриття, числа вузлів, що потрапляють в зону радіозв'язку і здатних передати дані моніторингу, витрат енергії вузлів і БпЛА на процес передачі через збільшення відстані. І навпаки. Тому висота польоту повинна бути оптимізована з урахуванням цільових функцій управління мережею і обмежень на її ресурси, директивних вимог [8].

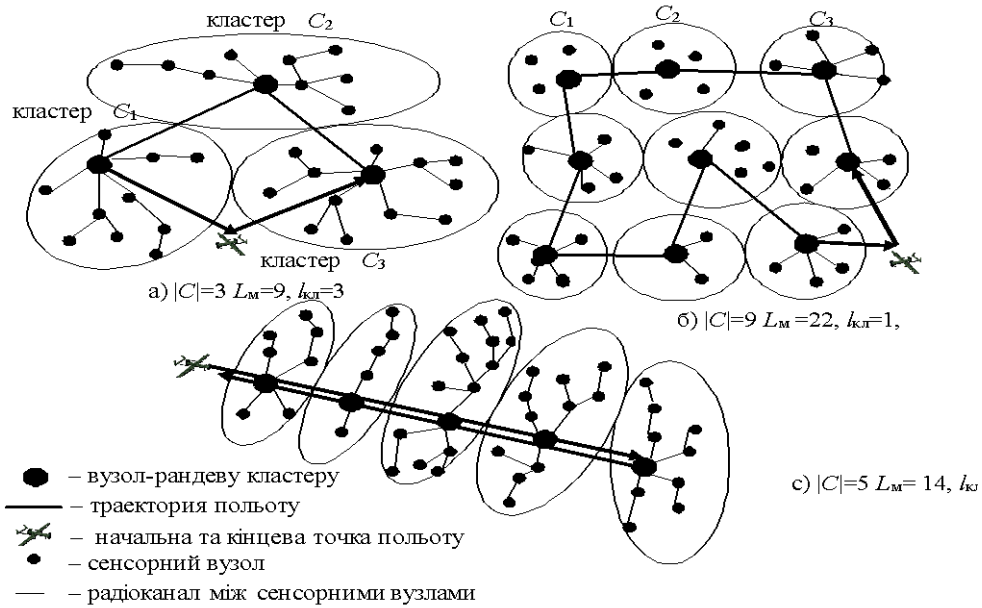


Рис. 3. Стратегія – обліт БПЛА “тільки вузли-рандеву кластерів”

Крім цього, наземні вузли можуть знаходитися в зоні радіозв’язку з БПЛА лише обмежений час, тому за цей час необхідно встигнути передати дані моніторингу $V_{\text{дм}}$ від множини вузлів, що знаходяться в зоні радіозв’язку, до БПЛА. За умови того, що час прийому-передачі інформації від вузла-рандеву до БПЛА обмежений часом його прольоту $t_{\text{сбранд}} = l/v$, де l – довжина маршруту переміщення БПЛА в межах радіозв’язку з вузлом-рандеву (рис. 4).

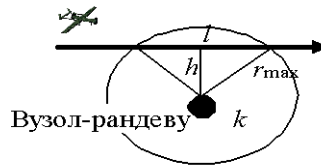


Рис. 4. Пояснення розрахунку висоти польоту

Висота польоту визначає дальність радіозв’язності r_{max} та визначається виразом

$$h = (r_{\text{max}}^2 - (l/2)^2)^{1/2},$$

де r_{max} – максимальна дальність радіозв’язності при забезпеченні певної швидкості передачі. За час радіозв’язку вузла-рандеву з БПЛА він повинен встигнути передати йому дані. Тобто час обльоту k -го кластера $t_{\text{обк}}$ має бути більше або дорівнювати часу передачі $t_{\text{перк}}$ від вузла-рандеву до БПЛА. Час передачі $t_{\text{перк}}$ дорівнює співвідношенню швидкості передачі s (залежить від відстані r і протоколу каналного рівня $\Pi_{\text{ку}}$) до обсягу переданих даних $V_{\text{дмк}}$, зібраних від усіх вузлів кластера в вузлі-рандеву – $V_{\text{дмк}} = V_{\text{дмі}} n_{\text{узклк}}$, та належачих k -му кластеру.

$$t_{\text{обк}} = l/v = 2(r_{\text{max}}^2 - h^2)^{1/2}/v \geq t_{\text{перк}} = s(r, \Pi_{\text{ку}}) / (V_{\text{дмк}} n_{\text{узклк}}), r \leq r_{\text{max}}. \quad (7)$$

Тобто БПЛА після входження в радіозв’язку з УР вибирає швидкість переміщення і висоту для забезпечення необхідного часу передачі $t_{\text{пер}}$ між ними. Тому висота польоту повинна бути оптимізована з урахуванням цільових функцій управління мережею і обмежень на її ресурси, директивних вимог [8].

При обслуговуванні множини вузлів-рандеву БПЛА можна розглядати як систему масового обслуговування, на вхід якої надходять заявки (вузли, що потрапляють в зону обслуговування), які можуть очікувати обслуговування протягом часу їх перебування в зоні радіозв’язності. Заявки (вузли), що не були обслужені протягом цього часу, отримують

відмову і вимагають повторного обльоту БпЛА (реальний маршрут відрізняється від базового). Інтенсивність потоку залежить від радіуса зони обслуговування, щільності вузлів-рандеву і швидкості руху БпЛА. БпЛА представляється як СМО типу $M/G/k$ при дисципліні обслуговування з очікуванням [9].

2. Завдання визначення кількості кластерів та кластеризація мережі

Від вирішення даного завдання залежить досягнення тих чи інших цільових функцій управління. При збільшенні кількості кластерів (i , відповідно, зменшення кількості вузлів в кластері) – збільшується число точок рандеву (час обльоту), але зменшується енергія вузлів в кластерах, що витрачається на їх формування та передачу (маршрутизацію) даних моніторингу до вузлів-рандеву. І навпаки.

Для визначення часу функціонування мережі необхідна модель розрахунку витрат енергії вузлів мережі при конкретному прийнятті рішення по кластеризації.

Модель розрахунку витрати енергії вузлів мережі при використанні БпЛА

Дано: мережа зв'язна і сформована в кластери, в кожному раунді виділені вузли рандеву, всі вузли однорідні, відомі обсяги і частота збору інформації моніторингу в кластерах, відома початкова енергія батарей всіх вузлів мережі, e_0 , $i=1 \dots I$, директивний час функціонування мережі $T_{\text{зад}}$ в раундах обльоту $NR_{\text{зад}}$.

Необхідно: розрахувати середню споживану енергію i -м вузлом e_i за один раунд обльоту при різних функціональних режимах роботи вузлів.

Число раундів роботи мережі $NR = e_0/e_i$. Якщо $NR \leq NR_{\text{зад}}$, то мережа задовольняє вимогу за часом функціонування та можна здійснювати оптимізацію за часом збору даних. Розглянемо детальніше модель.

Енергія вузла витрачається на такі режими його роботи: прийом, передача, моніторинг даних, сон.

$$e = e_{\text{пр}} + e_{\text{пер}} + e_{\text{мон}} + e_{\text{сон}}.$$

Кожен вузол може здійснювати обмін з сусідніми вузлами, з БпЛА, може виступати в ролі вузла-рандеву (головного вузла), ретранслятора та вузла-моніторингу. Загальний обсяг даних обміну складається з обсягу даних моніторингу $V_{\text{мон}}$ кожного вузла, переданого кожним вузлом вузлу-рандеву за побудованими маршрутами, обсягу службових даних $V_{\text{сл}}$, який визначається прийнятими протоколами обміну на різних рівнях еталонної моделі взаємодії відкритих систем.

а) Енергія, що витрачається простим вузлом: здійснюється моніторинг і передача даних моніторингу вузлу-рандеву через сусідній вузол j , режим сон.

$$e_{\text{іпростий}} = e_{\text{імон}} + e_{\text{періj}} V_{\text{моні}} + e_{\text{пріj}} V_{\text{прj}} + e_{\text{сон}}, \quad e_{\text{періj}} = \alpha + \beta r_{ij}^2, \quad (8)$$

де $e_{\text{пріj}}$ и $e_{\text{періj}}$ – енергія, яка витрачається на біт прийому та передачі, $V_{\text{пр}}$, $V_{\text{пер}}$ – об'єми приймаємих та передаємих даних; α , β – коефіцієнти, r_{ij} – відстань між вузлами i и j .

б) Енергія, що витрачається вузлом-ретранслятором в маршруті джерело-УР: $s\text{-}j\text{-}i\text{-}b\text{-}q$

$$e_{\text{іретр}} = e_{\text{іпростий}} + (e_{\text{пріj}} V_{\text{монс}} + e_{\text{періj}} V_{\text{пері}} + e_{\text{періb}} V_{\text{монс}} + e_{\text{пріb}} V_{\text{прb}}) n_{\text{узЗ}}, \quad (9)$$

де \mathbb{Z} – множина вузлів-джерел піддерева маршруту к УР через i .

в). Енергія, що витрачається q -м вузлом-рандеву k -го кластера – $e_{\text{qурк}}$: прийом-передача с БпЛА; прийом даних моніторингу $V_{\text{моні}}$ від усіх вузлів кластера через j -е вузли-сусіди; передача квитанцій вузлам сусідам; агрегування даних від усіх вузлів кластера; побудова топології; побудова маршрутів передачі; побудова кластерів; сон

$$e_{\text{qурк}} = e_{\text{прq-БпЛА}} V_{\text{прБпЛА}} + e_{\text{перq-БпЛА}} n_{\text{узкл}} V_{\text{моні}} + e_{\text{пріj}} (n_{\text{узкл}} - 1) V_{\text{моні}} + e_{\text{періj}} (n_{\text{узкл}} - 1) V_{\text{періj}} + e_{\text{агрq}} n_{\text{узкл}} V_{\text{моні}} + e_{\text{топол}} + e_{\text{марш}} + e_{\text{класт}} + e_{\text{мон}} + e_{\text{сон}}, \quad (10)$$

де $e_{\text{прq-БпЛА}}$ и $e_{\text{перq-БпЛА}}$ – енергія, яка витрачається на біт при прийомі та передачі між q -м УР-БпЛА, $e_{\text{агр}}$, $e_{\text{топол}}$, $e_{\text{марш}}$, $e_{\text{класт}}$ – енергія, яка витрачається на агрегацію даних, побудову топології, маршрутів передачі та кластеризацію.

Алгоритм обчислення необхідної кількості кластерів в мережі

Кількість і розмір кластерів впливає на час збору інформації БпЛА, витрату енергії батареї (час функціонування мережі), обсяг службового трафіка, затримку передачі, обсяг міжкластерного і кластерного трафіку тощо.

Пропонується ітераційний алгоритм знаходження необхідної кількості кластерів в мережі, що задовольняє цільовим функціям (2) і (4). Основна його ідея – якщо $n_{\text{кл}} \uparrow$, то $T_{\text{сб}} \uparrow$ и $T_{\text{ф}} \downarrow$ і навпаки. Ми намагаємося виконати обмеження та отримати допустимі рішення.

Основні етапи:

1. Вибирається початкове рішення за кількістю кластерів: $n_{\text{кл}}$.
2. Обчислюється середнє число вузлів $n_{\text{вузкл}} = N/n_{\text{кл}}$ в кластері.
3. Проводиться кластеризація і призначаються вузли-рандеву.
4. Будується топологія в кластерах і маршрути передачі в кластерах [2].
5. Розраховується базовий найкоротший маршрут польоту БпЛА [9] і визначається висота польоту з урахуванням (7). Розраховується $T_{\text{зб}}$ згідно виразу (6).

6. Перевірка:

ЯКЩО ($T_{\text{зб}} \leq T_{\text{полмах}}$ или $T_{\text{зб}} \leq T_{\text{збзад}}$) и ($n_{\text{кл}}=1$), ТО КІНЕЦ (рішення не має – не вистачає ресурса БпЛА).

ЯКЩО ($T_{\text{зб}} \leq T_{\text{полмах}}$ или $T_{\text{зб}} \leq T_{\text{збзад}}$) та (значення $n_{\text{кл}}$ отримано на попередніх кроках),

ТО КІНЕЦ (рішення знайдено).

ЯКЩО ($T_{\text{зб}} \leq T_{\text{полмах}}$ или $T_{\text{зб}} \leq T_{\text{збзад}}$), ТО $n_{\text{кл}} = n_{\text{кл}} - 1$ та перехід до кроку 2,

Інакше – перехід до кроку 6.

7. Обчислюється витрати енергії вузлами кожного кластера відповідно до розглянутої вище моделі (8) – (10). Обчислюється можливе число раундів NR (час) функціонування кластера і мережі.

8. Перевірка:

(ЯКЩО $NR \leq N_{\text{зад}}$) та ($n_{\text{кл}}=1$), ТО КІНЕЦ (БСМ не забезпечить заданий час функціонування);

ЯКЩО $NR \leq N_{\text{зад}}$ ТО $n_{\text{кл}} = n_{\text{кл}} - 1$, ЯКЩО $n_{\text{кл}} = 1$ ТО КІНЕЦ (рішення – один кластер);

ІНАЧЕ $n_{\text{кл}} = n_{\text{кл}} + 1$, ЯКЩО $n_{\text{кл}} = N$ ТО КІНЕЦ (рішення – перша стратегія – обльот всіх вузлів).

ІНАКШЕ перехід до кроку 2.

Для скорочення перебору та знаходження начального рішення $n_{\text{кл}}$ може бути застосований апарат нечіткої логіки.

Кластеризація мережі

Алгоритм кластеризації визначає порядок розбиття мережі на кластери, вибір головного вузла кластера, побудову топології і маршрутів передачі, визначає порядок збору інформації моніторингу та передачі її на БпЛА. Переваги кластеризації: подовжується час функціонування мережі за рахунок планування поведінки вузлів в кластерах, зменшує розміри маршрутних таблиць, скорочується обсяг кластерного і міжкластерного службового трафіку, головний вузол (в нашому випадку вузол-рандеву) може здійснювати агрегацію даних і зменшувати їх надмірність, спрощуються процедури управління топологією, маршрутизацією і ін.

Алгоритм кластеризації БСМ складається з трьох етапів: 1) побудова кластера; 2) вибір головного вузла кластера (вузлів-рандеву); 3) оптимізація кластерів по топології, маршрутизації і порядку збору і передачі інформації моніторингу на БпЛА.

Вибір головних вузлів кластерів здійснюється шляхом обміну службовими повідомленнями між вузлами кластера, узгодженням вибору головного вузла на підставі певних правил і метрик. У порівнянні с відомими підходами кластеризації для вибору головного вузла пропонується використовувати сукупність метрик: рівень залишкової енергії батареї вузла за вирахуванням енергії, необхідної для виконання функцій вузла рандеву в

наступному раунді – μ_1 (розраховується за моделлю витрат енергії вузла, наведена вище), потужність передачі μ_2 , кількість сусідніх вузлів, географічні або відносні координати (центроїдність положення) μ_3 , відстань до БпЛА (рівень потужності сигналу з БпЛА) μ_4 , мінімальна кількість ретрансляцій від вузла до голови кластера μ_5 і ін.

На етапі планування збору пріоритет в виборі метрик при формуванні кластерів буде визначатись системою управління мережі на ґрунті цільових функцій управління ($ZF_x \rightarrow \mu_y$): для $\min T_{сб}$ – пріоритет μ_4 , для $\max T_{ф}$ – μ_1 , для $\min N_{БпЛА}$ – μ_5 .

Обсяг службового трафіку для кожного вузла при кластеризації дорівнює добутку кількості вузлів кластера, числу її ітерацій I , обсягу одиничного службового повідомлення $V_{спкл}$

$$V_{сткл} = n_{узкл} I V_{спкл}.$$

Вимоги до процесу кластеризації: мінімальна кількість ітерацій і завершити до підльоту БпЛА.

Отримана початкова випадкова *топологія кластера підлягає оптимізації* відповідно до цільових функцій. Зауважимо, що процес управління топологією передре процесу маршрутизації і визначає потенційні її можливості. Пошук топології кластера, заданої цільовою функцією, здійснюється головою кластера на множині правил (евристик), запропонованих в роботі [12]. Обсяг службового трафіку при побудові топології для кожного вузла одно (здійснюється за дві ітерації)

$$V_{стоп} = 2 n_{узкл} V_{сптоп}.$$

Для побудови маршрутів передачі використовується зондова маршрутизація (типу DSR). УР широкомовно передає зонд-запит на побудову маршруту. Кожен вузол мережі, отримавши вузол-запит, проводить його аналіз, будує свої маршрутні таблиці і по найкоротшому шляху (відповідно до запропонованої метрики) відправляє УР узгоджений маршрут обміну, ретранслює з максимальною потужністю один раз широкомовно даний запит. Для вибору маршрутів передачі використовується множина метрик $\{m_1, m_2, \dots, m_M\}$: залишкова енергія батареї, число ретрансляцій, потужність передачі і ін. Пріоритет вибору якої визначає СУ на основі цільових функцій управління ($ZF_x \rightarrow m_y$) [13].

Кількість службових повідомлень при маршрутизації для k -го кластера: $n_{узклk}$ – зондів-запитів, де $n_{узклk}$ – кількість вузлів k -м в кластері; $n_{іклk} l_{кмi-ур}$ – зондів-відповідей, де $l_{кмi-ур}$ – довжина найкоротшого маршруту між i -м вузлом и УР.

Тоді обсяг службового трафіка для кожного вузла $V_{стмар} = (n_{узклk} + n_{іклk} l_{кмi-ур}) V_{спмар}$.

Отримані значення обсягів службового трафіку необхідно враховувати в виразі (10).

Висновки. У статті розглянуті основні завдання управління БСМ при використанні БпЛА в якості мобільного шлюзу: завдання знаходження параметрів обльоту, завдання кластеризації мережі (вибору вузлів-рандеву, знаходженням кількості кластерів).

Запропоновано аналітичну модель витрати енергії вузлів при виконанні ними різних функцій: моніторингу, ретранслятора, рандеву. Показано, що скорочення часу збору даних за допомогою БпЛА, збільшення часу функціонування мережі може бути досягнуто за рахунок оптимізації: параметрів переміщення БпЛА (маршрут, висота, швидкість), кількості і параметрів кластерів обміну, стратегій обльоту кластера, застосування енергоефективних алгоритмів фізичного, каналного, мережевого і прикладного рівнів OSI.

Напрямок подальших досліджень є дослідження запропонованих моделей при різних цільових функціях управління мережею і стратегіях обльоту БпЛА.

ЛІТЕРАТУРА

1. Yong Zeng, Rui Zhang, Teng Joon Lim. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges // IEEE Communications Magazine, Vol. 54, no. 5, 2016.
2. 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 України”. – 444 с.: ил.

3. Жук О.В. Система управління тактичними сенсорними мережами / О.В. Жук, В.А. Романюк, О.Я. Сова // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ „КПІ”. – 2008. – № 2. – С. 88 – 96.
4. Bilal Jan, Haleem Farman, Huma Javed, Bartolomeo Montrucchio, Murad Khan, and Shaukat Ali Energy Efficient Hierarchical Clustering Approaches in Wireless Sensor Networks: A Survey Hindawi Wireless Communications and Mobile Computing Volume 2017, Article ID 6457942, 14 pages <https://doi.org/10.1155/2017/6457942>.
5. Cheng Zhan , Yong Zeng , Rui Zhang. Energy-Efficient Data Collection in UAV Enabled Wireless Sensor Network // IEEE Wireless Communications Letters, Volume: PP, Issue 99, 2017.
6. Sathyaraj, B. Moses, et al. Multiple UAVs path planning algorithms: a comparative study. // Fuzzy Optimization and Decision Making, 2008, pp. 257 – 267.
7. Huseyin Okcu, Mujdat Soyturk. Distributed Clustering Approach for UAV Integrated Wireless Sensor Networks, International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing, 2014, Vol.15, No. 1 – 3, pages: 106 – 120.
8. Dac-Tu Ho, Esten Ingar Grotli, Tor Arne Johansen. Heuristic Algorithm and Cooperative Relay for Energy Efficient Data Collection with a UAV and WSN. Computing, Management and Telecommunications (ComManTel), 2013 International Conference.
9. Киричек Р.В. Разработка и исследование комплекса моделей и методов для летающих сенсорных сетей: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.12.13 / Киричек Руслан Викторович. – СПб., 2017 – 316 с.
10. Романюк А.В. Метод сбора информации мониторинга в беспроводных сенсорных сетях с использованием БПЛА / А.В. Романюк // Збірник наукових праць ВІТІ. – 2018. – № 1. – С. 90 – 99.
11. Романюк А.В. Модели оценки эффективности функционирования беспроводных сенсорных сетей / А.В. Романюк // Збірник наукових праць ВІТІ. – 2017. – № 3. – С. 125 – 134.
12. Миночкин А.И. Управление топологией мобильной радиосети / А.И. Миночкин, Романюк В.А. // Зв'язок, 2003. – № 3. – С. 28 – 33.
13. Миночкин А.И. Управление энергоресурсом мобильной радиосети / А.И. Миночкин, Романюк В.А. // Зв'язок, 2004. – № 8. – С. 50 – 53.