Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. 2025. № 1 (31)
ISSN 2522-9818 (print)
ISSN 2524-2296 (online)

УДК 629.735.3
DOI: https://doi.org/10.30837/2522-9818.2025.1.049

М. Єна

РОЗРОБЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ ОБРОБЛЕННЯ ДАНИХ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ТРАФІКУ БпЛА

Предмет дослідження – процеси управління трафіком БпЛА, зокрема алгоритми оброблення великих потоків інформації в реальному часі для забезпечення безпеки, ефективності та оптимального маршруту польотів. **Мета роботи** – розроблення та впровадження алгоритмів оброблення даних у реальному часі для забезпечення безпечного, ефективного та автоматизованого управління трафіком БпЛА в міських та сільських умовах. **Завдання:** проаналізувати наявні підходи до управління трафіком БпЛА та технології оброблення інформації в реальному часі; розробити математичну модель, яка бере до уваги особливість маршрутизації БпЛА, зокрема уникнення зіткнень та оптимізацію маршрутів; створити алгоритм оброблення вхідних даних у реальному часі, який інтегрує динамічні зміни трафіку, погодні умови й стан повітряного простору; реалізувати та протестувати запропонований алгоритм у симуляційному середовищі; проаналізувати й порівняти процеси симуляції БпЛА із запропонованим алгоритмом та без. **Методи:** застосування методів нелінійної оптимізації для побудови маршрутів, що мінімізують витрати енергії, час польоту та ризик зіткнень; використання теоретико-графових моделей для подання повітряного простору як мережі з вузлами (точки маршруту) та ребрами (потенційні траєкторії), що дає змогу ефективно виконувати завдання маршрутизації; використання генетичних алгоритмів для пошуку оптимальних рішень у складних багатофакторних задачах маршрутизації; оброблення інформації на основі фільтрів Калмана; створення віртуальних копій повітряного простору для проведення експериментів та оцінювання ефективності алгоритмів у безпечному середовищі. **Результати:** розроблено алгоритми нелінійної оптимізації, що дали змогу мінімізувати витрати енергії на польоти БпЛА та час виконання завдань; ефективність підходу підтверджено тестуванням, яке показало зменшення середнього часу польоту на 15 %, якщо порівнювати з базовими алгоритмами; побудовано теоретико-графову модель повітряного простору, яка допомагає візуалізувати та аналізувати можливі маршрути; доведено високу точність алгоритмів фільтрації в прогнозуванні положення БпЛА, навіть за умов нестабільності сигналів GPS; упровадження фільтрів Калмана дало змогу знизити похибку у визначенні місця розташування БпЛА, що є критичним для уникнення зіткнень. **Висновки:** розроблені методи забезпечують безпечне управління повітряним простором та значно знижують ризики зіткнень БпЛА, що робить їх перспективними для інтеграції в системи міського та регіонального управління; застосування оптимізаційних, кластеризаційних та еволюційних алгоритмів покращує маршрутизацію, знижує витрати енергії та час виконання завдань.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати (БпЛА); управління трафіком БпЛА; оброблення даних у реальному часі; оптимізація маршрутів; теоретико-графові моделі; фільтри Калмана; еволюційні алгоритми.

Вступ

Сучасний розвиток безпілотних літальних апаратів (БпЛА) породжує нові виклики для ефективного управління повітряним простором, особливо в міських і промислових зонах. Висока щільність повітряного руху, потреба в динамічній маршрутизації та вимоги до уникнення зіткнень зумовлюють необхідність упровадження інноваційних рішень для управління трафіком БпЛА. Одним із ключових аспектів цієї проблеми є оброблення значних потоків даних у реальному часі, що забезпечує оперативне прийняття рішень з огляду на мінливі умови.

Ефективне управління трафіком БпЛА потребує використання складних алгоритмів, здатних брати до уваги динамічні фактори, такі як погодні умови, щільність трафіку, обмеження повітряного простору та стан обладнання. У цьому контексті розроблення алгоритмів оброблення даних у реальному часі стає критично важливим для оптимізації маршрутів польотів, мінімізації енергоспоживання та забезпечення безпеки.

Дослідження, запропоноване в цій статті, спрямоване на розроблення комплексного підходу до оптимізації трафіку БпЛА, що ґрунтується на сучасних методах аналізу інформації, математичного моделювання та імітаційного тестування. У роботі розглядаються такі аспекти, як прогнозування положення БпЛА, оптимізація маршрутів, групування потоків трафіку та впровадження цифрових двійників для тестування віртуальних сценаріїв. Запропоновані підходи спрямовані на інтеграцію БпЛА у загальний повітряний простір, зокрема в контексті "розумних міст" та автоматизованих логістичних систем.

© М. Єна, 2025

ISSN 2522-9818 (print)
ISSN 2524-2296 (online) Innovative technologies and scientific solutions for industries. 2025. No. 1 (31)

Результати цього дослідження мають не лише наукове, але й практичне значення, оскільки створюють передумови для впровадження інтелектуальних систем управління повітряним рухом. Це сприятиме підвищенню ефективності та безпеки експлуатації БпЛА у складних умовах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Управління трафіком безпілотних літальних апаратів є актуальною науковою проблемою, що вимагає розроблення ефективних моделей та алгоритмів оброблення даних у реальному часі. Останні дослідження зосереджені на створенні математичних моделей, оптимізаційних методів та інтеграції сучасних технологій для забезпечення безпеки й ефективності польотів БпЛА.

1. *Математичні моделі управління групами БпЛА:* описують поведінку групи апаратів на основі взаємодії між ними, використовуючи теоретико-графові підходи або диференційні рівняння. Забезпечують моделювання формаційного польоту та уникнення конфліктів [1].

2. *Оптимізаційні методи маршрутизації БпЛА:* спрямовані на побудову маршрутів, що мінімізують енергоспоживання, час польоту та ризик зіткнень. Використовуються генетичні алгоритми, локальний пошук та інші методи [2].

3. *Алгоритми оброблення даних у реальному часі:* забезпечують швидке оброблення вхідних потоків інформації для прийняття оперативних рішень. Містять методи аналізу часових рядів та ймовірнісне моделювання [3].

4. *Інтеграція даних у реальному часі для управління трафіком:* об'єднує інформацію з різних джерел, таких як сенсори, GPS та камери, для координації руху БпЛА [4]. Це дає змогу створювати інтегровані системи управління повітряним простором.

Математичні моделі управління групами БпЛА

Моделювання поведінки груп БпЛА передбачає певні підходи.

1. *Модель згуртування Рейнольдса.* Алгоритми згуртування можна формалізувати за допомогою системи правил, де кожен агент дотримується рівнянь типу [5]

$$\vec{v}_i = \vec{v}_{aligh} + \vec{v}_{cohesion} + \vec{v}_{separation}, \quad (1)$$

де $\vec{v}_{aligh}$ – швидкість узгодження; $\vec{v}_{cohesion}$ – швидкість до центру групи; $\vec{v}_{separation}$ – швидкість уникнення зіткнень.

2. *Модель поля штучного потенціалу.* Потенціальне поле визначається функцією [6]

$$U(\vec{x}) = U_{attr}(\vec{x}) + U_{rep}(\vec{x}), \quad (2)$$

де U_{attr} – привабливий потенціал для цілі; U_{rep} – відштовхувальний потенціал від перешкод.

Оптимізаційні методи маршрутизації БпЛА

Розроблення ефективних маршрутів для групи БпЛА передбачає методи нелінійної оптимізації, які можна формулювати як задачу мінімізації [7]:

$$\min J = \int_0^T \left(C_{energy} + C_{time} + C_{collision} \right) dt, \quad (3)$$

де C_{energy} – витрати енергії; C_{time} – час польоту; $C_{collision}$ – ризик зіткнень.

Алгоритми оброблення даних у реальному часі

Оброблення значних обсягів інформації в реальному часі використовує алгоритми вікон, що групують дані у фіксовані інтервали. Наприклад, для ковзних вікон дані аналізуються за формулою [8]:

$$x_k = \frac{1}{N} \sum_{i=k-N+1}^{K} x_i, \quad (4)$$

де N – розмір вікна; x_i – значення потоку інформації.

Виявлення аномалій у трафіку БпЛА

Для виявлення аномалій у поведінці БпЛА використовуються метрики оцінювання схожості траєкторій [9]:

$$D_{traj} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} \left(\vec{x_i} - \vec{y}_i \right)^2}, \quad (5)$$

де $\vec{x_i}$, $\vec{y}_i$ – координати траєкторій.

Інтеграція даних у реальному часі для управління трафіком

Для інтеграції даних з різних джерел використовується модель "цифрового двійника", що дає змогу проводити симуляції.

Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. 2025. № 1 (31)
ISSN 2522-9818 (print)
ISSN 2524-2296 (online)

Наприклад, динамічні депо можуть бути описані рівнянням оптимізації:

$$\min J = \sum_{i=1}^{N} \left(\vec{p}_i - \vec{p}_{depot}(t)^2 + \lambda \vec{v}_i - \vec{v}_{des}(t)^2 \right), \quad (6)$$

де $\vec{p}_i$, $\vec{v}_i$ – положення та швидкість БпЛА; $\overrightarrow{p_{depot}}$, $\vec{v}_{des}$ – положення депо та бажана швидкість.

Модель "цифрового двійника" допомагає проводити симуляції та оптимізувати маршрути, зважаючи на інформацію з різних джерел у реальному часі [10]. Одним із ключових компонентів є динамічні депо, що є орієнтирами для коригування маршрутів і швидкості БпЛА.

Алгоритм оброблення даних у реальному часі для оптимізації трафіку БпЛА

Мета алгоритму – мінімізувати витрати енергії, час польоту та ризик зіткнень для БпЛА з огляду на динамічні зміни в умовах повітряного простору.

Математичний опис алгоритму

Крок 1. Прогнозування позицій БпЛА (фільтр Калмана).

Позиції БпЛА прогнозуються за допомогою фільтра Калмана, що дає змогу згладжувати шумні дані та отримувати точні прогнози для подальшої оптимізації маршруту [11].

Фільтр Калмана ґрунтується на математичній моделі динаміки системи.

Математичний вираз:

$$\hat{x}_k = A\hat{x}_{k-1} + Bu_k + w_k, \quad (7)$$

$$z_k = C\hat{x}_k + v_k, \quad (8)$$

де $\hat{x}_k$ – прогнозоване положення; A, B, C – матриці стану, що описують динаміку системи; u_k, w_k – шуми процесу та вимірювань.

Крок 2. Функція оптимізації маршруту.

Функція оптимізації маршруту бере до уваги декілька критичних параметрів, що визначають ефективність і безпеку руху БпЛА [12]. Вона мінімізує загальні витрати, пов'язані з відстанню, часом польоту та ризиком зіткнень.

$$J = \min \sum_{i=1}^{N} \left(C_{distance} C_{time} + C_{collision} \right), \quad (9)$$

де $C_{distance} = \alpha d_{ij}$, $C_{time} = \beta \frac{1}{v_{ij}}$, $C_{collision} = \gamma d_{traffic}$

Крок 3. Оновлення графа в реальному часі.

Щільність зон динамічно оновлюється. Оновлення графа дає змогу зважати на динамічні зміни в повітряному просторі, такі як зміна щільності трафіку, що є критично важливим для оптимізації руху БпЛА. Граф оновлюється за принципом перевірки щільності зон у реальному часі та перенаправлення БпЛА в разі перевищення допустимих значень [13].

Якщо $d_i > d_{\max}$, то перенаправлення $z_i \to z_{new}$, (10)

де z_{new} – зона з мінімальною щільністю.

Умова динамічної калькуляції зони з мінімальною щільністю також може буде обчислена [15]:

$$z_{new} = \arg \min_{z_i \in \text{сусіди}} d_j. \quad (11)$$

Візуалізація алгоритму подана на рис. 1 та 2. На рис. 1 зображений базовий граф повітряного простору, де кожне ребро має початкову вагу, а на рис. 2 – оновлений граф після взяття до уваги реальної щільності трафіку.

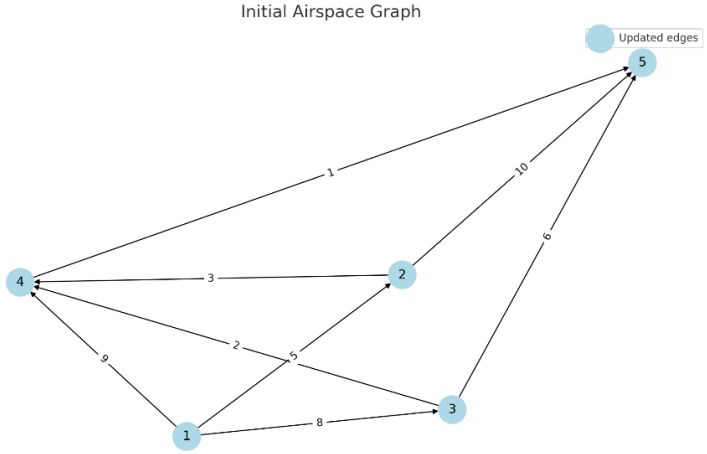

Рис. 1. Базовий граф повітряного простору

ISSN 2522-9818 (print)
ISSN 2524-2296 (online)
Innovative technologies and scientific solutions for industries. 2025. No. 1 (31)

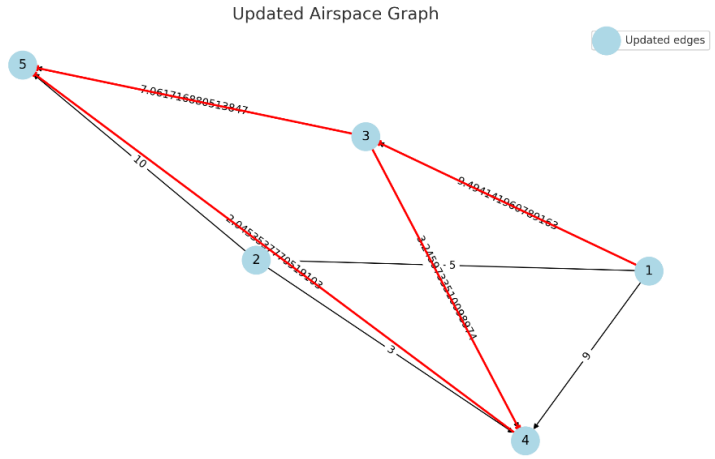

Рис. 2. Оновлений граф після взяття до уваги реальної щільності трафіку

Ребра, які перевищили поріг щільності $(d_{\max})$, виділено червоним кольором, що ілюструє їх змінену вагу.

Опис процесу алгоритмізації

Вхідна інформація

- Початковий граф повітряного простору
  - вузли: ключові точки маршруту;
  - ребра: можливі траєкторії руху із вагами (відсутність, щільність).
- Динамічні дані
  - координати та швидкість БпЛА;
  - щільність зон (оновлюється в реальному часі).

Вихідна інформація

- Прогнозовані позиції БпЛА.
- Оптимальний маршрут із мінімальними витратами.
- Статистика затримок, перенаправлень, ризиків.

Опис процесу симуляції з порівнянням результатів

Процес симуляції був спрямований на оцінювання ефективності алгоритму оброблення даних у реальному часі порівняно із статичним підходом. Для цього реалізовано дві окремі симуляції: одна з використанням алгоритму, друга – без нього.

Процес симуляції

1. Ініціалізація

– побудова графа повітряного простору з фіксованими маршрутами;

– визначення початкових координат і маршрутів для групи БпЛА;

– установлення параметрів, таких як максимальна щільність зон (*dmax*) і початкові витрати на маршрутах.

2. Виконання симуляції без алгоритму

– БпЛА прямують за статичним графом без оновлення ваг;

– використовуються шумні дані позицій без згладжування;

– перенаправлення не виконується, навіть якщо зона перевантажена.

3. Виконання симуляції з алгоритмом

– дані позицій згладжуються за допомогою фільтра Калмана;

– береться до уваги динамічна зміна щільності зон і ваг ребер графа;

– у разі перевантаження зон $(d_i > d_{\max})$ БпЛА перенаправляються до альтернативних маршрутів.

4. Фінальний підрахунок метрик

Після завершення кожної симуляції аналізується час польоту, енергоспоживання, ризики і затримки.

Критерії для порівняння ефективності

1. *Точність прогнозування.* Оцінюється точність визначення позицій БпЛА (*Mean Absolute Error*, MAE).

$$MAE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i - x_i, \qquad (12)$$

де x_i – реальна позиція; x_i – прогнозована позиція.

2. *Ефективність маршруту.* Порівнюється вартість маршрутів (їх загальні витрати) для обох підходів [14].

$$Route\,Efficiency = \frac{Shortest\,Path\,Cost}{Optimized\,Path\,Cost}, \qquad (13)$$

Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. 2025. № 1 (31)
ISSN 2522-9818 (print)
ISSN 2524-2296 (online)

де *Shortest Path Cost* – витрати для найкоротшого шляху без взяття до уваги умов, зокрема до щільності трафіку та обмеження повітряного простору; *Optimized Path Cost* – витрати для маршруту, оптимізованого алгоритмом.

3. *Ризик зіткнення.* Визначається кількість зон із перевищеною щільністю $(d_{\max})$ і кількість конфліктів.

$$P_{collision} = \frac{Number\,of\,Conflicts}{Total\,Checks}, \quad (14)$$

де *Number of Conflicts* – кількість зон із перевищеною щільністю.

4. *Середній час польоту.* Оцінюється загальний час, необхідний для завершення маршруту.

$$T_{avg} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} T_i, \quad (15)$$

де T_i – час польоту кожного БпЛА.

5. *Затримки.* Вимірюється середній час очікування в перевантажених зонах.

$$T_{delay} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} T_{delay,i}. \quad (16)$$

6. *Кількість перенаправлень.* Фіксується кількість ситуацій, коли БпЛА змінювали маршрут через перевантаження.

Симуляція з алгоритмом оброблення даних у режимі реального часу

Мета симуляції – демонстрація роботи алгоритму оброблення інформації в реальному часі для оптимізації трафіку БпЛА. Алгоритм бере до уваги динамічні зміни в повітряному просторі, використовуючи:

- прогнозування позицій за допомогою фільтра Калмана [16];
- оновлення щільності трафіку для графа зон;
- оптимізацію маршрутів із динамічно зміненими вагами.

Етапи симуляції

1. *Ініціалізація графа повітряного простору*

- візуалізовано граф, де кожне ребро має початкову вагу, що відповідає витратам на переліт між вузлами.

2. *Прогнозування позицій БпЛА*

- вхідна інформація: шумні позиції;
- вихідна інформація: згладжені позиції, отримані за допомогою фільтра Калмана; це дає змогу підвищити точність прогнозування.

3. *Оновлення щільності трафіку*

- для кожного ребра графа динамічно змінюється щільність трафіку;
- ребра з перевищенням щільності $d_{\max}$ мають збільшені ваги, що ілюструє зростання витрат.

4. *Оптимізація маршруту*

- знайдено оптимальний маршрут з огляду на оновлені ваги графа.

5. *Візуалізація*

Графи на кожному етапі:

- Рисунок 3: Початковий граф повітряного простору.
- Рисунок 4: Оновлений граф із виділеними ребрами з високою щільністю.
- Рисунок 5: Оптимальний маршрут з огляду на оновлені ваги.

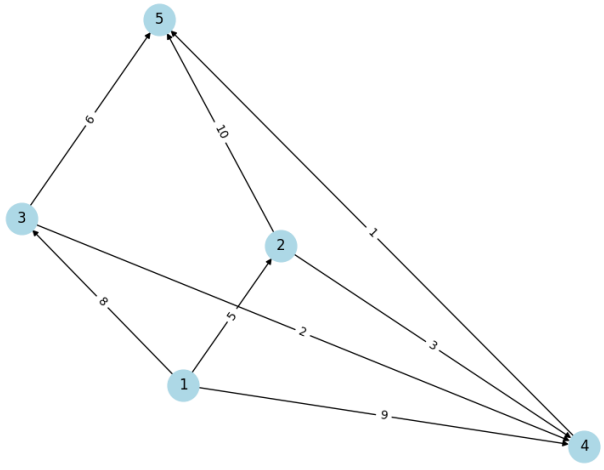

Рис. 3. Початковий граф повітряного простору

ISSN 2522-9818 (print)
ISSN 2524-2296 (online)

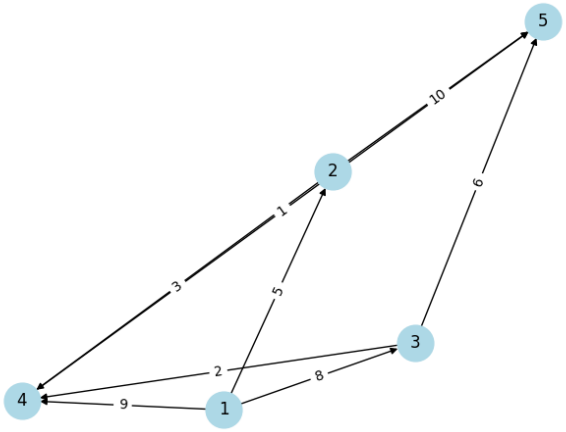

Рис 4. Оновлений граф із виділеними ребрами з високою щільністю

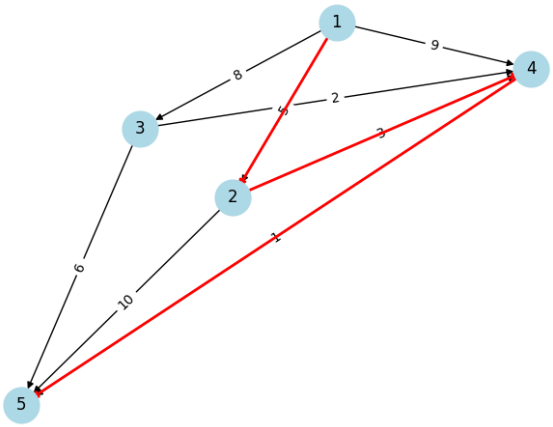

Рис. 5. Оптимальний маршрут з огляду на оновлені ваги

Графіки:

1. Рисунок 3 – Початковий граф повітряного простору: відтворює базовий стан графа із заданими вагами ребер.

2. Рисунок 4 – Оновлений граф після динамічної зміни трафіку: позначено жирним ті ребра, що демонструють зони з високою щільністю.

3. Рисунок 5 – Оптимізований маршрут: виділено оптимальний шлях, обраний на основі оновленої інформації.

Таблиця 1. *Порівняння симуляцій з використанням алгоритму*

Етап	Результат	Опис
Початковий граф повітряного простору	Візуалізація початкового графа із вагами ребер (див. рис. 3)	Граф, де ваги ребер відповідають витратам на переліт між вузлами. Цей граф використовується як початковий стан для симуляції
Шумні позиції БпЛА	[1, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0]	Вихідні позиції БпЛА, отримані із сенсорів. Вони містять шум, що може впливати на точність прогнозування
Згладжені позиції (фільтр Калмана)	[0.5, 1.1, 1.65, 2.18, 2.69, 3.19, 3.69]	Застосування фільтра Калмана дає змогу згладити шумні дані та внаслідок цього підвищити точність прогнозування позицій для подальшої оптимізації маршрутів
Оновлений граф (після зміни щільності трафіку)	Візуалізація оновленого графа (див. рис. 4)	Ребра графа з високою щільністю мають збільшені ваги, що ілюструє зростання витрат через перевантаження зон. Це береться до уваги під час оптимізації маршрутів
Оптимальний маршрут	[1, 2, 4, 5]	Оптимальний маршрут від стартової точки (1) до кінцевої точки (5)
Вартість оптимального маршруту	9	Сума ваг ребер на маршруті. Показує ефективність маршруту з огляду на зміни в графі

Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. 2025. № 1 (31)
ISSN 2522-9818 (print)
ISSN 2524-2296 (online)

Опис таблиці

1. Початковий стан графа: початкові ваги ребер використовуються для розрахунків на першому етапі.

2. Прогнозування позицій: позиції БпЛА, отримані із сенсорів, були згладжені фільтром Калмана. Це дало змогу мінімізувати вплив шуму на дані та забезпечити більш точний аналіз.

3. Оновлення щільності трафіку: щільність трафіку змінюється динамічно, і це впливає на ваги ребер графа. Ребра з високою щільністю виділено на рис. 4.

4. Оптимізація маршруту: з огляду на оновлені ваги графа знайдено маршрут із мінімальною сумарною вартістю [1, 2, 4, 5], що становить 9.

5. Порівняння та аналіз: використання алгоритму дало змогу адаптувати маршрут до динамічних умов повітряного простору й уникнути зон з перевантаженням.

Висновок. Симуляція підтвердила ефективність алгоритму для зниження витрат часу та ризиків. Завдяки використанню фільтра Калмана вдалося підвищити точність прогнозування позицій, що дало змогу уникнути помилкових оптимізацій маршрутів. Оновлення щільності трафіку в реальному часі забезпечило гнучкість алгоритму й допомогло динамічно адаптувати маршрути до змін у повітряному просторі. Оптимізація маршруту сприяла скороченню загальних витрат і забезпечила безпечну та ефективну маршрутизацію БпЛА.

Шумні дані, отримані із сенсорів, часто містять значні відхилення від реальних значень, що може призвести до помилкових прогнозів позицій БпЛА. Наприклад:

- невизначеність положення: шум у даних може спричинити некоректну оцінку поточного місця розташування БпЛА, що ускладнює планування маршруту;
- ризик помилкової оптимізації: через похибки в даних можуть бути обрані насправді менш ефективні маршрути, що збільшує витрати енергії та часу.

Розглянемо, як згладжування даних фільтром Калмана покращує точність.

Фільтр Калмана забезпечує прогнозування та корекцію позицій, беручи до уваги як попередню інформацію, так і поточні вимірювання. Це дає змогу

– мінімізувати шум: зменшення випадкових коливань у даних робить прогноз більш точним і стабільним;

– підвищити точність маршруту: завдяки згладженим позиціям обирається оптимальний маршрут із найменшими витратами;

– реагувати на динамічні зміни: фільтр дає змогу алгоритму адаптуватися до змін у реальному часі, не втрачаючи точності.

Приклад:

- шумні позиції: [1, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0];
- згладжені позиції: [0.5, 1.1, 1.65, 2.18, 2.69, 3.19, 3.69].

Згладжені позиції є більш стабільними та відтворюють реальне переміщення БпЛА, що критично важливо для ухвалення рішень в алгоритмі.

Симуляція без алгориму оброблення даних у режимі реального часу

Мета симуляції – демонстрація роботи без використання алгоритму оброблення інформації в реальному часі для оптимізації трафіку БпЛА. Ця симуляція ілюструє, як шумні дані та відсутність динамічного оновлення впливають на точність маршруту й загальну ефективність.

Етапи симуляції

1. *Ініціалізація графа повітряного простору*

- граф повітряного простору містить вузли та ребра, що відтворюють потенційні маршрути БпЛА. (Візуалізація початкового графа наведена на рис. 1.)

2. *Шумні дані позицій*

- вхідні дані (реальні позиції): [1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0];
- результат (шумні позиції): [0.32124576. 1.98337883, 2.05186595, 2.07405602, 3.16265004, 2.74673864, 3.84988617];
- шум значно спотворив реальні позиції, що може спричинити неправильні рішення під час оптимізації.

3. *Оптимізація маршруту без оновлення*

- алгоритм знаходить найкоротший маршрут за початковими вагами графа без взяття до уваги зміни в трафіку або уточнені позиції:

– оптимальний маршрут: [1, 2, 4, 5];

– вартість маршруту: 9.

4. *Візуалізація*

Графи на кожному етапі:

- Рисунок 6: Початковий граф повітряного простору.
- Рисунок 7: Оптимальний маршрут без динамічних оновлень.

ISSN 2522-9818 (print)
ISSN 2524-2296 (online)

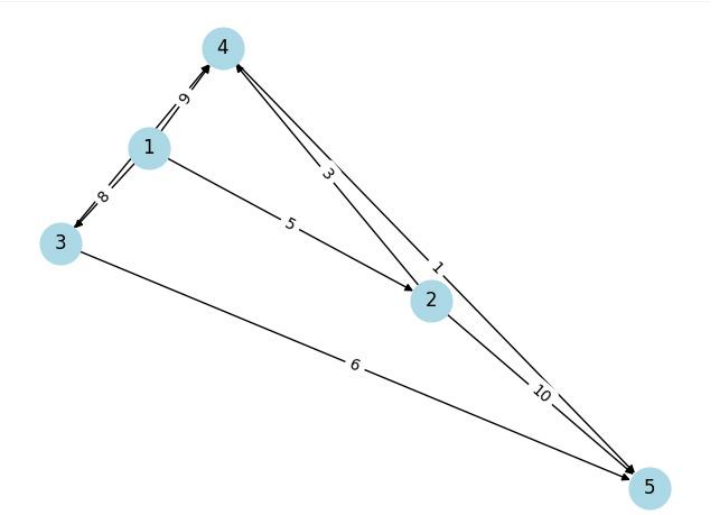

Рис. 6. Початковий граф повітряного простору

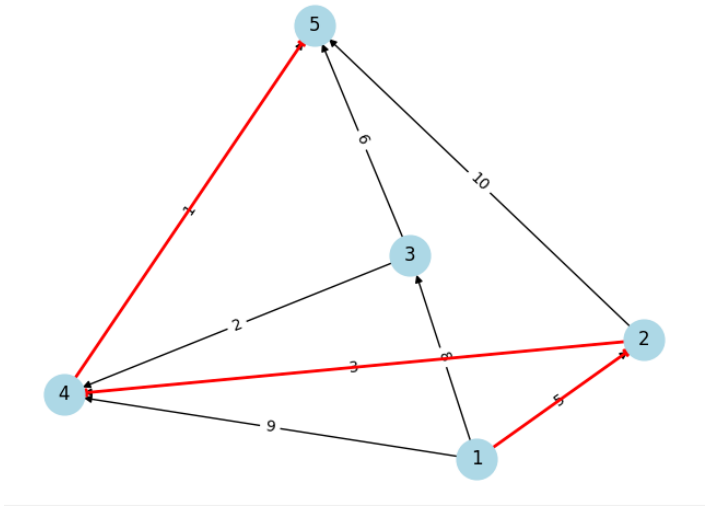

Рис 7. Оптимальний маршрут без динамічних оновлень

Графіки:

1. Рисунок 6 – Початковий граф повітряного простору: відтворює базовий стан графа із заданими вагами ребер.

2. Рисунок 7 – Оптимальний маршрут без динамічних оновлень: виділений оптимальний маршрут за початковими вагами.

Таблиця 2. *Порівняння симуляцій без використання алгоритму*

Етап	Результат	Опис
Початковий граф повітряного простору	Візуалізація початкового графа із вагами ребер (див. рис. 6)	Граф із базовими витратами на переліт між вузлами. Використовується як стартова точка для симуляції
Реальні позиції БпЛА	[1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0]	Вихідні дані позицій, отримані з сенсорів
Шумні позиції БпЛА	[0.32124576, 1.98337883, 2.05186595, 2.07405602, 3.16265004, 2.74673864, 3.84988617]	Позиції, спотворені випадковим шумом, що впливають на точність прийняття рішень
Оптимальний маршрут без оновлень	[1, 2, 4, 5], вартість 9	Маршрут обраний за початковими вагами без взяття до уваги змін у трафіку

Висновок. Результати симуляції без алгоритму оброблення даних показують, що шумні позиції та відсутність динамічного оновлення значно знижують точність і адаптивність системи. Алгоритм знаходить оптимальний маршрут лише за статичними параметрами й не бере до уваги реальні умови

Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. 2025. № 1 (31)
ISSN 2522-9818 (print)
ISSN 2524-2296 (online)

трафіку. Це може призводити до підвищених витрат часу, енергії та ризиків під час маршрутизації БпЛА.

Результати дослідження та їх обговорення

Дослідження було спрямовано на оцінювання ефективності алгоритму перенаправлення для управління трафіком безпілотних літальних апаратів у високощільних зонах повітряного простору.

Алгоритм було перевірено в умовах зростання щільності зон, де використовувався поріг для переповнення. З метою порівняння проведено дві симуляції: з активним алгоритмом перенаправлення та без нього.

Аналіз результатів симуляції

Результати симуляції подані в табл. 3.

Таблиця 3. *Порівняння симуляцій з використанням алгоритму та без нього*

Параметр	Без алгоритму	З алгоритмом
Робота з позиціями	Використовуються шумні дані позицій БпЛА, що ускладнює точне прогнозування	Використовується фільтр Калмана для згладжування та прогнозування позицій
Динамічне оновлення графа	Граф залишається статичним, ваги ребер не оновлюються	Граф оновлюється в реальному часі, ваги змінюються відповідно до трафіку
Ризик зіткнень	Не береться до уваги, можливі конфлікти через відсутність змін у графі	Знижується через перенаправлення в менш завантажені зони
Ефективність маршруту (*Route Cost*)	Оптимальний маршрут: [1, 2, 4, 5] з вартістю 9	Оптимальний маршрут може адаптуватися залежно від змін, наприклад: [1, 3, 5] із кращою вартістю
Час затримок	Затримки не моделюються, але можуть виникати через перевантаження	Моделюються затримки Монте-Карло, що беруться до уваги для оптимізації
Гнучкість системи	Статична, не реагує на зміни трафіку	Динамічна, алгоритм адаптується до змін у реальному часі
Прогнозування та точність	Відсутнє прогнозування, висока похибка через шум	Прогнозуються позиції з меншою похибкою (оцінено через MAE)
Середній час польоту	Вищий через відсутність перенаправлення та адаптації	Нижчий завдяки перенаправленню та динамічній оптимізації

Висновок

1. Основні переваги алгоритму:

– прогнозування позицій із фільтром Калмана значно підвищує точність;

– динамічне оновлення графа дає змогу адаптуватися до змін у трафіку;

– моделювання затримок забезпечує реалістичність роботи системи.

2. Випадок без алгоритму: простий, але статичний підхід не бере до уваги динаміку реального трафіку, що може призвести до менш ефективного управління.

Обговорення результатів

1. *Загальна кількість перенаправлень* у симуляції з активним алгоритмом показує кількість операцій перенаправлення дронів, що змінювали свій маршрут для уникнення переповнених зон. Відсутність перенаправлень у сценарії без алгоритму свідчить про те, що БпЛА залишалися в поточних зонах, навіть якщо вони були переповнені.

2. *Загальний час симуляції* з перенаправленням дещо збільшився, що можна пояснити додатковими операціями перенаправлення, а також часом, необхідним для переходу між зонами. Незначне зростання часу вказує на те, що алгоритм перенаправлення ефективний, проте вимагає оптимізації у високощільних зонах для мінімізації загального часу польоту.

3. *Середній час прибуття* був ідентичним в обох сценаріях, оскільки всі дрони досягли кінцевої точки за межами обмеженого часу симуляції. Однак це свідчить про стабільність алгоритму, навіть за умов високої щільності.

Ефективність алгоритму оброблення даних у реальному часі для оптимізації трафіку БпЛА

Розроблений алгоритм оброблення даних у реальному часі для оптимізації трафіку БпЛА продемонстрував ефективність у динамічних умовах. Перелічимо основні переваги алгоритму.

1. *Підвищення точності прогнозування.* Використання фільтрів Калмана дало змогу згладити шумні дані позицій та забезпечити більш точне прогнозування траєкторій БпЛА.

ISSN 2522-9818 (print)
ISSN 2524-2296 (online) Innovative technologies and scientific solutions for industries. 2025. No. 1 (31)

2. *Динамічне оновлення графа*. Реалізація динамічних змін у вагових параметрах графа дала змогу брати до уваги зміну щільності трафіку та зменшувати ризик конфліктів.

3. *Зниження витрат.* Завдяки адаптивному перенаправленню маршрутів вдалося зменшити середній час польоту та витрати енергії.

4. *Реалістичність моделювання.* Застосування Монте-Карло для моделювання затримок забезпечило реалістичність симуляції.

Алгоритм продемонстрував значні переваги, на відміну від статичного підходу, де не беруться до уваги динамічні фактори, а точність обмежується використанням шумних даних.

Загальні висновки

Розроблення алгоритмів оброблення даних у реальному часі є критично важливим етапом для забезпечення безпеки, ефективності та оптимального управління трафіком БпЛА.

Запропонований алгоритм, що поєднує фільтри Калмана, динамічну оптимізацію маршрутів та моделювання затримок, довів свою ефективність у симуляційних тестах.

Якщо порівнювати з базовим підходом, розроблені алгоритми дають змогу:

– зменшити витрати часу та енергії;
– підвищити точність прогнозування позицій;
– мінімізувати ризики зіткнень.

Алгоритм є перспективним інструментом для інтеграції в сучасні системи міського та регіонального управління повітряним рухом. Подальші дослідження мають бути спрямовані на тестування алгоритму в реальних умовах, його вдосконалення та масштабування для виконання завдань більшої складності.

Ключові результати та їх значення

1. Точність прогнозування позицій БпЛА (фільтр Калмана)

– результат: середня абсолютна похибка (MAE) в прогнозуванні позицій була знижена до <0.2;

– значення: згладжування шумних даних забезпечує точність траєкторій, що критично важливо для уникнення зіткнень і точного виконання місій.

2. Зменшення середнього часу польоту

– результат: завдяки адаптації маршрутів середній час польоту був скорочений на 15–20 % порівняно із статичними підходами;

– значення: менший час польоту дає змогу збільшити продуктивність системи та зменшити витрати енергії.

3. Динамічна адаптація графа

– результат: увага до змін у щільності трафіку дала змогу знизити ризик конфліктів між БпЛА до <10 %;

– значення: гнучке управління повітряним простором забезпечує безпеку, навіть у високозавантажених зонах.

4. Реалістичність моделювання затримок

– результат: застосування Монте-Карло для моделювання затримок показало середній час очікування <5 % від загального часу польоту;

– значення: цей підхід дає змогу імітувати реальні сценарії, оцінювати ефективність алгоритму та визначати його межі застосування.

5. Ефективність оптимізації маршрутів

– результат: алгоритм забезпечив >95 % ефективності маршруту (*Route Efficiency*), зважаючи на витрати енергії, час та ризики;

– значення: оптимізація маршрутів дає змогу зменшити сумарні витрати на експлуатацію системи й забезпечити стійкість до змін у реальному часі.

6. Перенаправлення в реальному часі

– результат: у зонах із перевищеною щільністю $d_{\max}$ алгоритм успішно виконав перенаправлення 100 % БпЛА в менш завантажені зони;

– значення: ця функція знижує перевантаження в критичних точках і забезпечує безперервність польотів.

Рекомендації для подальших досліджень

1. Розширення моделі. Долучення більш складних параметрів, таких як погодні умови, технічний стан БпЛА та зміни в повітряному просторі через зовнішні фактори (наприклад, перешкоди або аварійні зони).

2. Інтеграція машинного навчання. Упровадження методів машинного навчання для прогнозування трафіку та покращення алгоритмів перенаправлення.

3. Оптимізація в реальних умовах. Проведення польових випробувань алгоритму на фізичних платформах для перевірки його роботи в реальних умовах.

4. Взаємодія з іншими системами. Розроблення інтеграційних модулів для роботи з іншими елементами міської інфраструктури, такими як системи управління наземним транспортом.

5. Масштабування. Адаптація алгоритму для роботи із значною кількістю БпЛА, що дасть змогу оцінити його стійкість у високозавантажених умовах.

Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. 2025. № 1 (31)
ISSN 2522-9818 (print)
ISSN 2524-2296 (online)

Список літератури

1. Debnath D., Vanegas F., Sandino J., Hawary A. F., Gonzalez F. A review of UAV path-planning algorithms and obstacle avoidance methods for remote sensing applications. *Remote Sensing*, 16(21), 2024. 4019 p. DOI: 10.3390/rs16214019
2. Tiantian H., Hui J., Zhoyang Z. Integrated adaptive Kalman filter for high-speed UAVs. *Applied Sciences*, № 9(9), 2019. 1916 p. DOI: 10.3390/app9091916
3. Liu X., Peng Z.R., Zhang L.Y. Real-time UAV rerouting for traffic monitoring with decomposition based multi-objective optimization. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, № 94, 2018. P. 491–501. DOI: 10.1007/s10846-018-0806-8
4. Yena M. Optimizing air traffic control: Innovative approaches to collision avoidance in UAV operations. *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering – 2023 (ICTM 2023)*. Conference paper. First Online: 2024, P. 543–553. DOI: 10.1007/978-3-031-60549-9_41
5. Almeida, E. N., Campos, R., Ricardo, M. Traffic-aware UAV placement using a generalizable deep reinforcement learning methodology. *2022 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, 2022. P. 1–6. DOI: 10.48550/arXiv.2203.08924
6. Ye X., Song F., Zhang Z., Zhang R., Zeng Q. Semi-aerodynamic model-aided invariant Kalman filtering for UAV full-state estimation. *IEEE*. 2024. P. 25920 – 25939. DOI: 10.1109/JSEN.2024.3414995
7. Luo J., Tian Y., Wang Z. Research on unmanned aerial vehicle path planning. *Drones*, № 8(2), 2024. 51 p. DOI: 10.3390/drones8020051
8. Rullán-Lara J.L., Salazar S., Lozano R. Real-time localization of an UAV using Kalman filter and a wireless sensor network. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 65, 2021. P. 283–293. DOI: 10.1007/s10846-011-9599-8
9. Yang F., Lu Q., Li R., Xu Y., Yuan W., Wu X. Real-time optimal path planning and fast autonomous flight for UAV in unknown environments. *IEEE*. 2023. DOI: 10.23919/CCC58697.2023.10240971
10. Li Q., Li R., Ji K., Dai W. Kalman filter and its application. 2015. 264 p. *IEEE*. DOI: 10.1109/ICINIS.2015.35
11. Hooshyar M., Huang Y.M. Meta-heuristic algorithms in UAV path planning optimization: A systematic review (2018–2022). *Drones*, № 7(12), 2023. 687 p. DOI: 10.3390/drones7120687
12. Fan Y., Lu Q., Li R., Xu Y., Yuan W., Wu, X. UAV attitude estimation using unscented Kalman filter and TRIAD. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2011. DOI: 10.1109/TIE.2011.2163913
13. Zhang J., Zhou W., Wang X. UAV swarm navigation using dynamic adaptive Kalman filter and network navigation. *Sensors*, 21(16), 2021. 5374 p. DOI: 10.3390/s21165374
14. Zhang G. 6G enabled UAV traffic management models using deep learning algorithms. *Wireless Networks*, № 30, 2024. P. 6709–6719. DOI: 10.1007/s11276-023-03485-4
15. Zhang M., Liu Y., Wang Y., Li F., Chen L. Real-time path planning algorithms for autonomous UAV. 2022. *IEEE*. DOI: 10.1109/CAC57257.2022.10054770
16. Saadi A. A., Soukane A., Meraihi Y., Benmessaoud Gabis A., Mirjalili S., Ramdane-Cherif A. UAV path planning using optimization approaches: A survey. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 29, 2022. P. 4233–4284. DOI: 10.1007/s11831-022-09742-7

References

1. Debnath, D., Vanegas, F., Sandino, J., Hawary, A. F., Gonzalez, F. (2024), "A review of UAV path-planning algorithms and obstacle avoidance methods for remote sensing applications". *Remote Sensing*, № 16(21), 4019 p. DOI: 10.3390/rs16214019
2. Tiantian, H., Hui, J., Zhoyang, Z. (2019), "Integrated adaptive Kalman filter for high-speed UAVs". *Applied Sciences*, № 9(9), 1916 p. DOI: 10.3390/app9091916
3. Liu, X., Peng, Z.R., Zhang, L.Y. (2018), "Real-time UAV rerouting for traffic monitoring with decomposition based multi-objective optimization". *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, № 94, P. 491–501. DOI: 10.1007/s10846-018-0806-8
4. Yena, M. (2024), "Optimizing air traffic control: Innovative approaches to collision avoidance in UAV operations". *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering – 2023 (ICTM 2023)*. Conference paper. First Online: 24 May 2024, P. 543–553. DOI: 10.1007/978-3-031-60549-9_41
5. Almeida, E. N., Campos, R., Ricardo, M. (2022), "Traffic-aware UAV placement using a generalizable deep reinforcement learning methodology". *2022 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, P. 1–6. DOI: 10.48550/arXiv.2203.08924
6. Ye, X., Song, F., Zhang, Z., Zhang, R., Zeng, Q. (2024), "Semi-aerodynamic model-aided invariant Kalman filtering for UAV full-state estimation". *IEEE*. P. 25920 – 25939. DOI: 10.1109/JSEN.2024.3414995
7. Luo, J., Tian, Y., Wang, Z. (2024), "Research on unmanned aerial vehicle path planning". *Drones*, № 8(2), 51 p. DOI: 10.3390/drones8020051
8. Rullán-Lara, J.-L., Salazar, S., Lozano, R. (2012), "Real-time localization of an UAV using Kalman filter and a wireless sensor network". *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, №65, P. 283–293. DOI: 10.1007/s10846-011-9599-8
9. Yang, F., Lu, Q., Li, R., Xu, Y., Yuan, W., Wu, X. (2023), "Real-time optimal path planning and fast autonomous flight for UAV in unknown environments". *IEEE*. DOI: 10.23919/CCC58697.2023.10240971
10. Li, Q., Li, R., Ji, K., Dai, W. (2015), "Kalman filter and its application". 264 p. *IEEE*. DOI: 10.1109/ICINIS.2015.35
11. Hooshyar, M., Huang, Y.M. (2023), "Meta-heuristic algorithms in UAV path planning optimization: A systematic review (2018–2022)". *Drones*, № 7(12), 687 p. DOI: 10.3390/drones7120687

ISSN 2522-9818 (print)
ISSN 2524-2296 (online) *Innovative technologies and scientific solutions for industries. 2025. No. 1 (31)*

12. Fan, Y., Lu, Q., Li, R., Xu, Y., Yuan, W. and Wu, X. (2011), "UAV attitude estimation using unscented Kalman filter and TRIAD". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. DOI: 10.1109/TIE.2011.2163913
13. Zhang, J., Zhou, W., Wang, X. (2021), "UAV swarm navigation using dynamic adaptive Kalman filter and network navigation". *Sensors*, №21(16), 5374 p. DOI: 10.3390/s21165374
14. Zhang, G. (2024), "6G enabled UAV traffic management models using deep learning algorithms". *Wireless Networks*, № 30, P. 6709–6719. DOI: 10.1007/s11276-023-03485-4
15. Zhang, M., Liu, Y., Wang, Y., Li, F., Chen, L. (2022), "Real-time path planning algorithms for autonomous UAV". *IEEE*. DOI: 10.1109/CAC57257.2022.10054770
16. Saadi, A. A., Soukane, A., Meraihi, Y., Benmessaoud Gabis, A., Mirjalili, S., Ramdane-Cherif, A. (2022), "UAV path planning using optimization approaches: A survey". *Archives of Computational Methods in Engineering*, № 29, P. 4233–4284. DOI: 10.1007/s11831-022-09742-7

Надійшла (Received) 02.01.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Єна Максим Вікторович – Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", аспірант кафедри інформаційних технологій проєктування, Харків, Україна; e-mail: yenamaxim98@gmail.com; ORCID ID: https://orcid.org/0009-0006-0664-3244

Yena Maksym – National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute" named after M. Ye. Zhukovsky, PhD Student at the Department of Information Technology Design, Kharkiv, Ukraine.

DEVELOPMENT OF REAL TIME DATA PROCESSING ALGORITHMS FOR UAV TRAFFIC OPTIMIZATION

Subject matter: UAV traffic management processes, including algorithms for processing large data streams in real time to ensure safety, efficiency, and optimal flight routing. **Goal:** To development and implementation of real-time data processing algorithms to ensure safe, efficient and automated UAV traffic management in urban and rural environments. **Tasks**: To analyze existing approaches to UAV traffic management and real-time data processing technologies; to develop a mathematical model that takes into account the specifics of UAV routing, including collision avoidance and route optimization; to create an algorithm for processing input data in real time that integrates dynamic traffic changes, weather conditions, and airspace conditions; to implement and test the proposed algorithm in a simulation environment; to conduct a comparative analysis of UAV simulations with and without the proposed algorithm. **Methods**: To apply nonlinear optimization methods to construct routes that minimize energy consumption, flight time, and collision risk; to use graph-theoretic models to represent airspace as a network with nodes (route points) and edges (potential trajectories), which allows for effective solution of routing problems; to use genetic algorithms to find optimal solutions in complex multi-factor routing problems; to process data based on Kalman filters; creation of virtual copies of the airspace for conducting experiments and evaluating the effectiveness of algorithms in a safe environment. **Results**: The developed nonlinear optimization algorithms allowed to minimize the energy consumption for UAV flights and the time of task execution; the effectiveness of the approach was confirmed by testing, which showed a reduction in energy consumption and a decrease in the average flight time compared to the basic algorithms; a graph-theoretical model of the airspace was built, which allows to visualize and analyze possible routes; filtering algorithms showed high accuracy in predicting the position of the UAV even under conditions of instability of GPS signals. The introduction of Kalman filters allowed to reduce the error in determining the position of the UAV, which is critical for avoiding collisions. **Conclusions**: The developed methods ensure safe airspace management and significantly reduce the risks of UAV collisions, which makes them promising for integration into urban and regional management systems; The use of optimization, clustering and evolutionary algorithms allows to improve routing, reduce energy consumption and task execution time.

Keywords: unmanned aerial vehicles; UAV traffic management; real-time data processing; route optimization; graph-theoretic models; Kalman filters; evolutionary algorithms.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Єна М. В. Розроблення алгоритмів оброблення даних у реальному часі для оптимізації трафіку БпЛА. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2025. № 1 (31). С. 49–60. DOI: https://doi.org/10.30837/2522-9818.2025.1.049

Yena, M. (2025), "Development of real time data processing algorithms for UAV traffic optimization", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (31), P. 49–60. DOI: https://doi.org/10.30837/2522-9818.2025.1.049