

Гримуд А. Г.

(0000-0003-4012-5185)

Романюк В. А., доктор технічних наук, професор

(0000-0002-6218-2327)

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, Київ

## Модель пошуку траєкторії польоту телекомунікаційною аероплатформою для збору даних з вузлів кластеризованої бездротової сенсорної мережі військового призначення

**Резюме:** У статті вдосконалено модель пошуку траєкторії польоту телекомунікаційною аероплатформою під час збору даних з вузлів кластеризованої бездротової сенсорної мережі військового призначення з урахуванням певних цільових функцій управління.

**Ключові слова:** бездротові сенсорні мережі; кластеризація; FOREL; траєкторія польоту; телекомунікаційна аероплатформа; збір даних.

**Постановка проблеми.** На сьогодні основною умовою досягнення переваги над супротивником під час бойових дій є високий рівень забезпечення військ (сил) усіма видами оперативної інформації. В умовах високої динаміки ведення бойових дій такої переваги можливо досягти тільки у разі, коли оперативна інформація про поточну обстановку доступна для посадових осіб усіх ланок управління. Відповідно до вимог стратегічного оборонного бюлетеня України очікуваним результатом завдання 1.4.3 є “впровадження системи C4ISR на оперативному та тактичному рівнях до командира відділення (та їм рівних) у складі таких базових можливостей: захищений цифровий голосовий зв’язок, обмін текстовими повідомленнями, обмін графічними документами, геопросторова інформація, взаємна ідентифікація, *інтеграція сенсорів (датчиків)*, *інтеграція БпЛА*, сумісність зі стандартними угодами НАТО” [1]. Тому нині інтенсивно розробляються бездротові сенсорні мережі (БСМ), для застосування у різних сферах як цивільного (спостереження за станом полів агрокультур, лісів, міст, продуктопроводів, кордонів, пошуково-рятувальні місії тощо), так і військового призначення (обізнаність на полі бою, виявлення живої сили та техніки противника тощо) [2].

БСМ може бути призначена для роботи протягом кількох місяців або навіть років у важкодоступних віддалених районах (наприклад, зайнятих противником), де відсутня телекомунікаційна інфраструктура тощо. Для збору даних з вузлів мережі в таких умовах пропонується використовувати телекомунікаційні аероплатформи (ТА). Автономні сенсорні вузли моніторять

визначені параметри зон свого покриття, зберігають отримані дані та чекають можливості передати їх на ТА під час появи її в зоні радіозв’язку. ТА облітають територію БСМ за визначеним маршрутом (траєкторією), збирають дані моніторингу від сенсорних вузлів та після повернення передаються посадовим особам для подальшого аналізу.

Кожний сенсорний вузол обмежений за ресурсами: енергії батареї (часу функціонування), продуктивності процесора, обсягу пам’яті, потужності передавача, пропускної спроможності, дальності передавання радіоканалу тощо. Сучасні БСМ військового призначення можуть складатися із сотень або навіть тисяч сенсорних вузлів. Заміна батарей для такої великої кількості вузлів може бути непрактичною або навіть неможливою. Отже, зменшення витрат енергії сенсорними вузлами (перерозподіл витрат між вузлами) має вирішальне значення збільшення часу їх функціонування. Крім того, ці мережі відносяться до класу DTN (Delay Tolerant Networks) мереж, для яких характерна затримка отримання даних моніторингу [3–10]. Одним зі способів зменшення часу збору даних ТА є кластеризація мережі та визначення точок збору даних, що дає змогу значно зменшити довжину маршруту обльоту ТА і, відповідно, скоротити час збору даних.

З огляду на викладене, виникає наукове завдання вдосконалення моделі пошуку траєкторії польоту телекомунікаційною аероплатформою для зменшення часу збору даних з вузлів кластеризованої бездротової сенсорної мережі військового призначення, тобто збільшення часу функціонування мережі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У більшості публікацій [2–14]

задача обчислення маршруту польоту ТА розглядається як рішення задачі комівояжера, яка відноситься до класу NP-складних. Відомі різні алгоритми і методи вирішення цієї задачі: повного перебору, лінійного цілочисельного програмування, гілок і границь, жадібні евристичні (найближчого сусіда, по спіралі, по клітинкам тощо), генетичні та ін.

Тобто більшість публікацій присвячено розв'язанню задачі комівояжера в класичній постановці – побудова найкоротшого маршруту польоту всіх сенсорних вузлів (або точок збору в мережі), яка не враховує особливості процесу взаємодії ТА-вузлів мережі, які можна використати для вдосконалення відомих рішень.

1. Можливість кластеризації мережі та визначення точки збору даних ТА у просторі кожного кластеру. Відповідно до цього точки польоту будуть розташовані на певній відстані одна від одно, тому необхідно перевірити ефективність відомих алгоритмів пошуку найкоротшого маршруту польоту ТА для кластеризованих мереж.

2. Необхідність побудови не тільки маршруту, а і врахування висоти польоту ТА (від висоти залежить розмір зони покриття ТА, кількість вузлів у цій зоні, витрати енергії вузлів на передавання даних тощо), тобто потрібно будувати траєкторію польоту. Скорочення маршруту польоту призводить до зменшення часу збору інформації і зменшення витрати енергії самої ТА, але збільшує витрату енергії вузлів через збільшення відстані в радіоканалі вузол-ТА.

3. Необхідність врахувати кілька цільових функцій управління процесом збору даних, насамперед, мінімум часу збору даних, максимум часу функціонування мережі.

**Метою статті** є вдосконалення моделі пошуку траєкторії польоту ТА під час збору даних з вузлів кластеризованої бездротової сенсорної мережі військового призначення при досягненні різних цільових функцій управління.

**Виклад основного матеріалу.** У статті розглядається БСМ військового призначення значної розмірності. Наземні сенсорні вузли випадковим чином розподілені на певній території, мають однакові функції та ресурси, стаціонарні, оснащені локальною або глобальною системою позиціонування (наприклад, GPS) [7, 8].

**Вихідні дані.** Під час розв'язання задачі використані такі дані:

площа моніторингу бездротової сенсорної мережі –  $S$ ; кількість вузлів мережі

$i = \overline{1, n}$ , координати їх розміщення на місцевості  $(x_i, y_i) \in S$ ; об'єм зібраних даних моніторингу  $i$ -м вузлом –  $V_{DMi}$ ;

технічні характеристики – кількість, типи сенсорних датчиків, енергія батареї, витрати енергії вузла на моніторинг для кожного типу датчика;

телекомунікаційні характеристики сенсорів – протоколи каналного та фізичного рівнів, тип антени, потужність передавача, витрати енергії на біт приймання та передавання даних для обраного MAC-протоколу та типу комунікаційного обладнання сенсорних вузлів;

кількість ТА  $N_{TA}$ , їх технічні та телекомунікаційні характеристики – швидкість, висота, час польоту, протоколи каналного та фізичного рівнів, тип антени, потужність передавача та інші характеристики ТА.

**Допущення.** Кожен вузол мережі та кожна ТА мають власні системи управління (СУ), що реалізують визначений метод збору даних і взаємодіють між собою. ТА має можливість переміщатися в трьох вимірах із постійною або змінною швидкістю на обмеженій висоті та обмежений час. ТА завдяки спрямованій антені формує наземну зону покриття (радіозв'язності) з радіусом  $R$ , розмір якої залежить від висоти польоту ТА, потужності передачі, рівня завад, характеристик приймально-передавальних пристроїв, MAC-протоколу тощо.

Особливості побудови траєкторії польоту для ТА літакового типу [10, 13], оскільки вони мають значний радіус розвороту та інерційність порівняно з роторним типом ТА, в роботі не розглядаються.

Інформація про параметри стану вузлів (координати розміщення, рівень енергії батареї, обсяг даних моніторингу) збирається під час первинного польоту мережі ТА, надалі інформація про стан вузлів оновлюється унаслідок кожного раунду польоту.

ТА і сенсорні вузли оснащені однаковим радіоблаштуванням, підтримують однакові MAC-протоколи інформаційного обміну (наприклад, IEEE 802.11) з набором швидкостей обміну, мають обмежену дальність радіозв'язку. Кожен вузол і ТА мають достатній обсяг пам'яті для зберігання даних моніторингу.

Система управління ТА дає змогу самостійно приймати рішення (по

кластеризації, траєкторії польоту, точках збору даних тощо) в умовах відсутності зв'язності з наземним центром управління мережею, що висуває вимоги щодо використання алгоритмів управління з незначною обчислювальною складністю.

Кожний вузол здійснює моніторинг і зберігання інформації про параметри навколишнього середовища (або об'єктів спостереження). Коли в зону радіозв'язку вузла входить ТА, він відправляє (згідно з визначеним MAC-протоколом) ТА зібрані дані моніторингу.

**Необхідно:**

1. Визначити кількість кластерів  $k$ , їх розміри  $R_k$ , кількість і координати точок збору даних  $(x, y, h)_k$  ТА з вузлів кластера (положення ТА у просторі).

2. Розрахувати базовий маршрут польоту  $M_{AB}$  в мережі від початкового положення  $A$  до кінцевого  $B$  через точки збору даних з вузлів кластерів.

3. Розрахувати траєкторію польоту ТА між кластерами.

4. Визначити точки збору (під час зависання ТА) та інтервали траєкторії (під час руху ТА) збору даних ТА в кластері, порядок (графік) обміну даними ТА з вузлами кластера та стратегії обльоту  $(St_k)$  вузлів кластера відповідно до цільових функцій управління.

До того ж необхідно реалізувати задані наземним центром управління мережею цільові функції управління (ЦФУ) збором даних з урахуванням їх пріоритету [7, 8]:

мінімізація або забезпечення заданого часу збору даних  $(T_{зб})$

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

максимізація або забезпечення заданого часу функціонування мережі  $(T_{\phi})$

$$T_{\phi} \rightarrow \max \text{ або } T_{\phi} \geq T_{\phi\text{зад}} \quad (2);$$

мінімізація або використання заданої кількості ТА  $(N_{ТА})$ ;

$$N_{ТА} \rightarrow \min \text{ або } N_{ТА} \leq N_{ТА\text{зад}} \quad (3);$$

при обмеженнях  $\Omega$  на:

тип ТА (літаковий або роторний); швидкість, висоту, час і дальність польоту ТА –  $v = [v_{\min}, v_{\max}]$ ;

$$h = [h_{\min}, h_{\max}]; t_{\Pi} \leq t_{\Pi\text{max}}; L_{\Pi} \leq L_{\Pi\text{max}};$$

кількість кластерів у мережі –  $1 \leq k \leq n$

;

енергію батарей вузлів і ТА –  $e_i \leq e_{\max}$ ,

$$e_{ТА} \leq e_{ТА\text{max}};$$

обсяг даних моніторингу кожного  $i$ -го вузла –  $V_{ДМ\ i} \leq V_{ДМ\ \text{зад}}$ ;

дальність каналу радіозв'язку вузол-ТА –  $d \leq d_{\max}$ ;

радіус площі зони покриття (кластера) –  $R_{\min} \leq R \leq R_{\max}$ ;

вимоги до якості обслуговування – зібрати дані від усіх вузлів мережі або частини вузлів.

Нааявність кількох цільових функцій управління (1–3) призводить до завдання багатокритеріальної оптимізації, яка може бути вирішена методами: головного показника, поступок та іншими.

**Рішення.** Для успішного досягнення поставленої мети дослідження було визначено перелік таких часткових взаємопов'язаних завдань:

кластеризація бездротової сенсорної мережі та визначення точок збору даних моніторингу вузлів у кластерах;

побудова базового маршруту польоту ТА в мережі за точками збору даних;

побудова траєкторії польоту між кластерами мережі, коригування точок (інтервалів руху) збору даних у кластерах;

збір даних з вузлів ТА за траєкторією польоту та визначених у точках зависання в кластерах згідно з пріоритетом цільових функцій управління мережею.

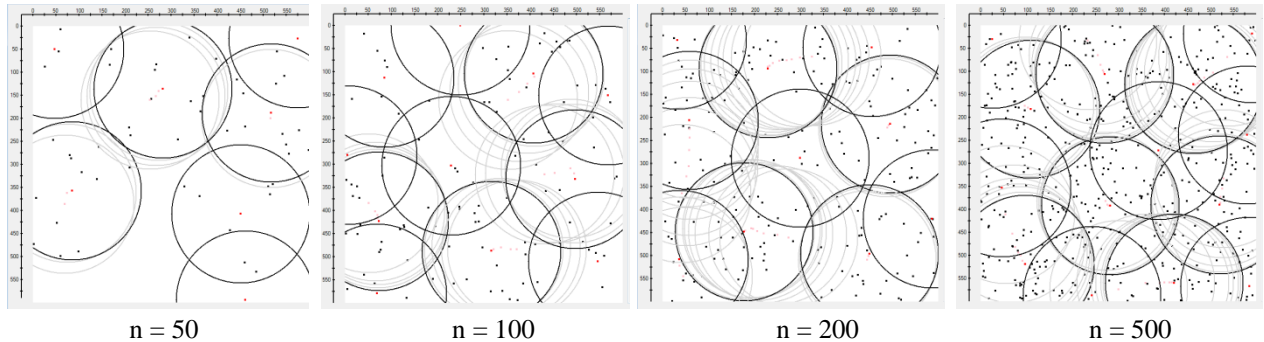
**Кластеризація мережі.** Завдання кластеризації мережі належить до класу  $NP$ -повних – отримання точного рішення мереж великої розмірності та потребує значних обчислювальних ресурсів, тому доцільно використовувати евристичні методи. На відміну від існуючих алгоритмів покриття точок на площині колами радіусу  $R$  (випадковий пошук, жадібний алгоритм та інші [4]) для кластеризації мережі пропонується використовувати ітераційний алгоритм кластерного аналізу FOREL (FORmal Element), який заснований на ідеї об'єднання в один кластер вузлів у місцях їхнього найбільшого скупчення та вирішує завдання кластеризації завдяки мінімізації сумарного квадратичного відхилення елементів кластерів (вузлів мережі) від центрів мас цих кластерів.

Принцип роботи алгоритму кластерного аналізу FOREL [15]. На кожному кроці алгоритму випадково вибирається вузол БСМ, описується коло радіусу  $R$ , усередині цього

кола вибирається центр тяжіння, який стає центром нового кола. Таким чином, на кожному кроці коло переміщується у напрямку локального скупчення вузлів для захоплення якнайбільшої кількості вузлів. Після того як центр кола стабілізується, всі вузли всередині кола з цим центром помічаються як кластеризовані та виключаються з розгляду. Цей процес повторюється доки вся мережа не буде кластеризована.

Алгоритм FOREL дає змогу знайти мінімальну (необхідну) кількість кластерів і точок збору даних у мережі через адаптацію

розміру зони покриття ТА  $R$  (регулюванням висоти польоту ТА). Збільшення висоти польоту ТА призводить до збільшення: розміру кластера, витрат енергії вузлів на процес передавання до ТА через збільшення відстані між ними та збільшення площі, витрат палива (енергії) ТА. І навпаки. Крім цього граничне збільшення дальності радіозв'язку обмежено малою потужністю передавачів сенсорних вузлів. Унаслідок роботи алгоритму кластеризації БСМ розбивається на певну кількість однакових за розмірами кластерів (рис. 1).



**Позначення:**

- крапка – сенсорний вузол;
- коло з тонкою лінією – процес формування кластеру за алгоритмом FOREL;
- коло з товстою лінією – сформований кластер

**Рис. 1. Результати кластеризації мережі (метод FOREL)**

У роботі пропонується подальше коригування кластерів одного розміру в мережі (проводиться неоднорідна кластеризація [17]) для задоволення певних цільових функцій управління (рис. 2):

проводиться додаткова кластеризація кластерів зі значною кількістю вузлів або вузлів зі значним обсягом даних моніторингу (ЦФУ – зменшити час збору даних через зменшення відстані між вузлами і ТА та, відповідно, підвищити швидкість передачі даних згідно з можливостями МАС-протоколу);

знищуються кластери з малою кількістю вузлів через їх перерозподіл між іншими кластерами (ЦФУ – скоротити маршрут обльоту через зменшення точок обльоту ТА).

На рис. 2 наведені результати моделювання побудови неоднорідних

кластерів для БСМ з різної кількістю вузлів за критерієм рівномірного розподілу вузлів за кластерами.

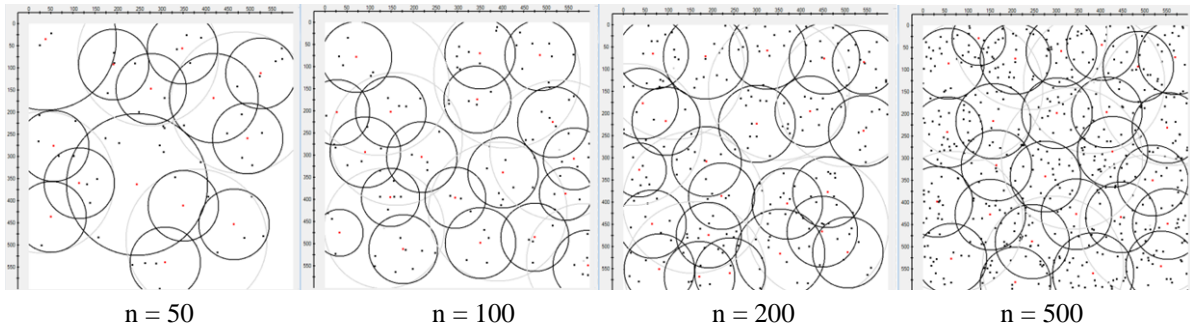
Вибір точок збору даних (зависання) у кластерах може відбуватись за варіантами (стратегіями):

геометричний центр кластера (пріоритет ЦФУ (1)) – мінімізація кількості точок збору в кожному кластері та пошук найкоротшого маршруту обльоту;

центр “мас” кластера (пріоритет ЦФУ (2)) – мінімізація загальних витрат енергії вузлів кластеру;

точка збору, яка мінімізує час збору даних – пріоритет ЦФУ (1);

точка збору, яка мінімізує середню потужність вузлів кластера – пріоритет ЦФУ (2).

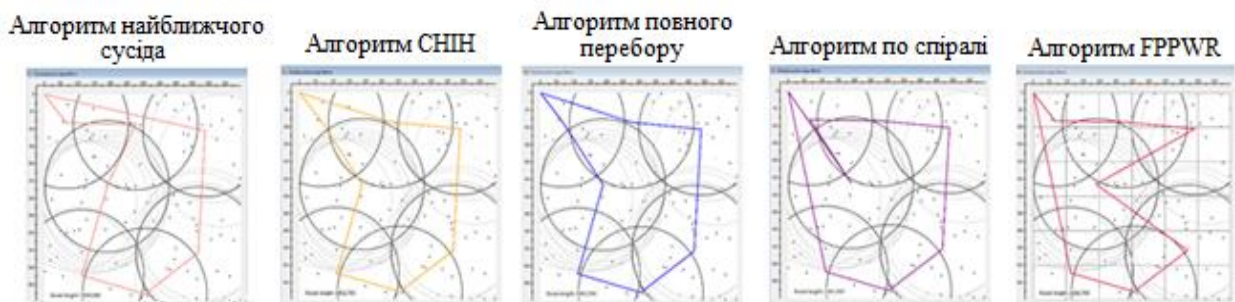


**Рис. 2. Моделювання неоднорідної кластеризації БСМ з урахуванням ЦФ управління**

Побудова базового маршруту обльоту ТА. Базовий маршрут обльоту (його довжина  $L_{\text{бм}}$ ) ТА від його початкового положення до кінцевого через точки збору даних (спочатку – центри кластерів) може бути побудований одним з відомих алгоритмів пошуку найкоротшого шляху (вирішення задачі комівояжера) [4, 10–14, 16]: повного перебору, лінійного цілісного програмування, гілок і граней, жадібні, евристичні (найближчого сусіда [4], за спіраллю [11], по клітинках площини (FPPWR, Fast Path Planning with Rules) [12], опуклої оболонки (СНІН, Convex Hull Insertion Heuristic) [14], побудова маршруту з обмеженням на кривизну маршруту для літакового типу ТА – задача Дубінса [10, 13]) та ін. Задача комівояжера належить до класу NP-повних. Кількість ітерацій алгоритму значно збільшується зі збільшенням розмірності мережі. Отримання точного рішення мережі значної розмірності проблематично, тому на практиці застосовують евристичні алгоритми отримання наближеного рішення, які мають незначну обчислювальну складність.

Наприклад, алгоритм найближчого сусіда визначає наступну точку збору даних, яка ближче знаходиться до точки поточного збору даних ТА. В алгоритмі FPPWR мережа поділяється на квадрати, наступна точка обльоту визначається в найближчому квадраті по горизонталі. Алгоритм за спіраллю визначає маршрут обльоту за зовнішньою областю розміщення вузлів у вигляді спіралі. Алгоритм СНІН складається з початкової обгортки всієї множини точок за зовнішнім радіусом, після чого вибирається початкова точка та напрямок руху до подальшої точки за певними критеріями.

Для проведення експериментів здійснена програмна реалізація множини алгоритмів пошуку найкоротшого шляху в середовищі C# для кластеризованої мережі розмірності  $n = 100, 200, 500$  вузлів. За допомогою алгоритму FOREL здійснена кластеризація мережі на  $k = 7 \dots 17$  кластерів (змінюючи висоту польоту ТА), побудовані маршрути обльоту згідно з визначеними алгоритмами пошуку найкоротшого шляху. На рис. 3 зображений один з результатів моделювання побудови маршруту обльоту ТА для  $n=100$  та  $k=7$ .



**Рис. 3. Результати моделювання алгоритмів пошуку найкоротшого маршруту польоту ТА (ламана лінія – маршрут ТА)**

У Табл. 1 наведені результати моделювання довжини базових маршрутів польотів ТА  $L_{\text{бм}}$  (в умовних одиницях) під час використанні вказаних алгоритмів. За малої кількості кластерів  $k$  алгоритми дають наближені

результати. У разі збільшення  $k$  алгоритм СНІН дає найкращі результати за значенням  $L_{\text{бм}}$  для кластеризованої мережі (до 15 % коротший маршрут).

Таблиця 1

Результати моделювання

| №  | n   | R   | k  | Довжина маршруту $L_{бм}$ |         |         |         |         |
|----|-----|-----|----|---------------------------|---------|---------|---------|---------|
|    |     |     |    | 1                         | 2       | 3       | 4       | 5       |
| 1  | 100 | 160 | 8  | 2135,28                   | 2021,39 | 2021,39 | 2889,85 | 2891,43 |
| 2  | 100 | 150 | 10 | 2233,09                   | 2399,06 | 2221,19 | 3324,53 | 3089,52 |
| 3  | 100 | 135 | 11 | 2365,09                   | 2169,27 | -       | 2980,38 | 3106,12 |
| 4  | 100 | 130 | 12 | 2288,07                   | 2424,72 | -       | 3122,89 | 3334,49 |
| 5  | 100 | 128 | 13 | 2647,16                   | 2344,11 | -       | 3073,13 | 3402,99 |
| 6  | 100 | 120 | 14 | 3341,81                   | 2487,91 | -       | 3646,19 | 3590,57 |
| 7  | 100 | 127 | 15 | 2779,96                   | 2438,31 | -       | 3619,17 | 3612,19 |
| 8  | 100 | 112 | 16 | 2831,07                   | 2602,63 | -       | 3979,82 | 3718,97 |
| 9  | 100 | 111 | 17 | 3424,83                   | 2649,22 | -       | 4566,19 | 3966,95 |
| 10 | 100 | 100 | 18 | 2868,19                   | 2678,05 | -       | 4488,36 | 3702,15 |

Позначення: n – кількість сенсорів; R – радіус покриття ТА; k – кількість кластерів.

Алгоритми: 1 – найближчого сусіда; 2 – СНІН; 3 – повного перебору; 4 – спіралі; 5 – FPPWR

Правила побудови траєкторії польоту між кластерами мережі та в кластерах.

Пропонується розвиток правил побудови траєкторії польоту ТА і обміну даними з вузлами, які запропоновані в роботах [6–8]. Їх класифікацію наведено на рис. 4.



Рис. 4. Класифікація бази правил за побудовою траєкторії польоту ТА

За цільовими функціями управління процесу збору даних правила поділяються на:

мережіві:

мінімум або обмеження часу збору даних  $T_{зб}$  (1);

максимум або обмеження часу функціонування мережі  $T_{ф}$  ТА (2);

мінімум або використання заданої кількості ТА (3);

у k-му кластері:

мінімум або обмеження часу збору даних

$T_{зб}(k)$  у k-му кластері;

мінімум середньої енергії передачі вузлів у кластері;

мінімум або визначена кількість кластерів.

За параметрами управління:

кількість кластерів, площа кластера, кількість вузлів у кластері (визначає рівень навантаження на ТА і можливість його перерозподілу);

висота, швидкість, напрямок польоту ТА;

положення зависання ТА у просторі в кластері відносно вузлів кластера, висота та швидкість польоту (визначає час прибуття в заданий район та початок виконання завдання);

енергія витрат вузлів на передавання, обсяг даних моніторингу, розташування кластерів;

розташування вузлів відносно траєкторії польоту ТА в кластері;

порядок обслуговування вузлів у кластері під час переміщення за визначеною траєкторією;

потужність передавання (визначає витрати енергії ТА і вузлів у процесі передавання).

*За управляючим впливом* – зміна положення, напряму та висоти польоту ТА, зміна потужності передавання, зміна діаграми спрямованості антени, перерозподіл відстані між вузлами кластера та точки зависання ТА, зміна відстані між ТА і вузлом тощо.

Розглянемо кілька основних правил з управління переміщенням ТА, які умовно поділені на групи, які реалізують відповідні цілі управління.

*Правила 1-ї групи – забезпечення мінімального (даного) часу збору даних.*

**Правило 1.1.** Якщо ЦФ  $T_{зб} \rightarrow \min$  ( $T_{зб} \leq T_{зб\text{зад}}$ ), тоді знайти мінімальну (визначену) кількість кластерів за алгоритмом FOREL через максимальний (визначений)  $R$ .

**Правило 1.2.** Якщо ЦФ  $T_{зб} \rightarrow \min$ , тоді знайти базовий найкоротший маршрут між центрами кластерів мережі (пропонується використовувати алгоритм СНН [14]).

**Правило 1.3.** Якщо ЦФ  $T_{зб} \rightarrow \min$  та базовий маршрут пролягає за центрами кластерів і є можливість зменшити довжину маршруту (через взаємне розташування кластерів), тоді скоротити базовий маршрут та побувати маршрут між центрами кластерів мережі.

**Правило 1.4.** Якщо ЦФ  $T_{зб} \rightarrow \min$ , тоді встановити максимальну швидкість руху ТА між кластерами.

**Правило 1.5.** Якщо ЦФ  $T_{зб} \rightarrow \min$ , тоді розрахувати та вибрати краще рішення за рухом ТА та обміну даними з варіантів:

А) проліт через центр кластеру – установити максимальну швидкість руху ТА в кластері, яка відповідає вимогам обміну

даними з вузлами (час обміну з вузлом має бути не меншим за час польоту вузла з підтриманням радіозв'язності).

Б) знайти точки зависання в кластері для обміну даними з вузлами, які завдяки керуванню швидкістю передавання зменшують час обміну, побудувати траєкторію обліоту цих точок з максимальною швидкістю.

**Правило 1.6.** Якщо необхідно зменшити час передавання в радіоканалі *вузол-ТА* (підвищити пропуску здатність радіоканалу), тоді необхідно розмістити ТА ближче до вузла.

*Правила 2-ї групи – по максимізації (забезпеченню заданого) часу функціонування мережі спрямовані на зниження витрат енергії вузлів через зменшення відстані в радіоканалі між вузлом і ТА, перерозподілу витрат енергії між вузлами.*

**Правило 2.1.** Якщо ЦФ  $T_{\phi} \rightarrow \max$  ( $T_{\phi} \geq T_{\phi\text{зад}}$ ), тоді знайти максимальну (певну) кількість кластерів (використовувати FOREL з мінімальним (певним) радіусом покриття ТА).

**Правило 2.2.** Якщо ЦФ  $T_{\phi} \rightarrow \max$ , тоді визначити інтервал обміну вузла на траєкторії польоту ТА, який знаходиться на найближчій відстані від вузла.

**Правило 2.3.** Якщо  $T_{\phi} \rightarrow \max$  ЦФ та кілька вузлів конкурують за інтервали обміну на траєкторії польоту, тоді надавати інтервал обміну вузла на траєкторії польоту ТА, який знаходиться на найближчій відстані від вузла, вузлу з мінімальним ресурсом батареї.

**Правило 2.4.** Якщо вузол має малий ресурс енергії батареї, то забезпечити обмін даними між ТА і вузлом на мінімальній відстані.

**Правило 2.5.** Якщо вузол має критичний рівень енергії батареї та він далеко знаходиться від траєкторії польоту, тоді змінити траєкторію ТА для зменшення відстані між вузлом і ТА.

**Правило 2.6.** Встановити потужність передавання між вузлом і ТА на мініальному рівні.

**Правило 2.7.** За наявності радіозв'язності групи вузлів у кластері сформувати “підкластер” (кооперативна робота близько розташованих між собою вузлів), формування головного вузла в підкластері (який знаходиться ближче до траєкторії польоту ТА і організує збір даних від вузлів підкластеру та передавання на ТА).

*Правило 3-ї групи – забезпечення якості обслуговування збору даних.*

**Правило 3.1:** Якщо час передавання всіх вузлів кластера менший (більший) від часу польоту ТА над кожним вузлом, тоді обрахувати та збільшити (зменшити) швидкість польоту ТА.

Для скорочення перебору можливих варіантів траєкторії польоту ТА і визначення точок (інтервалів обміну) запропонована множина метаправил досягнення певних цільових функцій управління згідно з їх пріоритетом.

Імітаційна модель процесу збору даних ТА з вузлів БСМ. Запропонована імітаційна модель (створена в програмному середовищі С#) функціонування ТА в процесі збору даних з вузлів БСМ. Логіка її роботи відповідає алгоритму функціонування запропонованої моделі та включає в себе такі етапи:

генерація координат заданої множини вузлів на визначеній площині;

кластеризація бездротової сенсорної мережі згідно з цільовими функціями управління та визначення первинних точок обміну даними ТА з вузлами кластера;

побудова базового найкоротшого маршруту в мережі між точками обміну за алгоритмом СНІН;

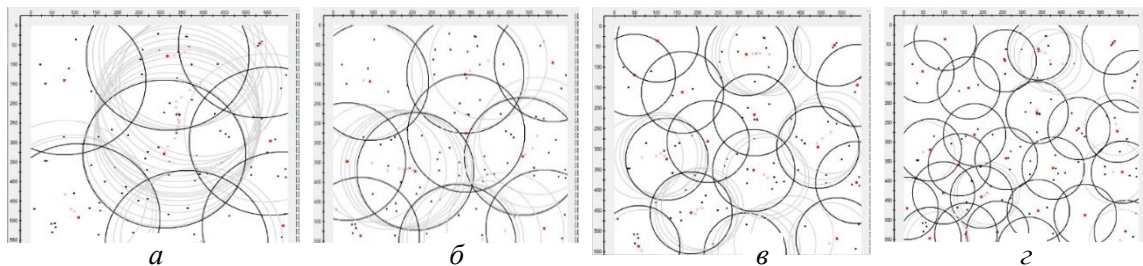
побудова траєкторії польоту ТА між кластерами та в кластерах за допомогою

коригування базового маршруту згідно із запропонованими правилами (евристиками) для реалізації певних цільових функцій, їх пріоритету та визначення додаткових точок (інтервалів) обміну згідно з розробленими правилами;

визначення швидкості та висоти польоту ТА, інтервалів і графіка передавання даних між ТА і вузлами в кластері згідно із запропонованими правилами.

*Вихідні дані:* площа БСМ –  $600 \times 600$  ум. од.;  $n = 100, 200, 500$ ; початкова енергія вузлів –  $e_0 = 0,1 \cdot J$ , максимальна дальність радіозв'язку вузол-ТА  $d_{\max} = 250m$ , висота польоту ТА  $h = 50 \div 250m$ , швидкість польоту  $v = 0 \div 10m/c$ , кількість раундів обльоту мережі – 10000, MAC-протокол – IEEE 802.11g, обсяг даних моніторингу вузла  $V_{DMi} = 100 Kб$ .

На 1-му етапі проводиться кластеризація БСМ за допомогою алгоритму FOREL через адаптацію зони покриття (висоти польоту ТА) відповідно до ЦФУ.



**Рис. 5.** Кластеризація сенсорної мережі різними радіусами покриття

Варіанти кластеризації мережі зображені на рис. 5:

5, а – для  $R=190$ , отримано  $K=8$  кластерів – рішення отримує мінімум кластерів та відповідно задовольняє ЦФУ (1);

5, б – для  $R=150$ ,  $K=9$  кластерів – рішення при багатокритеріальній оптимізації для пріоритету ЦФУ (1);

5, в – для  $R=100$ ,  $K=15$  кластерів – рішення при багатокритеріальній оптимізації для пріоритету ЦФУ (2);

5, г – для  $R=80$ ,  $K=25$  кластерів – рішення отримує максимум кластерів та відповідно задовольняє ЦФУ (2).

Після кластеризації мережі визначаються точки збору даних (базове

рішення – центри кластерів, рішення коригується на 3-му етапі).

На 2-му етапі центр управління мережею буде базовий найкоротший маршрут обльоту точок збору даних у БСМ за допомогою евристичного алгоритму пошуку найкоротшого шляху СНІН [14] у кластеризованій мережі. На рис. 6 наведена візуалізація кількох результатів моделювання процесу побудови маршрутів ТА під час обльоту центрів кластерів БСМ з кластерами радіусів  $R=190, 150$  і  $100$  та доведена адекватність імітаційної моделі пошуку маршруту алгоритму функціонування СНІН (рис. 6).



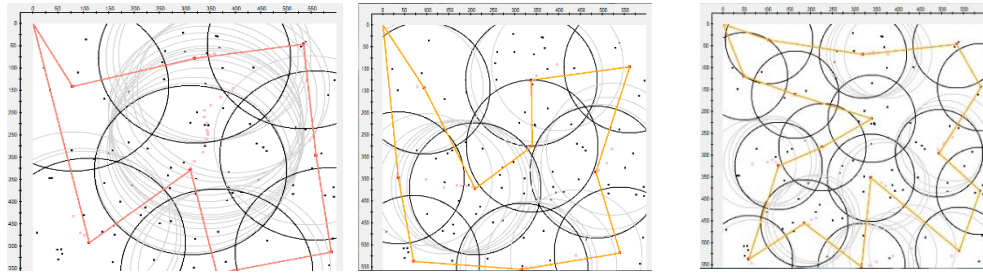


Рис. 6. Результати реалізації алгоритму пошуку маршруту СНН

На 3-му етапі під час підльоту до наступного кластера ТА коригує параметри свого обльоту (траєкторію, швидкість, порядок обслуговування вузлів тощо), визначає точки (відрізки траєкторії польоту) згідно з базою правил залежно від: кількості вузлів в кластері, параметрів вузлів кластера (місцеположення, енергія батарей та обсяги даних), наявних ресурсів ТА (енергії та часу, що залишився на політ), пріоритету цільових функцій управління мережею.

Далі моделюється обліт ТА вузлів БСМ та проводяться розрахунки обсягів витрат енергії вузлів за моделлю витрат, наведеної в [5, 9] та обчислюється час збору даних.

На рис. 7 продемонстровано моделювання стратегій обміну даними ТА з вузлами кластера:

обмін у центрах кластерів по ходу траєкторії польоту – рис. 7, а;

обмін у точці (інтервалі) траєкторії, яка ближче до вузла – рис. 7, б, правило 2.2;

обмін з вузлом кластера, який зібрав дані моніторингу від вузлів свого підкластера – рис. 7, в, правило 2.7;

обмін з вузлами, які знаходяться ближче до траєкторії польоту та заздалегідь зібрали дані зі своєї підмережі до підльоту ТА рис. 7, г, правила 2.2 та 2.7.

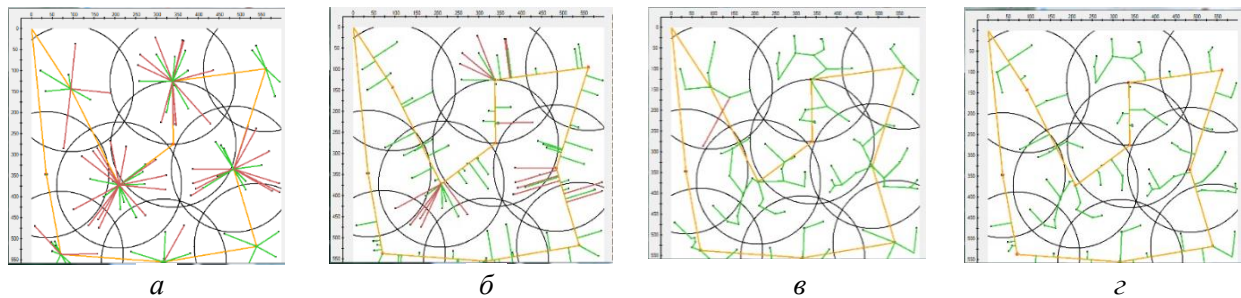


Рис. 7. Демонстрація різних стратегій збору даних моніторингу ТА

Проведені дослідження ефективності запропонованої моделі за різних вихідних даних: розмірність мережі, кількість кластерів, кількість вузлів у кластері, обсяг даних моніторингу, варіанти побудови маршрутів обльоту, стратегії обльоту вузлів у кластері тощо. Результати моделювання вдосконаленої моделі збору даних ТА порівняно з існуючими моделями [4–6] показали, що час збору даних з вузлів ТА при цьому зменшується на 10–15 % (через зменшення точок обльоту) або збільшується час функціонування мережі на 12–16 % (завдяки відповідним правилам обльоту) за умови виконання визначених обмежень.

**Висновки.** Запропонована вдосконалена модель побудови пошуку траєкторії польоту ТА для збору даних з вузлів БСМ. Новизна отриманих результатів полягає в такому:

на першому етапі моделі за допомогою модифікованого алгоритму кластерного

аналізу FOREL [15] множина сенсорів розбивається на певну кількість кластерів та визначаються точки збору даних ТА у просторі;

на другому етапі будується базовий маршрут траєкторії польоту ТА за точками збору даних з використанням евристичного алгоритму Convex Hull Insertion Heuristic [14], який завдяки своїм особливостям дає кращі результати в кластеризованій мережі;

на третьому етапі будується траєкторія польоту ТА в кластерах згідно із запропонованими евристичними правилами, які реалізують певні цільові функції управління (корегується базовий маршрут обльоту мережі), визначаються додаткові точки (відрізки траєкторії) збору даних.

Проведене оцінювання ефективності запропонованої моделі показало зменшення часу збору даних на 10–15 % або підвищення

часу функціонування мережі на 12–16 % за умови задоволення визначених обмежень.

**Надалі** пропонується розробити модель пошуку траєкторії польоту ТА для збору даних з мобільних безпроводових сенсорних вузлів-роботів.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 20 серпня 2021 року “Про Стратегічний оборонний бюлетень України” : Указ Президента України від 17.09.2021 р. № 473/2021. Офіційний сайт Президента України. URL: <https://www.president.gov.ua/documents/4732021-40121> (дата звернення: 12.01.2022).
2. Popescu D., Stoican F., Stamatescu G., Chenaru O., Ichim L. A Survey of Collaborative UAV-WSN Systems for Efficient Monitoring. *Sensors*. 2019. Vol. 19, Issue 21. DOI: <https://doi.org/10.3390/s19214690>.
3. Jawhar I., Mohamed N., Al-Jaroodi J. UAV-based data communication in wireless sensor networks: Models and Strategies : International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). Published 9. June 2015.
4. Киричек Р. В. Разработка и исследование комплекса моделей и методов для летающих сенсорных сетей : дис. ... д-ра техн. наук : 05.12.13. Санкт-Петербург, 2017. 316 с.
5. Zhan C., Zeng Y., Zhang R. Energy-Efficient Data Collection in UAV Enabled Wireless Sensor Network. *IEEE Wireless Communications Letters*. August 2017. P. 99. DOI: 10.1109/LWC.2017.2776922.
6. Dac-Tu Ho, Esten Ingar Grotli, Tor Arne Johansen. Heuristic Algorithm and Cooperative Relay for Energy Efficient Data Collection with a UAV and WSN. URL: [http://folk.ntnu.no/torarnj/ho\\_2013.pdf](http://folk.ntnu.no/torarnj/ho_2013.pdf) (дата звернення: 15.01.2022).
7. Increasing the efficiency of data gathering in clustered wireless sensor networks using UAV / V. Romaniuk, O. Lysenko, A. Romaniuk, O. Zhuk. *Information and telecommunication sciences*. 2020. Vol. 11, No. 1. P. 102–107. DOI: <https://doi.org/10.20535/2411-2976.12020.102-107>.
8. Synthesis of data collection methods by telecommunication airplatforms in wireless sensors networks / V. A. Romaniuk, A. V. Romaniuk, O. I. Lysenko, M. K. Sparavalo, O. V. Zhuk. *Information and Telecommunication Sciences*. 2020. № 2. P. 63–73. URL: <http://infotelesc.kpi.ua/article/view/221266> (дата звернення: 14.01.2022).
9. Vipin Pal, Girdhari Singh, Rajender Prasad Yadav. SCHS: Smart Cluster Head Selection Scheme for Clustering Algorithms in Wireless Sensor Networks. *Wireless Sensor Network*. November 2012. Vol. 4, No. 11. P. 273–280. URL: <http://dx.doi.org/10.4236/wsn.2012.411039> (дата звернення: 14.01.2022).
10. Jodeh Nidal M. Optimal UAS Assignments and Trajectories for Persistent Surveillance and Data Collection from a Wireless Sensor Network : Theses and Dissertations. 2015. URL: <http://scholar.afit.edu/etd/242> (дата звернення: 10.01.2022).
11. Wu Yue, Zhu Jiang. Path Planning for UAV to Collect Sensors Data Based on Spiral Decomposition. *Procedia Computer Science*. 2018. Vol. 131. P. 873–879. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.04.291>.
12. Chengliang W, Jun-hui Y. Path Planning for UAV to Collect Sensor Data in Large-Scale WSNs. *Transaction of Beijing Institute of Technology*. 2015. Vol. 35. P. 1044–1049.
13. Isaacs J. T., Hespanha J. P. Dubins Traveling Salesman Problem with Neighborhoods: A Graph-Based Approach. *Algorithms*. 2013. Vol. 6. P. 84–99.
14. Kumar Nitesh and Prasanta K. Jana Convex hull based trajectory design for mobile sink in wireless sensor networks. *Published Online*. December 19, 2018. P. 26–36.
15. Загоруйко Н. Г. Прикладные методы анализа данных и знаний. Новосибирск : ИМ СО РАН, 1999. 270 с.
16. Weihuang Huang, Jeffrey Xu Yu. Investigating TSP Heuristics for Location-Based Services. *Data Sci. Eng.* March 2017. Vol. 2. P. 71–93. DOI: 10.1007/s41019-016-0030-0.
17. Energy-Efficient Wireless Sensor Network with an Unequal Clustering Protocol Based on a Balanced Energy Method (EEUCB) / Ahmed A. Jasim [et al]. *Sensors*. 2021. Vol. 21. P. 784. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21030784>.

Стаття надійшла до редакційної колегії 21.02.2022

### **Flight trajectory search model of a telecommunications aerial platform for collecting data from nodes of a clustered military wireless sensor network**

#### **Annotation**

In conditions of high dynamics of hostilities, the advantage can be achieved only if the operational information about the current situation is available to officials of all levels of government. Therefore, intensive development of wireless sensor networks (WSN) is currently underway. WSN is designed to work for months or even years in hard-to-reach remote areas. In such conditions, telecommunication air platforms (TAP) are used to collect data from network nodes.

An improved model for constructing a TAP flight search for data collection from WSN nodes is proposed. The novelty of the results is as follows:

at the first stage of the model, using a modified algorithm of cluster analysis FOREL, the set of sensors in the area is divided into a number of clusters and determine the data collection points TAP in space;

in the second stage, the basic route of the TAP flight trajectory is constructed at data collection points using the Convex Hull Insertion Heuristic algorithm, which, due to its features, gives the best results in a clustered network;

at the third stage the TAP flight trajectory is built in clusters according to the proposed heuristic rules, which implement certain target control functions, the basic network flight route is adjusted, additional points (trajectory segments) of data collection are determined.

Evaluation of the effectiveness of the proposed model showed a reduction in data collection time by 10–15 % or increase the network operation time by 12–16 % while meeting certain restrictions.

**Keywords:** wireless sensor networks; clustering; FOREL; flight trajectory; telecommunication air platform; data collection.