

УДК 629.05:004.7

*Конорєв О. Ю., студент PhD;**Марченко П. А., студент PhD;**Пономаренко С. О. к.т.н, с.н.с.;**КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна*

ПОБУДОВА МАРШРУТУ НАЗЕМНОГО РОБОТА З ПОВІТРЯНОЮ ПІДТРИМКОЮ БПЛА

Сучасні системи, що об'єднують безпілотні літальні апарати та наземних роботів, активно застосовуються для виконання завдань розвідки, пошуку і транспортування [1, 2]. Одним із основних викликів залишається побудова ефективних маршрутів для наземних платформ в умовах складного рельєфу, різної прохідності місцевості та обмеженого запасу енергії [3]. Класичними алгоритмами побудови маршрутів є алгоритм Дейкстри та алгоритм A*, які використовують пошук найкоротшого шляху на зваженому графі. Однак, вони не забезпечують оптимізацію маршрутів по енергетичним показникам. Тому актуальною задачею є розроблення алгоритмів, що можуть забезпечити оптимізацію маршруту по енергетичним показникам.

Мета роботи. Розробити оптимальний по критерію мінімуму енергетичних затрат алгоритм руху наземного робота на заданій ділянці земної поверхні, для якої є цифрова карта, з будь-якої початкової точки до цілі, координати якої оперативно задаються і можуть бути змінені за цілевказанням від БПЛА-розвідника. При цьому повинні бути враховані рельєф місцевості, тип поверхні та швидкість руху наземного робота.

Постановка задачі. Розглядається мультиагентна система наземних роботів з повітряною підтримкою з БПЛА. Потрібно побудувати оптимальний по критерію мінімальних енергетичних затрат маршрут наземного робота до цілі, координати якої надає БПЛА-розвідник. Алгоритм повинен враховувати такі

характеристики маршруту, як характеристика покриття (асфальт, трава, пісок, болото), яка визначається коефіцієнтом прохідності k_i , що задається на основі карти покриття, наявність і розмір перешкод, які позначаються клітинками з нескінченно високим коефіцієнтом $k_i = \infty$, що виключає їх із маршруту, параметри рельєфу місцевості, що описуються різницею висот Δh_i між сусідніми клітинками та використовуються для обчислення ухилу θ_i та енергетичні затрати на проходження маршруту e_i , які обчислюються за формулою:

$$e_i = m * g * d_i * (\mu_i * \cos\theta_i + \sin\theta_i) \quad (1),$$

де m - маса наземного робота, g - прискорення вільного падіння, μ - коефіцієнт тертя, d - довжина шляху, θ - кут ухилу,

Сам маршрут будується у вигляді зваженого графа на дискретизованій площі розміром $M \times M$, із кроком 1 м. Для знаходження шляху застосовується удосконалений алгоритм A^* [4], що мінімізує вартість руху з урахуванням прохідності місцевості та енерговитрат.

Методологія досліджень. За прототип алгоритму вирішення поставленої задачі прийнятий відомий алгоритм A^* , що дозволяє знаходити найкоротші маршрути у зважених графах з урахуванням функції оцінки виду

$$f(u) = g(u) + h(u) \quad (2),$$

де $g(u)$ накопичена вартість до поточної вершини, а $h(u)$ - евристика до цілі (наприклад, евклідова відстань). Однак, алгоритм A^* зазвичай враховує лише довжину шляху або геометричну евристику, ігноруючи додаткові параметри середовища, такі як енерговитрати, рельєф місцевості чи тип покриття. Для врахування додаткових факторів, які класичний алгоритм A^* маршрутизації зазвичай не враховує пропонується удосконалити алгоритм A^* за рахунок розширення переліку актуальних параметрів. А саме, розширена функція накопичення вартості траєкторії включатиме додаткові параметри d_i - довжина переходу; v_i - очікувану швидкість руху; e_i - оцінку енерговитрат; k_i - коефіцієнт прохідності ділянки, та вагові коефіцієнти w_e та w_p . У цьому

дослідженні вагові коефіцієнти визначаються на основі нормалізованих зворотних середніх значень відповідних критеріїв [5-7] - енерговитрат та коефіцієнтів прохідності:

$$w_e = \frac{1 / e_{\text{сеп}}}{(1 / e_{\text{сеп}}) + (1 / k_{\text{сеп}})}, \quad w_p = \frac{1 / k_{\text{сеп}}}{(1 / e_{\text{сеп}}) + (1 / k_{\text{сеп}})} \quad (3),$$

$$\text{де } e_{\text{сеп}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i, \quad k_{\text{сеп}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_i$$

Таким чином, вдосконалений алгоритм A^* використовує наступну функцію накопиченої вартості:

$$g(u) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{d_i}{v_i} + w_e * e_i + w_p * k_i * d_i \right) \quad (4)$$

Перевірка ефективності запропонованого вдосконаленого алгоритму A^* проводилась методом математичного моделювання. Було змодельовано три незалежні сценарії руху наземного робота по випадковій мапі місцевості, розміром 100×100 клітин, яка при кроці дискретизації 5 м відповідає реальній площі 500×500 м. Місцевість представлена у вигляді зваженого графа, де кожна клітинка має певний коефіцієнт прохідності k_i , що характеризує умовну складність переміщення через неї. У моделюванні використовувалися такі значення: асфальт 1.0, трава / ґрунт 1.5, пісок/болото 3.5, перешкоди виключаються з маршруту [8]. Візуально ці значення відповідають: білим клітинкам - легко прохідні ділянки, сірим відтінкам - середньої складності поверхні, чорним клітинкам - непрохідні зони. Для кожного сценарію виконано порівняння маршрутів, побудованих алгоритмами Дейкстри, класичним A^* та вдосконаленим A^* (рис. 1).

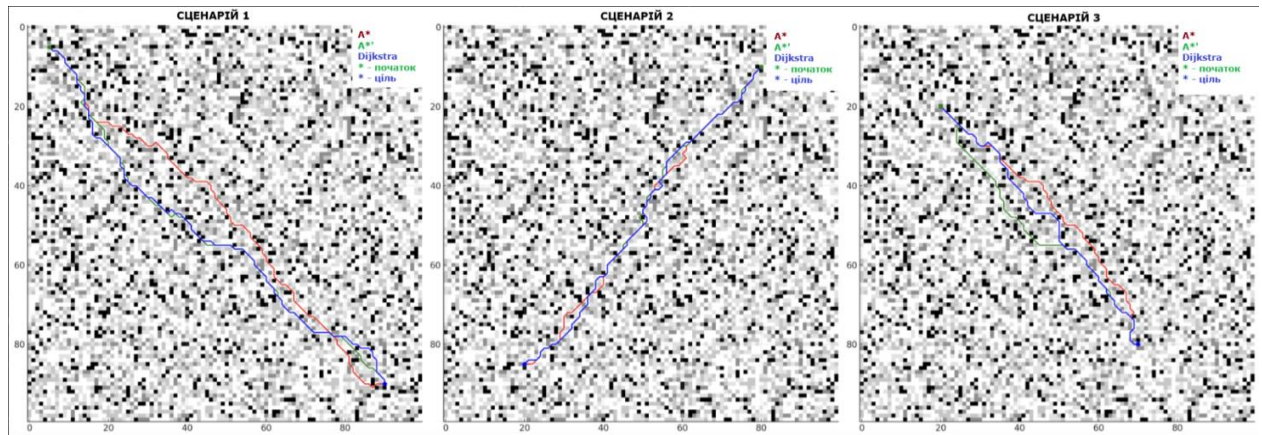


Рисунок 1. Результати моделювання

Маршрут, побудований за вдосконаленим алгоритмом A^* , показав стабільну перевагу за загальною вартістю маршруту (табл. 1), оскільки уникав енергозатратних ділянок, навіть якщо шлях був дещо довшим.

Таблиці 1,2 . Оцінка енергетичних затрат проходження маршруту за сценаріями 1, 2, 3

Сценарій	Результати роботи алгоритму Дейкстри	Результати роботи алгоритму A^*	Результати роботи вдосконаленого алгоритму A^*
1	299.1	289.7	279.9
2	314.7	300.0	285.8
3	288.3	279.5	267.8

Сценарій	Порівняння з алгоритмом Дейкстри	Порівняння з класичним алгоритмом A*
1	6.7%	3.7%
2	9.2%	4.8%
3	7.1%	4.1%

Аналіз результатів таблиці 1 показує, що енергетичні затрати проходження маршруту з використанням вдосконаленого алгоритму A* були нижчими у всіх трьох тестових сценаріях - у середньому на 4-9% порівняно з алгоритмом A* та на 6-9% у порівнянні з алгоритмом Дейкстри. Це свідчить про ефективність врахування локальних особливостей місцевості, таких як рельєф, покриття і витрати енергії, в обчисленні вартості шляху.

Висновки.

1. Побудований удосконалений алгоритм A* успішно реалізує багатофакторну модель маршруту з урахуванням типу покриття, рельєфу та енергетичних витрат. Такий підхід дозволяє мінімізувати сумарну вартість переміщення наземних роботів у складних умовах.

2. За критерієм енергетичної ефективності запропонований алгоритм показав на 4-9% кращі результати, ніж класичний A* та алгоритм Дейкстри.

Використані джерела

1. Munasinghe, I., Perera, A., & Deo, R. C. (2024). A Comprehensive Review of UAV-UGV Collaboration: Advancements and Challenges. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 13(6), 81. <https://doi.org/10.3390/jsan13060081>

2. Shi, H., Zhao, Z., Chen, J., Zhou, M., & Liu, Y. (2024). Enhancing Unmanned Aerial Vehicle Path Planning in Multi-Agent Reinforcement Learning through Adaptive Dimensionality Reduction. *Drones*, 8(10), 521. <https://doi.org/10.3390/drones8100521>

3. Mondal, M.S., Ramasamy, S., Humann, J.D. et al. Cooperative Multi-Agent Planning Framework for Fuel Constrained UAV-UGV Routing Problem. *J Intell Robot Syst* 111, 12 (2025). <https://doi.org/10.1007/s10846-024-02209-w>

4. Hart, P. E.; Nilsson, N.J.; Raphael, B. (1968). "A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths". *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*.

5. Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. Springer-Verlag.

6. Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9–26.

7. Zou, H., Yun, Y., & Sun, L. (2006). Entropy method for determination of weight of evaluating indicators in fuzzy synthetic evaluation for water quality assessment. *Journal of Environmental Sciences*, 18(5), 1020–1023.

8. A. Howard and H. Seraji, "Real-time assessment of terrain traversability for autonomous rover navigation," *Proceedings. 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2000)* (Cat. No.00CH37113), Takamatsu, Japan, 2000, pp. 58-63 vol.1, doi: 10.1109/IROS.2000.894582.