

УДК 621.396.4

д-р техн. наук, професор Романюк В. А. ORCID: 0000-0002-6218-2327 (ВІТІ ім. Героїв Крут)  
д-р філософії Гримуд А. Г. ORCID: 0000-0003-4012-5185 (НУОУ)

## АЛГОРИТМИ ПОБУДОВИ ТРАЄКТОРІЇ КОМУНІКАЦІЙНОЇ АЕРОПЛАТФОРМИ ДЛЯ ЗБОРУ ДАНИХ З ВУЗЛІВ БЕЗПРОВОДОВОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ

Пропонується рішення задачі побудови траєкторії польоту комунікаційної аероплатформи для збору даних моніторингу з вузлів незв'язної безпроводової сенсорної мережі великої розмірності для досягнення різних цільових функцій: мінімізація часу збору або максимізація часу функціонування мережі. Задача вирішується послідовно за застосуванням визначеної послідовності алгоритмів: кластеризації, пошуку найкоротшого шляху та його корегування за визначеними евристичними. Отримання допустимих рішень в реальному часі базується на застосуванні множини розроблених алгоритмів (евристич), які враховують взаємне розташування вузлів, наявність енергії їх батарей та об'єм трафіка моніторингу. Для оцінки ефективності застосування алгоритмів побудови траєкторії польоту та збору даних розроблена відповідна імітаційна модель. Отримані залежності показників ефективності (час збору даних, витрати енергії батарей, час функціонування мережі) на множині алгоритмів побудови траєкторії збору даних комунікаційною аероплатформою при різних вхідних даних. Результати імітаційного моделювання довели можливість зменшення часу збору даних до 20 % або підвищення часу функціонування мережі до 15 % порівняно з існуючими рішеннями.

**Ключові слова:** безпроводова сенсорна мережа, комунікаційна аероплатформа, збір даних, траєкторія польоту, алгоритми побудови траєкторії.

### *V. Romaniuk, A. Hrymud Algorithms for designing a trajectory of a communication aerial platform for collecting data from wireless sensor network nodes*

Algorithms are proposed for solving the problem designing the flight path of a communication aerial platform for collecting monitoring data from the nodes of a large-scale disconnected wireless sensor network to achieve various objective functions: minimizing the collection time or maximizing the network operation time. To achieve the given objective functions, the problem is solved by applying a certain sequence of algorithms: clustering, finding the shortest path and its correction according to the defined heuristics. Obtaining admissible solutions in real time is based on the application of a set of developed algorithms (heuristics), which take into account the relative location of nodes, the energy level of their batteries, and the volume of monitoring data. In order to evaluate the efficiency of the application of flight path construction and data collection algorithms, a corresponding simulation model was developed. The obtained dependences of efficiency indicators (data collection time, battery energy consumption, network operation time) on a set of algorithms for building the spacecraft data collection trajectory with different input data. The results of simulations proved the possibility of reducing data collection time by up to 20 % or increasing network operation time by up to 15 % compared to existing solutions.

**Keywords:** wireless sensor network, communication aerial platform, data collection, flight trajectory, algorithms for trajectory construction.

**1. Постановка завдання.** Останні роки відбувається швидкий розвиток технологій безпроводових сенсорних мереж (БСМ). БСМ застосовуються для рішення багатьох задач моніторингу параметрів об'єктів (територій): спостереження за станом полів агрокультур, лісів, продуктопроводів, ліній електропередач, кордонів; пошуково-рятувальних та військових операцій тощо.

Особливістю БСМ [1–3] є обмеженість ресурсів сенсорних вузлів за енергією батареї, швидкістю процесора, обсягом пам'яті, потужністю передавача тощо. Сучасні БСМ налічують сотні (тисячі) сенсорних вузлів. Застосування класичної архітектури БСМ (передача даних моніторингу за маршрутами від вузлів до шлюзу) не завжди представляється можливим або економічно доцільним. Наприклад, у районах, які постраждали від надзвичайної ситуації, зайнятих противником, відсутня можливість використання комунікаційної інфраструктури загального користування для організації зв'язку зі шлюзом та немає можливості побудувати зв'язну топологію всієї мережі в умовах значної відстані між вузлами.

Для цих випадків для збору даних з вузлів доцільно застосовувати КА (комунікаційну аероплатформи, КА) в якості мобільного повітряного шлюзу [1–4]. При цьому виникає актуальна наукова задача підвищення ефективності алгоритмів побудови траєкторії обльоту КА вузлів мережі для збору даних з метою досягнення певних цільових функцій (ЦФ): мінімізації часу збору даних та/або мінімізації споживання енергії вузлів (максимізації часу функціонування мережі) [3–5, 21]. Розв'язання цієї задачі дозволить оптимізувати параметри системи управління процесом збору даних та в цілому покращити його ефективність.

**2. Аналіз останніх публікацій.** Використання КА для збору даних у видалених БСМ великої розмірності є відомим рішенням та розглядається з різних боків у багатьох публікаціях [1–16].

Перша група публікацій [5, 6] розглядає два способи рішення задачі побудови траєкторії польоту КА:

1. Обліт всієї території розміщення вузлів БСМ [5] за різними моделями – по горизонталі, спіраллю, зигзагом, за кривою Гільберта тощо;
2. Обліт більшості території (кількості вузлів) з врахуванням обмеження на граничний час польоту КА (запропоновані тракторна, вуглова, кругова, квадратна моделі польоту КА [6]).

Основний недолік способу збору даних за обльотом території – значний час збору даних. Однак цей спосіб буде застосовуватися при первинному обльоті КА мережі для визначення фактичних параметрів вузлів (координати положення, рівень енергії батарей, обсяг даних моніторингу).

Наступна група публікацій [7–10] розглядає побудову траєкторії польоту КА при збиранні даних з вузлів лише як рішення класичної задачі комівояжера – пошук найкоротшого маршруту між початковою та кінцевою точкою польоту ТА з прольотом через вузли або точки збору даних (центри кластерів). Ця задача відноситься до класу NP-складних. Отримання точного рішення мережі значної розмірності проблематично. Тому на практиці пропонують евристичні алгоритми отримання наближеного рішення, які мають незначну обчислювальну складність: евристики Лин-Кернигана (Lin-Kernighan traveling salesman heuristic, LKH) [8], найближчого сусіда (Near Neighboring, NN) [9], за спіраллю (Spiral Decomposition) [10], за клітинками (Fast Path Planning with Rules, FPPWR) [11], випуклої оболонки (Convex Hull Insertion Heuristic, СНІН) [12], мурашиний алгоритм [13], генетичний алгоритм [14], алгоритм рою частинок [15] тощо. Однак за такою постановкою задачі обчислюється тільки найкоротший маршрут польоту, але не враховується стан параметрів вузлів, не здійснюється оптимізація енерговитрат вузлів. Тому застосування алгоритму пошуку найкоротшого шляху доцільно використовувати для початкового (базового) рішення та його подальшого покращення.

Третя група публікацій визначає [16–21] два основних підходи для підвищення ефективності збору даних КА з вузлів БСМ великої розмірності:

1. Збір даних КА безпосередньо з кожного вузла за рахунок створення віртуальних кластерів у місцях фактичного розташування вузлів;
2. Збір даних КА тільки з головних вузлів реальних кластерів мережі.

При першому підході (при відсутності зв'язності між вузлами) центр управління мережею розраховує тимчасові кластери (локальні радіомережі: КА-вузли кластеру) та в процесі польоту їх фактично формує КА (повітряний шлюз). При другому – при наявності радіозв'язності між сенсорними вузлами відбувається самоорганізація мережі та її розбиття на реальні фізичні кластери з визначенням головних вузлів кластерів (за відомими алгоритми кластеризації LEACH, HEED тощо) [16], які збирають дані з простих вузлів-моніторингу. КА облітає та збирає дані тільки з головних вузлів кластерів. Далі будемо враховувати обидва підходи.

В публікаціях [17–21] досліджуються особливості окремих етапів процесу збору даних та способи досягнення цільовими функціями: мінімум часу збору, максимум покриття площі (кількості вузлів) тощо.

В [17] досліджується задача зменшення час збору даних завдяки послідовному додаванню потенційно можливих точок зависання. Однак перебір варіантів точок зависання призводить до значної обчисленої складності, тому запропоновані рішення можуть бути використані в мережі малої розмірності.

В [18] досліджується декілька стратегій побудови точок збору даних з вузлів кластерів та траєкторії польоту КА в тимчасовій кластеризованій БСМ: через центр кластера, збір даних на траєкторії польоту на найближчій відстані від вузла до КА, політ через критичні вузли в кластерах, політ із зависанням в одній точці збору, яка мінімізує сумарну енергію витрат вузлів, тощо. Однак автори не розглядають можливість побудови декількох точок збору даних у кластері, оптимізацію інтервалів обміну, оптимізацію декількох цільових функцій.

В [19] розглядаються правила (евристики) скорочення траєкторії КА за рахунок врахування наряду переміщення КА та розташування вузлів у кластері. Подальші вдосконалення цих правил та оцінка їх ефективності будуть наведені далі в статті.

В [20] використовується глибока нейронна мережа для знаходження 3D-траєкторії польоту ТА з врахуванням якості радіоканалу, однак множина показників ефективності процесу збору не розглядається.

В [21] пропонується досягати цільової функції послідовно за рівнями ієрархії: мережа, кластер, КА, група вузлів, окремий вузол. На мережевому рівні оптимізація показників ефективності відбувається визначенням кількості кластерів та їх розмірів, побудовою найкоротшого маршруту обльоту. На рівнях КА-група вузлів та КА-вузол визначається відстань, яка дозволяє оптимізувати час обміну між ними та витрати енергії (запропоновані правила корегування точок (інтервалів) збору даних траєкторії). Для зменшення варіантів перебору та скорочення часу знаходження рішення по траєкторії обльоту вузлів та збору даних запропонована відповідна база правил прийняття рішень. Однак оцінка ефективності застосування правил та вагового визначення їх пріоритету не наведена.

Таким чином, невирішеним завданням при розгляді правил побудови траєкторії польоту КА, є оцінка ефективності їх застосування та визначення порядку (пріоритету) застосування для побудови траєкторії збору даних визначеної БСМ для досягнення двох основних критеріїв оптимізації: мінімізації часу збору даних та максимізації часу функціонування мережі.

**Метою статті** є аналіз ефективності та послідовності застосування алгоритмів (правил) побудови траєкторії польоту КА для збору даних з вузлів БСМ при досягненні визначених цільових функцій.

**Виклад основного матеріалу.** Розглядається стаціонарна безпроводова сенсорна мережа значної розмірності (сотні сенсорних вузлів) спеціального призначення. Кожен сенсорний вузол складається з наступних основних елементів: батарея, множина сенсорних датчиків (наприклад, вібраційний, магнітний, акустичний тощо), процесор, пам'ять, прийомопередавач, антена, система позиціонування, система управління.

В процесі свого функціонування кожний сенсорний вузол здійснює збір та зберігання параметрів навколишнього середовища (об'єктів спостереження) визначеної йому зони моніторингу. Кількість параметрів збору визначається типом сенсорних модулів, а частота та способи збору даних (за подіями, періодично, постійно) визначаються наземним центром управління мережею (ЦУМ).

Вузли БСМ випадковим чином розташовані на певній території та не мають можливості встановити зв'язну топологію для передачі даних до шлюзу з різних причин: значна відстань між ними, специфіка рельєфу місцевості, відсутність будь-якої комунікаційної інфраструктури загального користування, необхідність виконувати режим радіомовчання,

економічна недоцільність встановлення та експлуатації шлюзів тощо. Тобто в цих умовах топологія сенсорної мережі буде складатись з окремих незв'язних вузлів та/або окремих незв'язних фрагментів (кластерів) мереж. Вузли в зв'язних кластерах (при наявності у них відповідної системи управління, яка здатна реалізувати алгоритми самоорганізації) можуть вводити ієрархію управління: формувати головні вузли кластерів, які будуть збирати та зберігати дані з інших так званих простих вузлів кластера [16].

Для БСМ з незв'язною топологією роль мобільного шлюзу виконує безпілотний літальний апарат, оснащений додатковим обладнанням для реалізації процесу збору даних з сенсорних вузлів: процесор, пам'ять, прийомопередавач, антена, система позиціонування, відповідна система управління (комунікаційна аероплатформа).

На етапі планування ЦУМ розраховує траєкторію польоту КА та визначає на ній попередні точки (відрізки) збору даних з вузлів у просторі. В процесі польоту КА, завдяки спрямованій антені на висоті  $h_k(t)$ , формує тимчасові кластери (зони покриття та радіозв'язності)  $C_k(t)$ ,  $k = 1 \dots K$  вузлів з радіусом  $R_k(t)$ , тобто створює тимчасові локальні радіомережі з повітряною точкою доступу (КА). Якщо в процесі польоту КА в поточну зону радіозв'язності потрапляють окремі вузли (головні вузли реальних кластерів фрагментів мережі), тоді вона встановлює з ними радіозв'язок (згідно з МАС-протоколом), визначає графік обміну та визначає (або корегує) точку (інтервал) траєкторії обміну. При підльоті КА до точки (інтервалу) збору даних на траєкторії відбувається процес обміну даними вузла-КА (рис. 1).

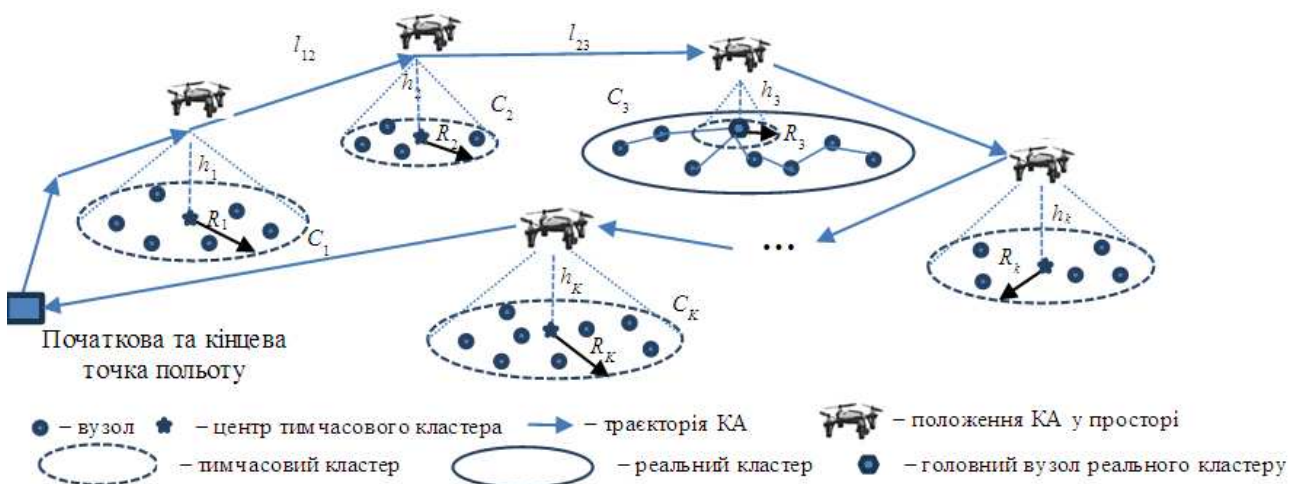


Рис. 1. Приклад траєкторії польоту КА для збору даних з вузлів (головних вузлів) кластерів

Задано:

1. Характеристики безпроводової сенсорної мережі:

- площа розташування БСМ ( $S$ ) та вигляд її геометричної фігури (наприклад, прямокутна, смуга, коло, довільна тощо);
- кількість вузлів мережі (незв'язних та/або головних вузлів реальних кластерів), координати їх розміщення на місцевості  $(x_i, y_i)$ ,  $i = 1 \dots N$ ;
- щільність розміщення вузлів  $\alpha = \bigcup_{k=1}^K \pi R_k^2 / S$  вузлів (де  $R_k$  – радіус  $k$ -ої зони покриття КА,  $k = 1 \dots K$ ) та тип їх розміщення (однорідний, з угрупованням тощо);
- обсяг зібраних даних моніторингу кожним  $i$ -м вузлом –  $V_{dmi}$ .

2. Характеристики вузла:

- технічні характеристики вузла – кількість та типи сенсорних датчиків, рівень енергії батареї, витрати енергії на моніторинг параметрів середовища для кожного типу датчика тощо;

– комунікаційні характеристики вузла – параметри антени, прийомопередавача, витрати енергії на біт прийому та передачі даних для обраного МАС-протоколу та типу обладнання тощо.

3. Характеристики комунікаційної аероплатформи:

– польотні характеристики – швидкість, висота, час польоту, енергія батареї, можливість зависання та переміщення у просторі з постійною або змінною швидкістю тощо;

– комунікаційні характеристики – МАС-протокол, параметри прийомопередавача тощо.

4. Цільові функції управління (1 – 4) збором даних, які реалізуються ЦУМ [21]:

– мінімізація часу збору даних  $T_{col}$

$$T_{col} = \frac{L}{v} = \sum_{m=1}^M \frac{l_m}{v_m} \rightarrow \min \quad (1)$$

при забезпеченні заданого часу функціонування мережі  $T_{fun} \geq T_{fungiv}$ ,

$l_m, v_m, m = 1 \dots M$  – інтервали траєкторії між точками збору даних та швидкість польоту;

– максимізація часу функціонування мережі  $T_{fun}$  за рахунок зниження (перерозподілу) витрат енергії вузлів  $e_{coni}$

$$T_{fun} \rightarrow \max \quad (E_{con} = \sum_{i=1}^N e_{coni} \rightarrow \min) \quad (2)$$

при забезпеченні заданого часу збору даних  $T_{col} \leq T_{colgiv}$ ;

$$\text{– оптимізація обох критеріїв} \quad \begin{cases} T_{col} \rightarrow \min \\ T_{fun} \rightarrow \max \end{cases} \text{ або} \quad (3)$$

$$\text{отримання допустимого рішення } T_{col} \leq T_{colgiv} \text{ та/або } T_{fun} \geq T_{fungiv}, \quad (4)$$

при обмеженнях  $\Omega$  на:

– тип літального апарату (роторний); швидкість  $v=[v_{\min}, v_{\max}]$ , висота  $h=[h_{\min}, h_{\max}]$ , час  $t_{fly} \leq t_{fly\max}$  та дальність його польоту  $L \leq L_{\max}$ ;

– кількість кластерів у мережі –  $1 \leq k \leq K$ ;

– початкову енергію батарей вузлів  $e_i \leq e_{\max}$  та КА  $e_{KA} \leq e_{KA\max}$ ;

– обсяг даних моніторингу кожного  $i$ -го вузла –  $V_{dmi} \leq V_{dm\max}$ ;

– дальність радіозв'язності вузол-КА –  $d_{i-TA} \leq d_{\max}$  – розглядається поширення радіохвиль в умовах прямої видимості;

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

Час функціонування мережі  $T_{fun}$  може визначатися наступними показниками:

а) періодом стабільного функціонування мережі  $T_{psa}$  (5) – час функціонування мережі (моніторинг та передача даних в кожному раунді обльоту КА) до відмови першого вузла внаслідок виснаження його батареї:

$$T_{psa} = \min_{i \in N} t_{funi}(Nround), \quad (5)$$

де  $t_{funi}$  – час функціонування  $i$ -го вузла до його відмови, який визначається кількістю раундів обльоту ( $Nround$ );

б) відсотком вузлів, які відмовили (6) відносно кількості раундів обльоту КА

$$T_{fun} = \frac{N_{fail}(Nround)}{N} \text{ у відсотках}, \quad (6)$$

де  $N_{fail}(Nround)$  – кількість вузлів, у яких енергія батареї менша допустимого рівня на  $Nround$  раунді обльоту.

5. Множина способів (правил) побудови траєкторії польоту та збору даних КА з вузлів БСМ.

*Обмеження та вимоги:*

– площа обльоту КА немає заборонених зон, траєкторія її польоту формується у вигляді визначених координат точок у просторі, моделювання процесу польоту КА не розглядається;

– інформація про параметри стану вузлів (координати розміщення, рівень енергії батарей, обсяг даних моніторингу) збирається при первинному обльоті мережі КА, надалі інформація про стан вузлів оновлюється при кожному раунді обльоту;

– КА має можливість збору даних як при зависанні, так і в процесі польоту;

– КА і сенсорні вузли мають радіозасоби з однаковим МАС-протоколом, який дозволяє адаптувати швидкість передачі даних залежно від стану радіоканалу (співвідношення сигнал/шум) та регулювати потужність передачі (витрати енергії на передачу), наприклад, IEEE 802.11;

– обсяги пам'яті сенсорних вузлів, КА достатні для зберігання даних моніторингу;

– рівень енергії батареї КА достатній для здійснення раунду обльоту мережі;

– алгоритми управління процесом збору даних, які реалізуються системами управління вузлів та КА, повинні мати незначну обчислювальну складність через необхідність реалізації автономного польоту КА та забезпечення процесу збору даних у реальному часі.

**Необхідно:** провести аналіз ефективності застосування різних евристик (алгоритмів) побудови (корегування) траєкторії польоту КА для збору даних з вузлів БСМ при досягненні певних цільових функцій.

### Рішення

Множина алгоритмів по досягненню цільових функцій (1)–(4) знаходиться між двома граничними: обліт КА всієї площі розміщення вузлів та обліт КА кожного вузла мережі.



Рис. 2. Взаємозв'язок алгоритмів побудови траєкторії польоту КА

1. Алгоритми обльоту КА всієї території (площі), яку займають вузли БСМ, з одночасним збором даних моніторингу з вузлів мережі. Так дослідження [5, 6] були присвячені аналізу різних варіантів обльоту всієї площі та збором даних з головних вузлів реальних кластерів: за смугами (рис. 3, а), за кутом, за квадратом, за колом. Мета дослідження – знайти варіанти обльоту, які дозволяють скоротити довжину маршруту обльоту, або максимізувати кількість обслугованих (покритих) вузлів за обмежений час польоту КА. Показано, що не існує єдиного оптимального варіанта обльоту: варіант “за смугами” ефективний для максимізації площі покриття БСМ, варіант за колом більш ефективний за часом обльоту. Однак довжина маршруту та час обльоту за всією площею БСМ залишається дуже великим. Наприклад, за результатами проведеного авторами імітаційного моделювання для мережі з 100 вузлів довжина траєкторії КА при обльоті всієї площі по горизонталі при  $R = 100$  складає  $L = 7500$  ум. од., при сумарних витратах енергії вузлів  $E_{con} = 4477$ , при зменшенні радіуса покриття в два рази  $R = 50$  довжина траєкторії вже становить  $L = 11878$ , при зменшенні в два рази витрат енергії до значення  $E_{con} = 2115$  (рис. 2, а), що накладає додаткові вимоги до польотних характеристик літального апарата.

Обліт КА всієї мережі зазвичай буде використовуватися при первинному обльоті мережі для збору вихідної інформації про параметри вузлів мережі (координати положення, обсяг даних моніторингу, рівень енергії батареї тощо).

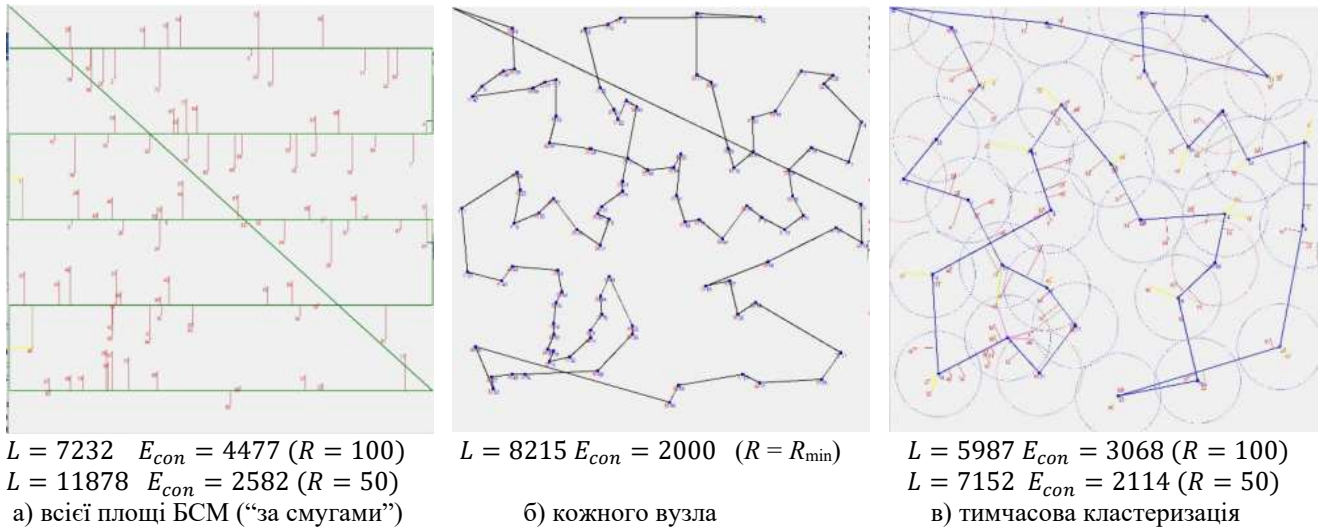


Рис. 3. Моделювання алгоритмів обльоту КА вузлів БСМ

**2. Обліт кожного вузла на мінімальній висоті польоту КА.** В результаті моделювання цього способу отримуємо мінімальні витрати енергії вузлів на обмін даними  $E_{con} = 2000$  (за рахунок  $(R \leq R_{min})$ ) та значну довжину маршруту  $L = 8215$  (рис. 3, б). Цей спосіб доцільно використовувати для мінімізації витрат енергії – ЦФ (2), але при цьому не гарантується виконання обмеження час польоту (збору даних)  $L \leq L_{max}$ . Для рішення задачі пошуку найкоротшого маршруту обльоту кожного з вузлів, можуть бути застосовані різні типи алгоритмів: повного перебору (для БСМ малої розмірності), евристичні (найближчого сусіда – рис. 2, б, за клітинками, зовнішньої оболонки тощо), генетичні, тощо. Кожний з них показує різні результати, залежно від параметрів мережі та особливостей реалізації (наведено далі в п. 3).

Результати моделювання показників оцінки ефективності перших двох способів є граничними та використовуються для порівняння з результатами застосування інших способів.

**3. Алгоритми кластеризації мережі.** Відбувається віртуальна кластеризація мережі, визначаються точки збору даних в кластерах (зазвичай в центрі кластеру) та побудова траєкторії польоту КА між точками збору. Тобто класична задача комівояжера перетворюється на задачу пошуку найкоротшого маршруту (точніше траєкторії) переміщення зони покриття КА з початкової в кінцеву точку польоту, яка забезпечує покриття всіх вузлів (точок на площі) на мінімальній відстані обміну КА з вузлами.

На першому етапі відбувається оптимізація кількості та розмірів кластерів мережі (шляхом визначення висоти польоту КА, діаграми спрямованості антени). Досягнення цільових функцій (1)–(2) має протилежну залежність. Зменшення кількості кластерів призводить до зменшення довжини траєкторії КА, але призводить до збільшення відстані між КА з вузлами кластеру та, відповідно, збільшення витрат енергії вузлів на передачу даних. І навпаки, в якості алгоритмів кластеризації можуть бути визначені FOREL (FORMal ELeMent),  $k$ -середніх та інші. На практиці доцільно використовувати алгоритм FOREL, який будує кластери, що фактично дорівнюють зоні покриття КА. Для отримання базового допустимого рішення пропонується ітераційний алгоритм адаптації розміру зони покриття КА.



ЯКЩО пріоритетна ЦФ  $T_{col} \rightarrow \min$ , ТОДІ визначити максимальне значення радіуса покриття  $R=R_{\max}$  та провести кластеризацію.

ЯКЩО пріоритетна ЦФ  $T_{op} \rightarrow \max$ , ТОДІ визначити мінімальне значення радіуса покриття  $R=R_{\max}$  та провести кластеризацію.

Для рішення двокритеріальної задачі оптимізації (3) пропонується використати лексикографічний метод. Для цього до моменту польоту КА наземний центр управління визначає пріоритет цільових функцій. Пропонується здійснювати пошук оптимального рішення за ієрархією згідно з пріоритетом ЦФ за наступними кроками [21]:

проводиться віртуальна кластеризація мережі згідно з визначеним алгоритмом кластерного аналізу – пропонується використовувати ітераційний алгоритм кластерного аналізу FOREL, який має певні переваги над іншими – мала обчислювальна складність, відповідність поняття кластера фізичному змісту зони покриття КА тощо;

будується найкоротший (або допустимої довжини) маршрут обльоту точок збору даних за певним алгоритмом рішення задачі комівояжера;

визначаються точки (інтервали) збору даних моніторингу КА в кластерах згідно з прийнятою стратегією обльоту кластерів та пріоритету цільових функцій (в простішому випадку точкою збору даних визначається центр кластера).

Відмітимо, що ефективність кінцевого рішення по досягненню цільових функцій та швидкість його отримання значною мірою визначається початковим рішенням по кластеризації (залежить від вибору початкової точки площі та радіусу покриття КА), алгоритму пошуку найкоротшого шляху обльоту, стратегією обльоту КА вузлів у кластері тощо.

Так час збору даних  $T_{col}$  КА з вузлів мережі залежить від наступних параметрів:

$$T_{col} = f(N, K, TR(St_k), v, V_{dmi}, Q_k, INT_i, s_{i-KA}(d_{i-TA}, MAC), h_k, \Omega) \quad (5)$$

– кількості сенсорних вузлів  $s_i = 1 \dots N$  та координат їх розташування на місцевості  $(x_i, y_i)$ ;

– кількості  $k = 1 \dots K$  кластерів, їх площі, кількості вузлів у кластері  $n_k$ , взаємного розташування;

– траєкторії  $TR$  польоту КА в мережі, яка визначається стратегією  $St_k$  обльоту та збору даних з вузлів кожного  $k$ -кластера (збір даних у процесі польоту та/або при зависанні КА, одна або декілька точок зависання в кластері тощо);

– швидкості  $v = \{v_m\}$  польоту КА на кожному з відрізків траєкторії  $l_m, m = 1 \dots M$ ;

– обсягу даних моніторингу  $V_{dmi}$  у вузлах мережі;

– кількості точок збору даних  $Q_k$  з координатами у просторі  $(x, y, h)_k$  в кожному  $k$ -му кластері при зависанні КА;

– локації в просторі та часі інтервалів  $INT_i = \{(x, y, h)_{begin}, (x, y, h)_{finish}, t_{begin}, t_{finish}\}_i$  траєкторії польоту КА, які визначені для збору (обміну) даних у русі з  $i$ -м вузлом;

– швидкості передачі MAC-протоколу  $s_{i-TA}(d_{i-KA}, MAC)$ , яка залежить від відстані  $d_{i-KA}$  та параметрів радіоканалу (співвідношення сигнал/шум), передавача, приймача, антен тощо;

– висоти польоту  $h_k$ , обмежень  $\Omega$  ресурсів вузлів і КА тощо.

Збільшення часу функціонування мережі  $T_{fun}$  може досягатись:

зменшенням енерговитрат вузлів на прийом та передачу даних (зменшенням потужності передачі вузла) шляхом зменшення відстані КА-вузол

$$d_{i-TA} = g(K(R_k), n_k, TR_k, Q_k, INT_i),$$

яка досягається оптимізацією кількості кластерів  $K$  (розміром зони покриття  $R_k$ ), кількістю вузлів у  $k$ -му кластері  $n_k$ , траєкторії  $TR_k$ , положенням точок  $Q_k$  (інтервалів  $INT_i$ ) обміну в кластері;



перерозподілом витрат енергії між конкуруючими за передачу вузлами (якщо вузол має більший рівень енергії батареї, тоді він повинен витрачати більше енергії).

Крім того, при визначенні траєкторії обльоту вузлів кластера та обміну даними необхідно враховувати:

- взаємне розташування вузлів відносно траєкторії (обмін даними бажано робити в найближчих інтервалах траєкторії польоту КА від вузла);
- критичний рівень енергії батареї вузла (планувати обліт “виснажених” вузлів на мінімальній відстані);
- обсяг даних моніторингу вузла – вибір точки (інтервалу) збору траєкторії, які знаходяться ближче до цього вузла.

Для оцінки ефективності запропонованих різних способів (методів, алгоритмів, правил) процесу збору КА даних з вузлів БСМ була розроблена імітаційна модель. Вона написана мовою Python 3.11, має зручний інтерактивним інтерфейс, дозволяє візуально відслідковувати всі етапи процесу збору даних КА з вузлів мережі.

Вихідними даними для моделювання визначені наступні.

1. Характеристики мережі, вузлів, КА (згідно з постановкою задачі):  $S=1000 \times 1000$  умовних одиниць;  $N = 50 \dots 200$ ; розміщення вузлів (однорідне, з групуванням), початкова енергія вузлів та обсяг даних моніторингу  $e_i$ ; витрати енергії вузла на передачу (розраховуються за спрощеною формулою  $e_{con} = c * d_{i-КА}^2$ , де  $c = \text{const}$ ,  $d$  – відстань між вузлом та КА); радіус покриття  $R$ ; дальність радіозв'язності вузол-КА –  $d_{i-КА}$ ; кількість раундів обльоту  $N_{round}$  тощо.

2. Способи (зі всієї площі, з кожного вузла, за кластерами), методи (безпосередньо з кожного вузла, з головних вузлів кластерів) збору даних.

3. Алгоритми тимчасової кластеризації мережі (FOREL,  $k$ -середніх тощо).

4. Алгоритми пошуку найкоротшого маршруту: евристичні (найближчого сусіда, клітинок, зовнішньої оболонки, тощо).

5. Правила кластеризації, визначення точок (інтервалів) збору даних на траєкторії польоту КА, правила обльоту кластера, правила побудови траєкторії КА тощо (таблиця 1) [21].

Таблиця 1

Ієрархія застосування алгоритмів по побудові траєкторії КА  
для збору даних з вузлів БСМ

Етап рішення	Алгоритми (параметри оптимізації)	Дія (алгоритм, правило)	
		Цільова функція $\min T_{col}$	Цільова функція $\min E_{con}$
1. Віртуальна кластеризація БСМ (рівень мережі)	Алгоритми кластеризації Кількість та розмір однорідних кластерів $R^*$ , початкова точка кластеризації, кількість вузлів в кластерах, розмір кластера $R_k$	Зменшити кількість кластерів: збільшити $R$ , визначити початкову точку кластеризації в місцях групування вузлів, перерозподіл вузлів між кластерами	Збільшити кількість кластерів: зменшити $R$ зі збереженням зв'язності між вузлами кластера та КА
2. Пошук початкової траєкторії польоту КА (рівень мережі)	Алгоритм пошуку найкоротшого маршруту (траєкторії) обльоту центрів кластерів (первинних точок збору даних)	Вибір кращого евристичного алгоритму з множини, оптимізація власних параметрів алгоритмів	–
3. Корегування точок збору даних в кожному кластері (рівень кластеру)	Положення точки (інтервалу) збору даних відносно траєкторії переміщення КА та розташування вузлів кластера	Правила скорочення траєкторії в кластері при забезпеченні радіозв'язності КА-найвіддаленіший вузол	–

Етап рішення	Алгоритми (параметри оптимізації)	Дія (алгоритм, правило)	
		Цільова функція $\min T_{col}$	Цільова функція $\min E_{con}$
4. Визначення стратегії збору даних в кластері (рівень кластеру)	Розташування траєкторії відносно положення вузлів в кластері, кількість та положення точок збору даних	Правила скорочення відстані КА-вузол, який має значний обсяг даних (зменшення часу обміну)	Правила зменшення відстані вузол-КА для витрат енергії батарей
5. Корегування точок (інтервалів) збору, розрахунок графіку обміну КА-вузли (рівень КА-вузол)	Кількість точок (довжина інтервалів) збору даних на відрізках траєкторії КА, швидкість польоту КА	Перерозподіл точок збору за відрізками траєкторії КА, вибір максимальної швидкості польоту при задоволенні часу обміну	Правила пріоритету обміну вузол-КА з меншим (малим) рівнем енергії батареї

Імітаційна модель надає можливість:

отримувати залежності показників ефективності – час збору даних (довжина траєкторії), витрати енергії батарей, час функціонування мережі) від множини керуючих параметрів (правил) побудови траєкторії польоту та збору даних КА при різних вхідних даних (розмірність мережі, тип розташування вузлів, кількість раундів обльоту тощо);

досліджувати параметри оптимізації – кількість та розміри кластерів, кількість та локація точок (інтервалів) збору даних на траєкторії польоту обльоту, стратегії обльоту кластерів; алгоритми пошуку найкоротшого маршруту тощо.

Проведемо моделювання та оцінку ефективності кожного з етапів рішення задачі побудови траєкторії КА для збору даних з вузлів та відповідних алгоритмів (правил) їх реалізації

### 1. Алгоритм кластеризації мережі – визначення розміру та кількості зон покриття КА

Зменшення кількості кластерів у мережі потенційно скорочує довжину маршруту польоту КА (відповідно час збору даних), але призводить до збільшення витрат енергії сенсорних вузлів (через збільшення відстані на передачу вузол-КА) та збільшення часу обміну вузол-КА (зменшується швидкість передачі МАС-протоколу). І навпаки. Тобто постає задача знаходження оптимуму кількості кластерів  $k^*$  та визначення їх розмірів  $R^*$ , визначення точок збору ( $Q_k$ ) або інтервалів ( $INT_i$ ) збору даних КА. Тому працюють наступні основні правила [21].

*Правило з визначення кількості кластерів у мережі:* ЯКЩО пріоритет ЦФ  $T_{col} \rightarrow \min$  ( $T_{fun} \rightarrow \max$ ), ТОДІ збільшити (зменшити) розмір та кількість кластерів.

Результати дослідження запропонованого правила, при застосуванні різних евристичних алгоритмів пошуку найкоротшого шляху (найближчий сусід, за клітинками, випуклої оболонки) через центри кластерів представлені на рис. 3 та рис. 4 ( $N = 100$ , вузли мають координати, які вказані на рис. 2). Оптимізується розмір кластера  $R^*$  в межах значень  $R = 50 \dots 100$  для кожного з алгоритмів. Відповідно до алгоритму кластеризації FOREL визначається кількість кластерів  $k = 69 \dots 33$ . Спостерігаємо, що для кожного алгоритму пошуку найкоротшого шляху існує оптимальне значення  $R^*$  ( $R_{NN}^* = 94, R_{FPPWR}^* = 100, R_{CHIN}^* = 100$ ), що дозволяє значно (більш ніж на 20 %) зменшити первинну довжину траєкторії польоту КА.

Для мережі з груповим розміщенням вузлів результати моделювання наведені на рис. 5.

Застосування інших мережевих правил (табл. 1) впливають на кількість кластерів та відповідно на довжину маршруту, витрати енергії на обмін даними КА з вузлами.

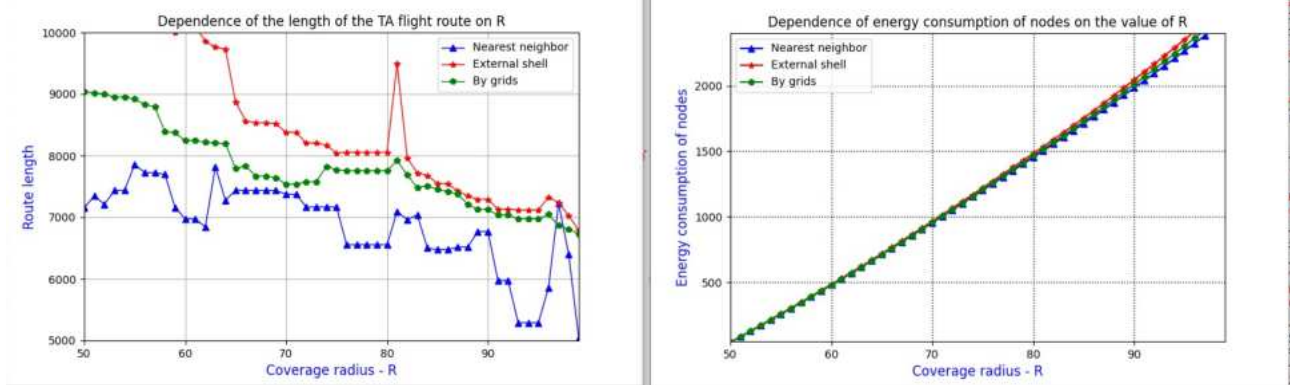


Рис. 4. Оцінка довжини траєкторії та витрат енергії вузлів від розміру зони покриття  $R$  при однорідному розміщенні вузлів при різних алгоритмах пошуку найкоротшого маршруту

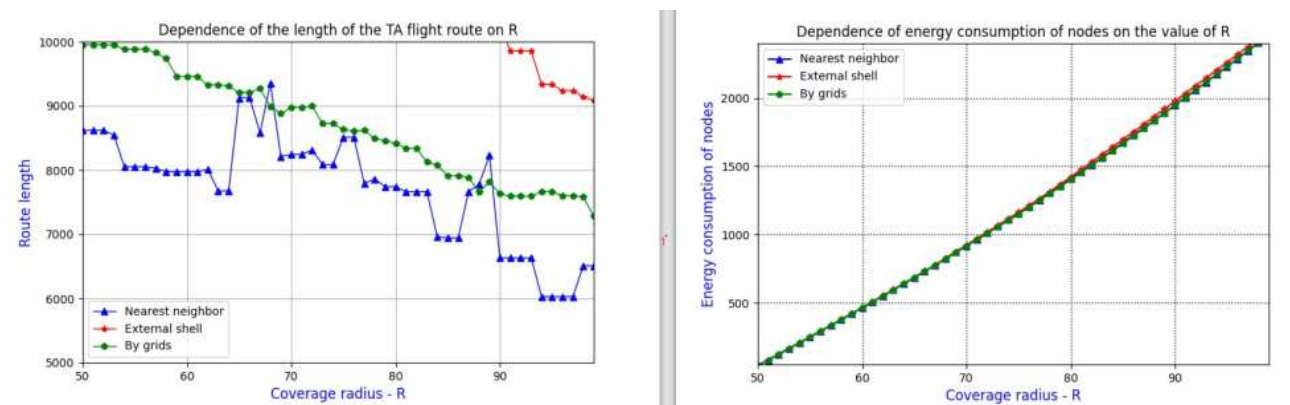


Рис. 5. Оцінка довжини траєкторії та витрат енергії вузлів залежно від розміру зони покриття  $R$  при груповому розміщенні вузлів

*Правило вибору початкової точки кластеризації та порядку їх перебору:* детермінований вибір та послідовний перебір; випадковий вибір та перебір; точку з максимальною кількістю вузлів в кластері та поступовим їх зменшенням.

*Правило перерозподілу вузлів між кластерами:* ЯКЩО в кластері незначна кількість вузлів ТОДІ за можливістю перерозподілити вузли цього кластеру по інших кластерах (тобто зменшити кількість кластерів).

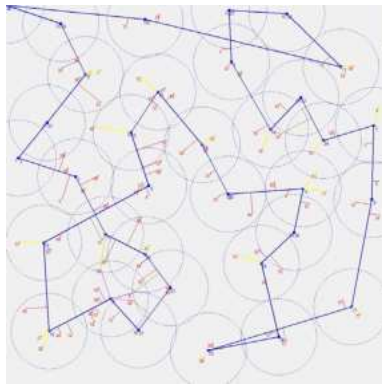
*Правило адаптації розмірів кожного кластера:* ЯКЩО ЦФ (2) ТОДІ зменшити  $R$  за рахунок зменшення висоти польоту КА зі збереженням зв'язності КА-вузлів кластеру.

Виграш застосування цих правил може досягати 5–7 %.

Тобто оптимізація радіуса зони покриття, застосування правил (вибору початкової точки кластеризації на етапі планування, перерозподіл вузлів між кластерами, адаптація розмірів кластерів) має суттєвий вплив на показники ефективності процесу збору даних при функціонуванні мережі.

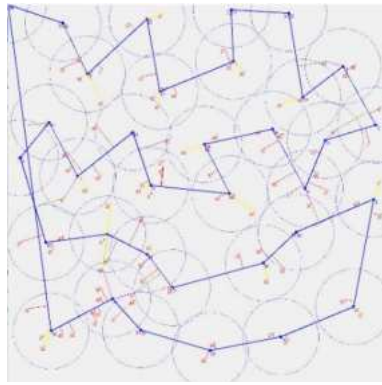
## 2. Алгоритми пошуку найкоротшого маршруту (траєкторії) обльоту кластерів КА

Для рішення задачі пошуку найкоротшого маршруту обльоту кожного з кластерів також можуть бути застосовані різні відомі алгоритми: повного перебору (для малої кількості кластерів), евристичні, генетичні, тощо. Кожний з них показує різні результати залежно від параметрів мережі, вузлів та КА. На рис. 6–9 наведені показники ефективності ( $L$ ,  $E_{con}$ ,  $T_{fun}$ ) при застосуванні трьох евристичних алгоритмів пошуку найкоротшого шляху (найближчого сусіда, за клітинками, зовнішньої оболонки) при однорідному та груповому розміщенні вузлів, розміру зони покриття ( $R = 50, 100$ ), розмірності мережі ( $N = 100$ ).



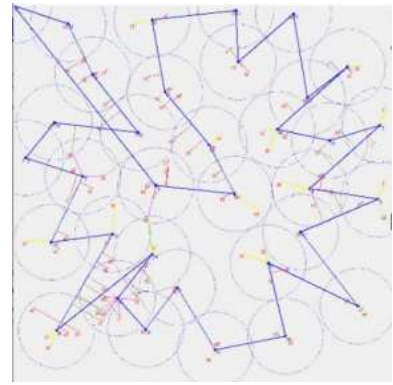
$L = 5987$   $E_{con} = 3068$  ( $R = 100$ )

а) найближчого сусіда



$L = 6596$   $E_{con} = 3157$  ( $R = 100$ )

б) за клітинками

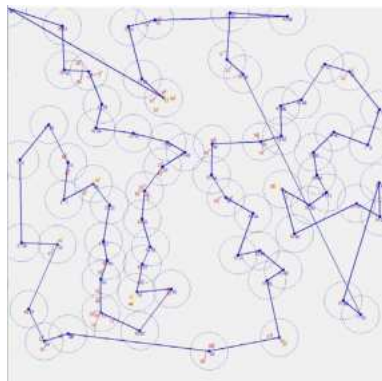


$L = 6899$   $E_{con} = 3290$  ( $R = 100$ )

в) випуклої двошарової оболонки

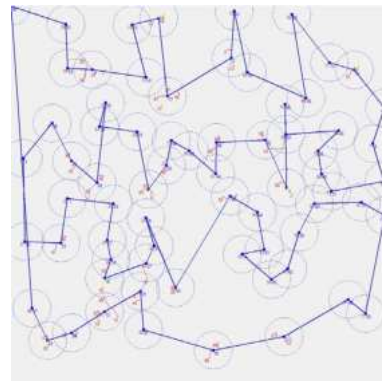
Рис. 6. Результати моделювання траєкторії польоту КА в мережі з рівномірно розподіленими вузлами за різними алгоритмами пошуку найкоротшого маршруту ( $N=100$ ,  $R=100$ )

Результати моделювання продемонстрували значну залежність показників ефективності від характеру розташування вузлів на площі (однорідне, згрупуванням) та прийнятого алгоритму пошуку найкоротшого маршруту обльоту кластерів. В нашому випадку в більшості випадків перевагу з трьох визначених алгоритмів кращі показники ефективності має алгоритм найближчого сусіда.



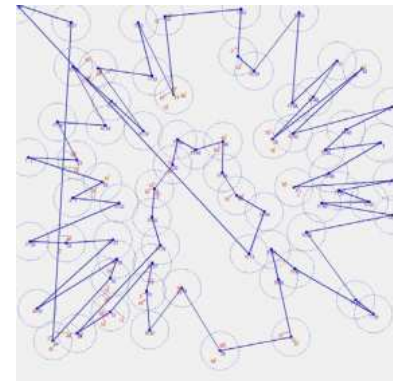
$L = 7153$   $E_{con} = 2115$  ( $R = 50$ )

а) найближчого сусіда



$L = 9042$   $E_{con} = 2128$  ( $R = 50$ )

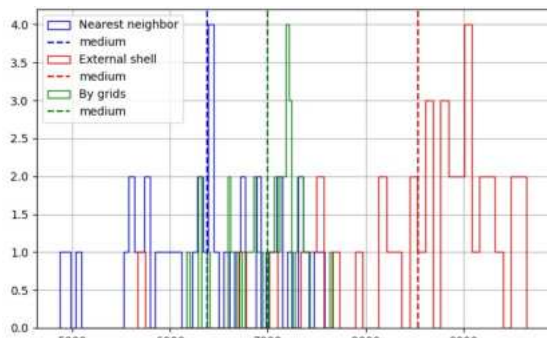
б) за клітинками



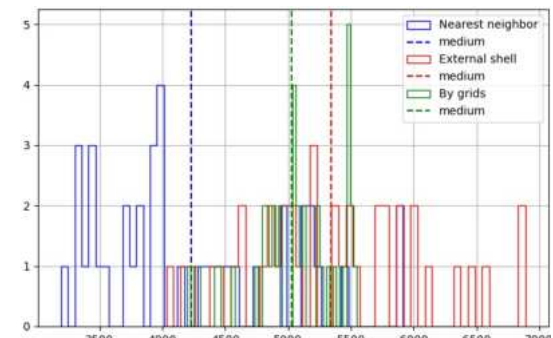
$L = 11844$   $E_{con} = 2143$  ( $R = 50$ )

в) випуклої оболонки

Рис. 7. Результат моделювання траєкторії обльоту КА кластеризованої БСМ з групуванням вузлів за різними алгоритмами пошуку найкоротшого маршруту ( $N=100$ ,  $R=50$ )



а) рівномірне розміщення вузлів



б) групування вузлів

Рис. 8. Результати моделювання довжини маршруту польоту КА рівномірно розподілених та згрупованих вузлів в БСМ за різними алгоритмами пошуку найкоротшого маршруту ( $R=100$ , вибірка зі 100 випадкових розміщень вузлів на площі)



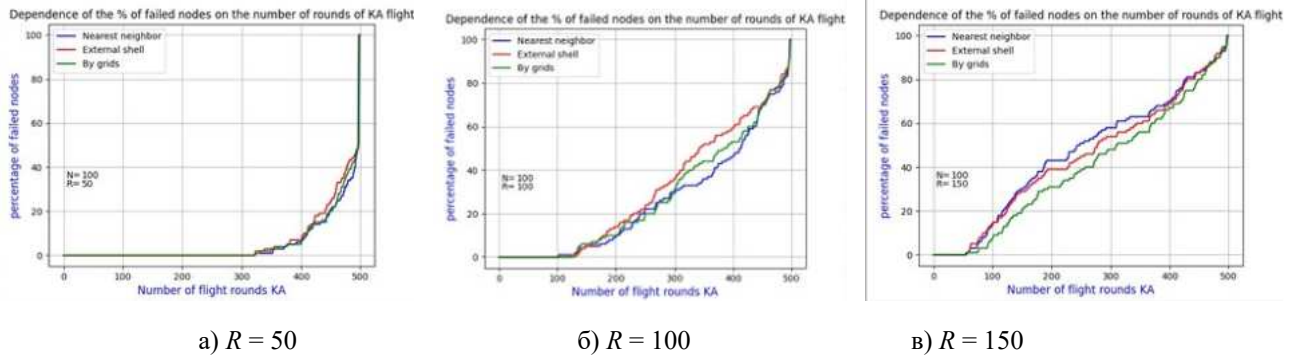


Рис. 9. Залежності часу функціонування мережі від кількості раундів обльоту КА та радіусу покриття ( $N = 100$  при  $R = 50, 100, 150$ )

Крім того, для кожного з алгоритмів існує додаткова можливість оптимізації за внутрішніми параметрами самих алгоритмів пошуку найкоротшого шляху. Наприклад, за алгоритмом найближчого сусіда – підбір кількості кроків до наступного кластера (один, два, три тощо), за квадратами (оптимізація розміру квадрата решітки), випуклої оболонки (оптимізація розміру кожної оболонки). При цьому для конкретних параметрів мережі (площа, розміщення, параметри вузлів, КА тощо) перевагу може мати кожний з них.

**3. Правила обчислення (корегування) точок збору даних в кластері з скороченням довжини маршруту** для покращення базового рішення (через центри кластерів).

Задача пошуку найкоротшого маршруту обльоту КА відрізняється від класичної задачі комівояжера. В нашій постановці задачі достатньо попадання вузла в зону покриття КА. Тому розглянемо евристичні правила скорочення маршруту відносно початкового рішення (п. 1, 2) (рис. 10) [19, 21].

*Правила з скорочення довжини траєкторії польоту КА в кластері (рис. 10).*

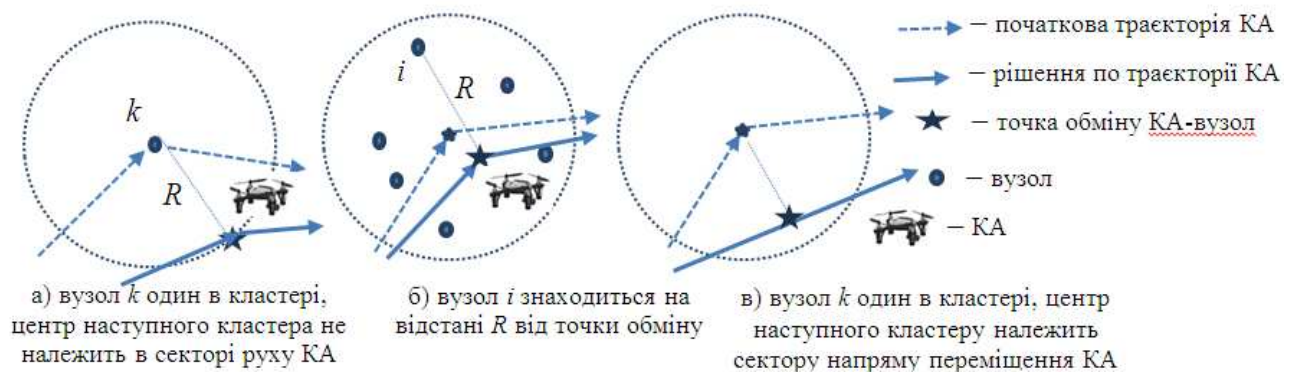


Рис. 10. Ілюстрація правил скорочення довжини траєкторії польоту та збору даних КА

ЯКЩО пріоритетна ЦФ  $T_{col} \rightarrow \min$ , початковий маршрут обльоту кластерів проходить через центр кластера з одним вузлом  $k$ , та наступний центр кластера не попадає в сектор напрямку переміщення КА, ТОДІ в якості точки збору даних визначити точку на дотичній лінії, яка знаходиться на відстані  $R$  від нового маршруту в напрямку переміщення КА (рис. 10, а).

ЯКЩО пріоритетна ЦФ  $T_{col} \rightarrow \min$ , початковий маршрут обльоту кластерів проходить через центр кластера,  $i$ -й вузол знаходиться на найбільшій відстані від траєкторії польоту КА, ТОДІ в якості точки збору даних визначити точку, яка знаходиться на відстані  $R$  від нового маршруту в напрямку переміщення КА (рис. 10, б).

ЯКЩО пріоритетна ЦФ  $T_{col} \rightarrow \min$ , початковий маршрут обльоту кластерів проходить через центр кластера з одним вузлом  $k$ , та наступний центр кластера попадає в сектор напрямку переміщення КА, ТОДІ траєкторію переміщення побудувати прямо до наступного центру кластера. в якості точки збору даних визначити точку на траєкторії, найближчу до центру кластеру (рис. 10в). За результатами моделювання застосування правил скорочення довжини маршруту можна зробити висновок: довжина траєкторії зменшується до 20 %, причому витрати енергії зростають не більш 10 %. За результатами моделювання (рис. 11) знову перемагає застосування евристики з алгоритмом найближчого сусіда, однак при інших параметрах мережі найкращі показники може показати будь-який алгоритм пошуку найкоротшого маршруту.

#### 4. Правила вибору точок (інтервалів) збору даних КА в кластерах (стратегії обльоту)

На рівні кластера визначається кількість та координати точок (інтервалів) збору даних КА (стратегія обльоту кластера). Можливі варіанти правил вибору точок показані на рис. 12 [18, 21]:

- $a$  – вибір точок обміну ближчих до траєкторії КА (через центр або центр «мас» кластера);
- $b$  – збір даних тільки при зависанні КА в центрі (центрі «мас») кластеру;
- $c$  – збір даних в процесі польоту з додатковою кластеризацією, якщо є групи вузлів;
- $z$  – збір даних в польоті з врахуванням малого рівня енергії батарей окремих вузлів.

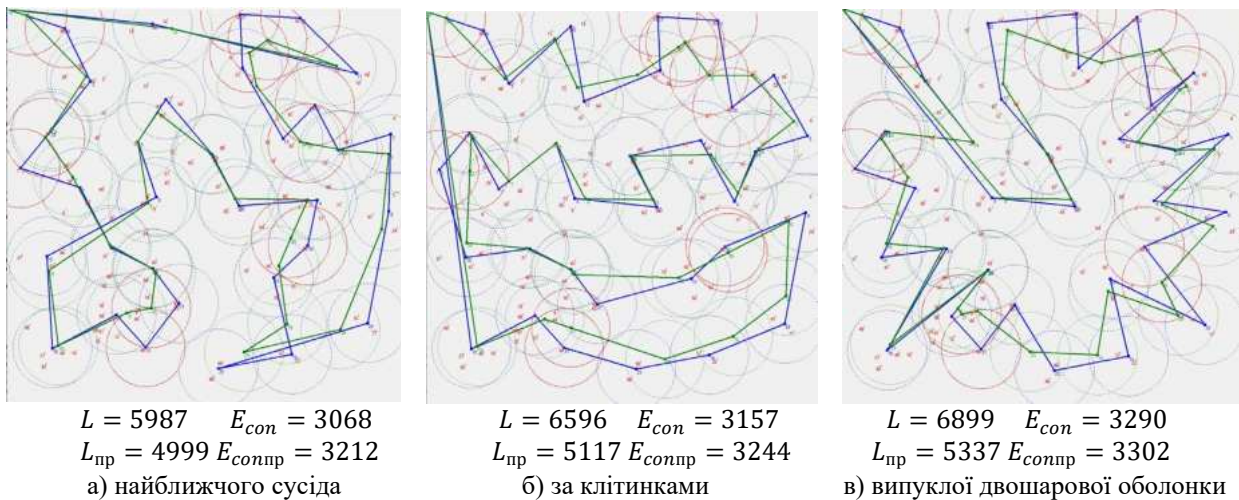


Рис. 11. Результати моделювання застосування правил по скороченню маршруту ( $N=100$ ,  $R=100$ )

Результат кожної стратегії в  $k$ -му кластері оцінюється сукупністю параметрів:

- енергія витрат вузла кожного вузла кластера на збір (передачу та прийом) даних, сумарна енергія витрат вузлів кластера  $E_{con}^k = \sum_{i \in k} e_{con i}$ ;
- час збору даних у кластері  $t_{con}^k$ , який визначається часом польоту та часом зависання КА.



Рис. 12. Основні правила визначення точок (інтервалів) збору даних КА в кластері

Результати моделювання (рис. 13) показали зменшення витрат енергії вузлів при застосуванні стратегії збору даних у польоті (рис. 12, а)  $E_{contr}$  порівняно зі збором даних тільки в центрі кластеру  $E_{conz}$  (рис. 12, б) – до 20 % зниження витрат енергії вузлів на прийом та передачу (рис. 12). При наявності групування вузлів у кластері доцільно проводити їх додаткову кластеризацію з метою зменшення витрат енергії та зменшення часу обміну (рис. 12, в).

*Правило з визначення точок зависання для збору даних:* ЯКЩО в кластері є скупчення вузлів (навантажених або з малою енергією батарей), ТОДІ визначити точку зависання КА для збору даних з цих вузлів кластеру, яка мінімізує час обміну або витрати енергії цих вузлів.

*Правило з корегування траєкторії польоту КА:* ЯКЩО необхідно зменшити час передачі в радіоканалі вузол-КА та/або зменшити витрати енергії вузла, ТОДІ необхідно розмістити (перемістити) точки обміну на траєкторії КА ближче до вузла.

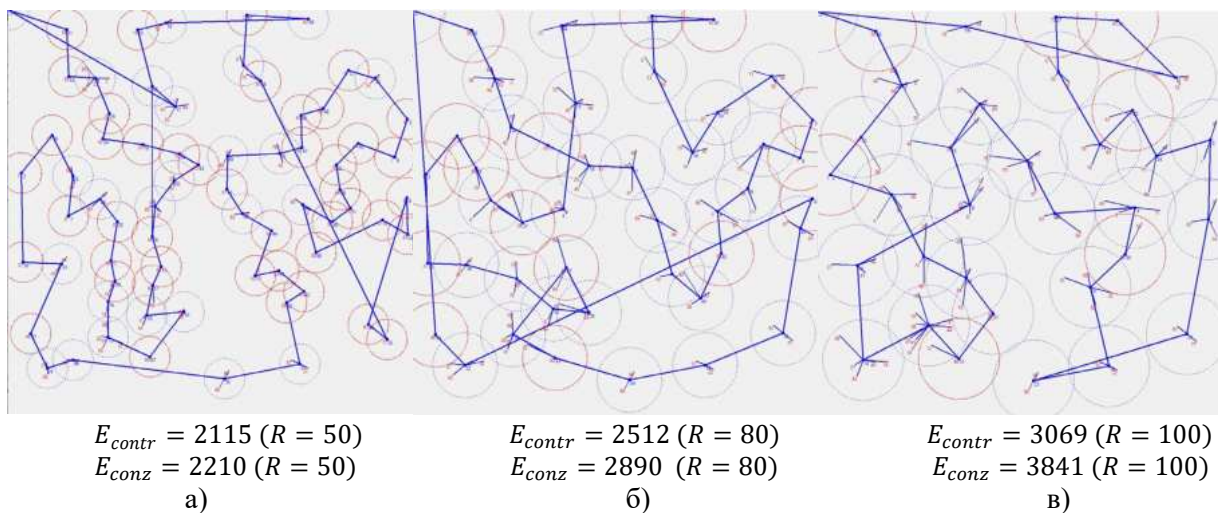


Рис. 13. Результати моделювання двох стратегій збору даних (по траєкторії та тільки в центрі кластера)

*Правило зі зменшення та вирівнювання витрат енергії на передачу:* ЯКЩО декілька вузлів конкурують за інтервали обміну з КА, ТОДІ визначити найближчий інтервал обміну  $INT$  на траєкторії польоту КА вузла з меншою енергією батарей.

*Правила з визначення кількості та локації точок зависання, інтервалів обміну, стратегії обльоту та обміну в кластері:* ЯКЩО ЦФ  $T_{col} \rightarrow \min$ , кількість вузлів в кластері



мала (середня) та обсяг даних незначний, ТОДІ визначити базову стратегію (прольот КА через центр кластера з визначенням інтервалів обміну на траєкторії польоту) (рис. 8, а);

ЯКЩО ЦФ  $T_{fun} \rightarrow \max$ , велика кількість вузлів в кластері, їхній обсяг даних значний, ТОДІ провести кластеризацію кластера з визначенням додаткових точок зависання (рис. 8, з).

##### **5. Правило з перерозподілом вузлів за різними інтервалами траєкторії КА**

Кожна побудована траєкторія польоту КА складається з відрізків між точками збору, які можна оцінювати довжиною відрізка  $l_m$  та кількістю точок обміну. Якщо є інтервали траєкторії зі значною (дуже малою) кількістю точок збору, тоді намагаємось додати (забрати) до (від) неї вузли та повторно провести кластеризацію без врахування доданих (забраних) вузлів. Мета – скоротити довжину траєкторії або зменшити витрати енергії вузлів.

*Правило перерозподілу точок збору даних:* ЯКЩО відрізок траєкторії має значну (малу) кількість точок збору, ТОДІ зафіксувати цю ділянку траєкторії, викреслити (перерозподілити) вузли згідно з ЦФ та провести повторну кластеризацію мережі з метою досягнення певної ЦФ. Результати моделювання застосування запропонованого правила продемонстрували можливість отримання виграша за показниками ефективності до 8 %.

Інтервал обміну вузла і КА визначається з наступних міркувань: час польоту вузла КА повинен бути не меншим за час обміну КА-вузла [21].

Так як кожне правило орієнтовано на досягнення певної цільової функції та має різний результат її досягнення, тому запропонована їх ієрархія в вигляді метаправил. Наприклад [21].

**Метаправило 1:** ЯКЩО ЦФ  $T_{col} \rightarrow \min$ , ТОДІ (однокритеріальна оптимізація) знайти:

- максимальну (задану) кількість кластерів мережі;
- встановити базову траєкторію КА через центр кластерів, знайти найкоротший шлях (використати один алгоритм з множини для пошуку найкоротшого шляху) обльоту центрів;
- застосувати правила скорочення довжини маршруту, визначити можливі додаткові точки збору (зависання) КА відповідно до положення та обсягу даних у вузлах кластерів (групування вузлів зі значним обсягом даних);
- визначити стратегію обльоту вузлів кластерів;
- встановити максимальну швидкість руху КА в кластері, яка відповідає вимогам обміну даними КА з вузлами кластеру;
- розрахувати інтервали та графік передач вузлів під час польоту КА з врахуванням стану вузлів із застосуванням правил, які орієнтовані на збільшення швидкості передачі в радіоканалі.

**Метаправило 2:** ЯКЩО  $T_{col} \rightarrow \min$  та  $T_{fun} \rightarrow \max$ , перша ЦФ має пріоритет над другою, ТОДІ (лексикографічний метод оптимізації):

- знайти максимальну (визначену) кількість кластерів мережі;
- визначити точки збору (зависання) КА згідно з пріоритетом ЦФ;
- визначити стратегію обльоту вузлів кластерів;
- розрахувати траєкторію ТА через точки збору;
- розрахувати інтервали та графік передач вузлів під час польоту на мінімальній відстані з застосуванням правил, які враховують наявну енергію вузлів.

Оцінка ефективності застосування метаправил показала можливість скорочення до 20 % часу збору даних та збільшення до 15 % часу функціонування мережі в порівнянні з раніше запропонованими рішеннями. Важливо зазначити, що запропонована модель ситуаційного управління [21] може бути використана в спеціальному програмному забезпеченні системи управління збором даних ЦУМ та КА. Незначна обчислювальна складність моделі дозволяє застосовувати КА в автономному режимі та приймати (корегувати) рішення в реальному часі.

**Висновки.** Єдиним рішенням для збору даних з вузлів БСМ з незв'язною топологією є застосування КА. При цьому виникає задача побудови траєкторії польоту КА з визначенням

точок (інтервалів) збору даних для забезпечення основних цільових функцій: мінімум часу збору даних та/або максимум часу функціонування мережі.

Конкретна БСМ визначається багатьма параметрами: розміром площі та її формою; кількістю, координатами та щільністю розміщення вузлів, їх взаємним розміщенням; енергією батарей, обсягом даних моніторингу; обмеженнями параметрів вузлів та КА тощо. За допомогою розробленої імітаційної моделі проведені дослідження залежності показників ефективності збору даних від застосування різних алгоритмів (правил) побудови траєкторії польоту КА при визначених параметрах мережі, вузлів та КА. Доведено, що єдиного алгоритму (сукупності правил) пошуку траєкторії польоту КА, який забезпечує отримання оптимального рішення, для всіх варіантів БСМ та можливих ситуацій на мережі не існує.

Для оптимізації рішення по траєкторії польоту для збору даних КА запропонована база правил, яка реалізує ієрархію правил досягнення цільових функцій. Проведені дослідження дозволили визначити пріоритет та порядок застосування правил у базі (метаправил). Результати імітаційного моделювання довели, що застосування бази правил дозволяє зменшити час збору даних до 20 % або підвищити час функціонування мережі до 15 % в порівнянні з існуючими рішеннями. **Напрямом подальшого дослідження** є вдосконалення бази правил з побудови траєкторії польоту та збору даних КА з вузлів БСМ для інших цільових функцій управління.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Amodu, O.A.; Nordin, R.; Jarray, C.; Bukar, U.A.; Raja Mahmood, R.A.; Othman, M. A Survey on the Design Aspects and Opportunities in Age-Aware UAV-Aided Data Collection for Sensor Networks and Internet of Things Applications. *Drones* 2023, 7, 260. URL: <https://doi.org/10.3390/drones7040260>.
2. Minh T. Nguyen, Cuong V. Nguyen, Hai T. Do, Hoang T. Hua, Thang A. Tran, An D. Nguyen, Guido Ala, and Fabio Viola. (2021). UAV-Assisted Data Collection in Wireless Sensor Networks: A Comprehensive Survey. *Electronics*. 10, 2603. DOI: 10.3390/electronics10212603.
3. Imad Jawhar, Nader Mohamed, Jameela Al-Jarood (2015) UAV-based data communication in wireless sensor networks: Models and Strategies. *International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*. DOI: 10.1109/ICUAS.2015.7152351.
4. V. Romaniuk, O. Lysenko, A. Romaniuk, O. Zhuk (2020). Increasing the efficiency of data gathering in clustered wireless sensor networks using UAV. *Information and Telecommunication Sciences*, 11 (1), 102–107. DOI: 10.20535/2411-2976.12020.102-107.
5. Zhiqing Wei, Mingyue Zhu, Ning Zhang, Lin Wang (2022). Zhiyong Feng UAV Assisted Data Collection for Internet of Things: A Survey. *IEEE Internet of Things Journal* 9(17): 1-1, DOI:10.1109/IJOT.2022.3176903.
6. Sarmad Rashed and Mujdat Soyuturk (2017). Analyzing the Effects of UAV Mobility Patterns on Data Collection in Wireless Sensor Networks *Sensors*. 17, 413. DOI: 10.3390/s17020413.
7. Weihuang Huang, Jeffrey Xu Yu. (2017). Investigating TSP Heuristics for Location-Based Services *Data Sci. Eng.* 2: 71–93. DOI: 10.1007/s41019-016-0030-0.
8. Helsgaun K. (2017). An Extension of the Lin-Kernighan-Helsgaun TSP Solver for Constrained Traveling Salesman and Vehicle Routing Problems; Roskilde University: Roskilde, Denmark. DOI:10.13140/RG.2.2.25569.40807.
9. Hahsler M., Hornik, K. (2007). TSP – Infrastructure for the traveling salesperson problem. *J. Stat. Softw.*, 23, 1–21.
10. Wu Yue, Zhu Jiang (2018). Path Planning for UAV to Collect Sensors Data Based on Spiral Decomposition. *Procedia Computer Science* 131, 873–879. DOI: 10.1016/j.procs.2018.04.29.
11. Chengliang W, Jun-hui Y (2015). Path Planning for UAV to Collect Sensor Data in Large-Scale WSNs. *Transaction of Beijing Institute of Technology*; 35: 1044–1049. DOI: 10.1016/j.procs.2018.04.291.
12. Kumar Nitesh, Prasanta K. Jana (2019). Convex hull based trajectory design for mobile sink in wireless sensor networks/*International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing* 30 (1): 26. DOI: 10.1504/IJAHUC.2019.097092.

13. Q. F., Yu W., Xiao K., Liu C., Liu W. (2022). Trajectory generation and optimization using the mutual learning and adaptive colony algorithm in uneven environments. *Appl. Sci.*, 12, 4629. URL: <https://doi.org/10.3390/app12094629>.
14. Katoch S., Chauhan S.S., Kumar V. (2021). A review on genetic algorithm: past, present, and future. *Multimed. Tools Appl.*, 80, 8091–8126. DOI: 10.1007/s11042-020-10139-6.
15. Emambocus B.A.S., Jasser M.B., Hamzah M., Mustapha A., Amphawan A. (2021). An enhanced swap sequence-based particle swarm optimization algorithm to Solve TSP. *IEEE Access*, 9, 164820–164836. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3133493.
16. Haider S.K., Jiang A., Almogren A., Rehman A.U., Ahmed A., Khan W.U., Hamam H. (2021). Energy Efficient UAV Flight Path Model for Cluster Head Selection in Next-Generation Wireless Sensor Networks. *Sensors*, 21, 8445. URL: <https://doi.org/10.3390/s21248445>.
17. Josiane da Costa Vieira Rezende, Ronellídio da Silva and Marccone Jamilson Freitas Souza. (2020). Gathering Big Data in Wireless Sensor Networks by Drone. *Sensors*, 20, 6954. DOI: 10.3390/s20236954.
18. Dac-Tu Ho, EstenIngar Grotli, and Tor Arne Johansen (2013). Heuristic Algorithm and Cooperative Relay for Energy Efficient Data Collection with a UAV and WSN. *International Conference Computing, Management and Telecommunications (ComManTel)*. DOI: 10.1109/ComManTel.2013.6482418.
19. Cariou, C., Moiroux-Arvis, L., Pinet, F., Chanet, J.-P. (2023). Evolutionary Algorithm with Geometrical Heuristics for Solving the Close Enough Traveling Salesman Problem: Application to the Trajectory Planning of an Unmanned Aerial Vehicle. *Algorithms*, 16, 44. URL: <https://doi.org/10.3390/a16010044>.
20. Nguyen, K. K., Duong, T. Q., Do-Duy, T., Claussen, H., & Hanzo, L. (2022). 3D UAV Trajectory and Data Collection Optimization via Deep Reinforcement Learning. *IEEE Transactions on Communications*. DOI: 10.1109/TCOMM.2022.3148364
21. Hrymud A., Romaniuk V. (2023). A model of situational control of the telecommunication aerial platform flight trajectory to collect data from nodes of a wireless sensor network. *Communication, informatization and cyber-security systems and technologies*, № 3. p. 88–100. DOI: 10.58254/viti.3.2023.12.101.