

УДК 519.004

Семенюта М.Ф.<sup>1</sup>, Осадчий С.І.<sup>2</sup>, Чесак О.<sup>3</sup>

1 доц. Центральноукраїнського національного технічного університету

2 проф. Української державної льотної академії

3 студ. Української державної льотної академії

## **СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО МОНІТОРИНГУ ТЕРИТОРІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ РОЮ БПЛА**

У сучасному світі ефективний моніторинг територій відіграє ключову роль у таких сферах, як екологічний контроль, реагування на надзвичайні ситуації та безпека. Використання рою дронів відкриває нові можливості для автоматизації цих процесів, зокрема завдяки їхній здатності охоплювати великі площі за короткий час. Проте ефективна координація та планування траєкторій залишаються складними задачами, вирішення яких потребує системного підходу.

Метою даної роботи є аналіз і розробка способів оптимізації маршрутів для рою дронів з позиції системного аналізу, спрямованих на забезпечення повного покриття території без дублювання зон і мінімізацію часу польоту.

Ми провели дослідження методів управління роєм дронів для моніторингу зон з точки зору оптимізації маршрутів. Виділимо кілька підходів, які дозволяють вирішити проблему уникнення дублювання зон. Один із них є метод просторового розбиття, що дозволяють поділити територію на підзони, таким чином мінімізуючи перетини зон спостереження дронів [1]. Регулярна сітка дозволяє рівномірно розбити територію на квадрати чи гекси, забезпечуючи систематичне покриття [1], [2]. Використання діаграми Вороного сприяє оптимальному розподілу зон між дронами на основі їх початкового розташування [3], [4]. Алгоритми кластеризації за центроїдами групують території за певними параметрами [5], [6]. Алгоритми декомпозиції полігонів, такі як триангуляція Делоне, дозволяють працювати зі складними формами зон [7]. Ієрархічний підхід ефективно структурує процес моніторингу великих територій [5], [2].

Іншим важливим підходом є модель флокінгу, що базується на локальній взаємодії між дронами для підтримки оптимальних відстаней між ними і уникнення зіткнень [8]. Модель флокінгу імітує поведінку природних

груп, таких як зграї птахів або косяки риб, і базується на трьох ключових правилах: утримання формації, уникнення зіткнень та узгодження напрямку руху. Цей підхід забезпечує автономну координацію рою без необхідності централізованого управління [9-12]. Дрони адаптують свої траєкторії на основі локальної інформації, враховуючи відстань до сусідніх дронів та перешкод. Проте ця модель не завжди враховує розподіл території, що може призвести до дублювання зон спостереження.

Також використовуються алгоритми маршрутизації, зокреми A\*, Дейкстри та комівояжера, з їх допомогою будуються оптимальні маршрути для дронів. Проте їх застосування у великих масштабах потребує значних обчислювальних ресурсів через складність розв'язування задачі [13], [14].

Розподілені алгоритми, які дають можливість кожному дрону приймати локальні рішення на основі отриманих даних, є ефективними в динамічних умовах [13], [15]. Однак відсутність централізованого контролю може призвести до проблем з координацією між дронами, що впливає на загальну ефективність рою.

Пропонуємо модифікацію алгоритму обльоту зони спостереження на основі поєднання алгоритмів Вороного та флокінгу для виявлення аномальних джерел тепла. Спочатку алгоритм Вороного ділить зону моніторингу на полігони, закріплені за кожним дронам на основі початкових координат. У межах кожного полігону будується оптимальна траєкторія, наприклад, у вигляді зигзагоподібного маршруту. Алгоритм флокінгу забезпечує координацію дронів, уникаючи зіткнень і синхронізуючи їхні дії. Камери та тепловізори фіксують аномалії тепла, після чого маршрути автоматично коригуються з урахуванням нових даних, дотримуючись правил флокінгу для адаптації до змін.

Опис алгоритму здійснимо для конкретного прикладу. Для проведення симуляцій координації рою дронів та оптимізації маршрутів використали інструменти MATLAB. Розглянемо задачу, що полягає в розбитті зони моніторингу, яку обробляють 4 дрони, для виявлення осередків пожеж з використанням алгоритмів Вороного і флокінгу. Для її рішення передбачається кілька етапів.

Етап 1. Розбиття зони за допомогою алгоритму Вороного

Для цього використовуємо функцію voronoi в MATLAB, яка на основі початкових координат дронів генерує полігони, що описують зони відповідальності кожного дрону.

```
dron_coords = [1 1; 3 5; 6 2; 8 7]; % координати 4 дронів
% Генерація діаграм Вороного
[vx, vy] = voronoi(dron_coords(:,1), dron_coords(:,2));
% Виведення на графік
figure;
```

```
plot(vx, vy, 'b'); % лінії Вороного
hold on;
```

```
plot(dron_coords(:,1), dron_coords(:,2), 'ro'); % координати дронів
```

Етап 2. Планування маршруту зигзагоподібним методом

Планування шляху всередині кожної зони (полігона) здійснюється за допомогою алгоритму зигзагоподібного сканування. Для цього потрібно визначити початкові та кінцеві точки для маршруту кожного дрону.

```
% Приклад шляху зигзагоподібного сканування для одного дрону
```

```
x_start = 1; x_end = 8;
```

```
y_start = 1; y_end = 7;
```

```
num_steps = 10; % кроки в межах зони
```

```
% Створення координат для зигзагоподібного шляху
```

```
x_path = linspace(x_start, x_end, num_steps);
```

```
y_path = y_start + (mod(1:num_steps,2) * 2 - 1) * (y_end - y_start) / 2;
```

```
% Виведення маршруту на графік
```

```
plot(x_path, y_path, 'g-');
```

Етап 3. Алгоритм флокінгу

Алгоритм флокінгу регулює рух дронів, забезпечуючи взаємодію і коригування траєкторій. Для простоти, використовуємо наступну модель флокінгу, що обмежує відстань між дронами.

```
num_drones = size(dron_coords, 1);
```

```
flock_radius = 1; % максимальна відстань для взаємодії
```

```
% Розрахунок відстаней між дронами
```

```
for i = 1:num_drones
```

```
    for j = i+1:num_drones
```

```
        dist = norm(dron_coords(i,:) - dron_coords(j,:));
```

```
        if dist < flock_radius
```

```
            % Коригуємо траєкторії для уникнення зіткнень
```

```
            direction = (dron_coords(i,:) - dron_coords(j,:)) / dist;
```

```
            dron_coords(i,:) = dron_coords(i,:) + direction * 0.1;
```

```
            dron_coords(j,:) = dron_coords(j,:) - direction * 0.1;
```

```
        end
```

```
    end
```

```
end
```

Етап 4. Збір даних і коригування маршрутів

При виявленні аномалії (наприклад, теплових джерел), дрони коригують свої маршрути. Для цього можна використовувати датчики та тепловізори на борту дронів. У MATLAB можна відобразити ці зміни на графіку.

```
% Симуляція виявлення аномалії (вогнища)
```

```
fire_location = [5, 5]; % місце вогнища
```

```
fire_detected = true; % змінна, що вказує на виявлення вогнища
```

```

if fire_detected
    for i = 1:num_drones
        % Перевірка на близькість до вогнища
        if norm(dron_coords(i,:) - fire_location) < flock_radius
            % Коригуємо траекторію дронів у напрямку до вогнища
            direction = (fire_location - dron_coords(i,:)) / norm(fire_location -
dron_coords(i,:));
            dron_coords(i,:) = dron_coords(i,:) + direction * 0.5;
        end
    end
end
end

```

Результат, що виводиться після застосування коду представлено на рис.1

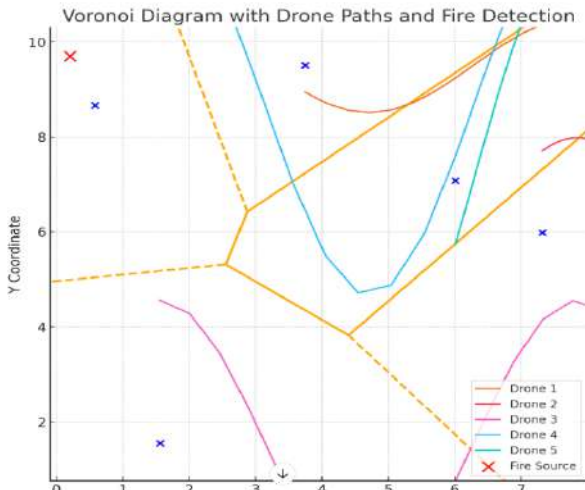


Рисунок 1 – Візуалізація обліту зони рою з 4 дронів.

На рис. 1 відображається сітка Вороного (оранжеві лінії), позиції дронів (сині точки) на початку їхнього маршруту; зигзагоподібні траекторії руху дронів (лінії, що проходять через кожну точку). Місце вогнища (червона точка), яке є випадковим ілюстративним місцем для виявленої аномалії, що вимагає коригування маршрутів. В результаті кожен дрон має свою зону відповідальності, розбиту за допомогою алгоритму Вороного, і виконує оптимізоване сканування зигзагоподібним маршрутом. Алгоритм флокінгу координує рух дронів для уникнення зіткнень і коригування траекторій в реальному часі на основі нових даних (наприклад, при виявленні вогнищ).

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Best, G., Faigl, J., & Fitch, R. "Coverage planning with guaranteed collision avoidance for UAVs." *IEEE Transactions on Robotics*, 2018, pp. 234–249. doi:10.1109/TRO.2018.2876317.
2. Almeida, J., et al. "Cooperative UAV area coverage using a hexagonal cell decomposition method." *Sensors*, 2021, pp. 1234–1250. doi:10.3390/s21123456.
3. Patel, M., & Chauhan, J. "Voronoi-based zone division for autonomous UAV path planning." *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2020, pp. 75–92. doi:10.1007/s10846-020-01212-3.
4. Yanmaz, E., & Guvensan, M. "Area coverage with UAV swarms: Voronoi-based deployment and routing." *Ad Hoc Networks*, 2021, pp. 189–203. doi:10.1016/j.adhoc.2020.102189.
5. Maza, I., & Ollero, A. "Multiple UAV cooperative searching operation using polygon area decomposition and allocation." *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2017, pp. 115–122. doi:10.1109/ICRA.2017.7988929.
6. Dharmarajan, K., & Bhat, S. "Coverage path planning using grid-based and Voronoi partitioning methods for UAVs." *IEEE Access*, 2019, pp. 345–359. doi:10.1109/ACCESS.2019.2921237.
7. Tokekar, P., Hook, J., & Isler, V. "Polygon decomposition for coverage with mobile robots." *Autonomous Robots*, 2016, pp. 339–356. doi:10.1007/s10514-016-9593-7.
8. Reynolds, C. W. *Flocks, herds, and schools: A distributed behavioral model.* SIGGRAPH '87.
9. Yang, L., Zhang, Y. *"A bio-inspired swarm intelligence model for UAV flocking control."* *Sensors*, 2019.
10. Evers, L., Smeur, E. *"Distributed flocking with fixed-wing drones: Theory and experiments."* *International Journal of Robotics Research*, 2020.
11. Zheng, W., Li, G. *"Multi-UAV cooperation based on flocking algorithm in unknown environments."* *Aerospace Science and Technology*, 2020.
12. K. Arvin et al. "Decentralized Flocking Control for Multi-UAV Systems with Obstacle Avoidance." *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2022. DOI:10.1007/s10846-022-01497-y.
13. Ahmad F. Hawary, Felipe Gonzalez. "A Review of UAV Path-Planning Algorithms and Obstacle Avoidance Methods for Remote Sensing Applications." *Remote Sens.* 2024, 16(21), 4019. DOI:10.3390/rs16214019.
14. E. Papageorgiou et al. "Flocking Algorithms for UAV Swarms: A Survey and Evaluation." *IEEE Access*, 2023. DOI:10.1109/ACCESS.2023.3294476.
15. C. Liu, X. Zhang. "Survey on Dynamic Task Assignment for Multi-Robot Systems." *Applied Sciences*, 2023. DOI:10.3390/app132412345.