

Р. В. Куліш

Льотна академія Національного авіаційного університету, Кропивницький, Україна

МОДЕЛЬ УРАХУВАННЯ БІЧНОГО ВІТРУ ПРИ ПЛАНУВАННІ МАРШРУТІВ ПОЛЬОТУ БЕЗПЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ

Анотація. В статті ґрунтуючись на сучасних методах оптимізації траєкторія польоту безпілотного літального апарату (БпЛА), що враховують існуючі обмеження, розроблена модель врахування бічного вітру при плануванні маршрутів польоту БпЛА, яка ґрунтується на побудові оптимального фільтра Калмана. Дана модель дозволяє корегувати маршрутні точки БпЛА при виконанні завдань моніторингу елементів критичної інфраструктури, що зменшує маршрут польоту БпЛА при виконанні завдання моніторингу з урахуванням складних умов польоту та зменшує ступінь завантаження бортового обчислювального пристрою БпЛА.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, маршрутизація, моніторинг об'єкти критичної інфраструктури, планування маршрутів.

Вступ

Постановка проблеми. Розв'язана росією повномасштабна війна проти України вимагає концентрації зусиль всього суспільства та наукової думки щодо протидії агресору. Об'єкти критичної інфраструктури стали основними цілями для нанесення ударів державою-терористом особливо в зимовий період [1, 2]. Генеруючі потужності, електропідстанції, високовольтні лінії електропередач, об'єкти комунальної інфраструктури міст вимагають постійного моніторингу та оперативного реагування як в умовах війни, так і в умовах мирного часу.

Для отримання оперативної та достовірної інформації щодо елементів критичної інфраструктури (ЕКІ) можна активно застосовувати безпілотні літальні апарати [3, 4].

Вони здатні здійснювати:

- моніторинг стану транспортних магістралей та мостів, нафто- й газопроводів, ліній електропередач, елементів\ електростанцій та інших ЕКІ;
- проводити інженерну розвідку районів поведень, землетрусів та інших стихійних лих на об'єктах критичної інфраструктури, визначення точних координат постраждалих ЕКІ;
- доставку малогабаритних спеціальних вантажів та засобів, необхідних для проведення аварійно-рятувальних робіт й життєзабезпечення персоналу об'єктів критичної інфраструктури при терористичних атаках;
- виявлення ступеня хімічного (на хімічно небезпечних об'єктах) або радіоактивного (на радіаційних небезпечних об'єктах) зараження місцевості зі встановленням точних даних про концентрацію шкідливих речовин й рівень небезпечного випромінювання для визначення можливості спрямування рятувальників, вибору часу й режиму їх роботи, а також необхідних засобів індивідуального захисту;
- патрулювання територію розташування об'єкта критичної інфраструктури з метою запобігання несанкціонованому доступу на цю територію;
- моніторингу ЕКІ, отримання оперативної інформації щодо їх стану.

Рішення завдання ефективного планування для моніторингу ЕКІ має свої особливості, що зумовлені великою площею пошуку, незначними (або навпаки, значними) геометричними розмірами об'єктів моніторингу, необхідністю розпізнавання критичних змін, пошуку динамічних об'єктів (як, наприклад, порушників периметру) об'єкту, несприятливими факторами зовнішнього середовища для виконання польотів, необхідністю вибору доцільного корисного навантаження для БпЛА. Розроблення методів моніторингу ЕКІ за допомогою БпЛА вимагає розроблення моделей щодо врахування впливу негативних умов польоту. Одним з факторів, що найбільше впливають на політ БпЛА, є бічний вітер, який не вимірюється більшістю сучасних бортових датчиків недорогих БпЛА. Таким чином, для підвищення точності маршруту необхідно оцінити кут вітрового зносу за допомогою ідентифікатора.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В роботах по плануванню застосування БпЛА [6, 7] визначаються основні несприятливі фактори планування польоту: вітер, опади, хмарність, зледеніння.

В літературі по метеорології вказано [8, 9], що погода постійно змінюється, причому ці зміни можуть бути помітні на досить короткому проміжку часу. Зміни погоди бувають періодичними та неперіодичними. Неперіодичні зміни пов'язані з рухом повітряних мас. Рух повітряних мас викликається нерівномірним прогрівом земної поверхні внаслідок різного кута падіння сонячних променів. Біля екватора наземний повітряний шар прогрівається значно краще, ніж на полюсах, що викликає рух повітряних потоків по всій земній кулі. При перенесенні повітряних мас із одних районів Землі до інших переносяться і характеристики погоди. Тому для фізико-географічних умов конкретної країни можна визначити, який вітер приносить яку погоду. Крім цього, для кожного регіону є типова погода, властива лише цьому регіону. Наприклад, для Києва та пригородів типовий й найчастіший напрямок вітру є західний. Для Луганська типовий вітер – східний. Отже східний вітер у районі Києва свідчить про швидку зміну погоди, а в районі Луганську – навпаки.

Зі збільшенням висоти вітер посилюється через зменшення сили тертя поверхню Землі. Земна пове-

рхня неоднорідна за своїм кольором, рельєфом і вологістю. Тому під впливом сонячних променів вона прогрівається нерівномірно. Темніші і сухі поверхні прогріваються значно швидше, ніж світлі та вологі, віддаючи значно більше тепла повітря. Також на прогрів значно впливають схили та височини, наприклад південний схил тепліший за північний, а східний схил прогрівається раніше ніж західний. Усі ці чинники створюють передумови виникнення термічної активності повітря. Тепліше, прогріте повітря, спрямовується вгору (виникають висхідні термічні потоки, або терміки), а на його місце підтягується повітря з холодніших зон (виникає термічний, або місцевий вітер). Так виникають посилення чи навпаки стихання вітру у наземному шарі за умови наявності фонового вітру. За відсутності фонового вітру місцевий вітер дме різноспрямовано й регулярно (у середині дня повного штилю немає практично ніколи).

Дослідники погоджуються, що для підвищення ймовірності успіху місії БПЛА, траєкторія польоту повинна бути ретельно розрахована з урахуванням методів оптимізації при існуючих обмеженнях. Незважаючи на те, що алгоритми на основі графів, такі як діаграма Вороного, search A*, D* lite та інші класичні методи, такі як швидке дослідження випадкових дерев (RRT), штучні потенційні поля (APF) та ймовірнісні дорожні карти (PRM), зазвичай використовуються для розрахунку траєкторії БПЛА, вони вимагають створення карт вартості складних полів і, зазвичай, їх недоліком є збіжність до локальних оптимальних рішень [10, 11].

Останніми роками метаевристичні алгоритми, які є розгалуженням методів штучного інтелекту, почали використовуватися як планувальники маршруту груп або окремих БПЛА через їх переваги щодо простоти реалізації, обчислювальної складності та конфігурованих або настроюваних структур [12, 13, 14]. В той же час для звичайних БПЛА відсутні ефективні моделі врахування такого явища, як боковий вітер, що вимагає розроблення відповідної моделі.

Мета статті: розроблення моделі врахування бічного вітру при плануванні маршрутів польоту безпілотного літального апарату.

Виклад основного матеріалу

На підставі наявної вимірювальної інформації проводиться непряме оцінювання координат БПЛА з використанням алгоритмів оптимальної фільтрації на основі фільтра Калмана (ФК) [15, 16].

Алгоритм реалізації фільтра Калмана дозволяє в реальному часі побудувати оптимальну оцінку стану системи, ґрунтуючись на вимірах, які містять похибки; при цьому вектор вимірювань розглядається як багатовимірний вихідний сигнал системи, обтяженого шумом, а вектор стану – невідомий багатовимірний сигнал, що підлягає визначенню. Умовою оптимальності побудованої оцінки стану є мінімум середньої квадратичної помилки.

Проведемо оцінювання вектора стану безпілотного літального апарату. Побудова ідентифікаторів об'єкта управління з використанням оптимального

фільтра Калмана (ОФК) вимагає виконання таких умов:

1) вектор стану $x(t)$ повинен задовольняти векторному диференціальному рівнянню:

$$\frac{dx}{dt} = F(t) \cdot x(t) + H(t) \cdot \xi(t), \quad (1)$$

де $x(t)$ – вектор-функція, що містить компонент; $F(t)$ – квадратична матриця розміром $n \times n$, що залежить у загальному випадку від часу; $\xi(t)$ – вектор білих шумів, що складаються з l компонент; $H(t)$ – матриця розміром $n \times l$.

2) кореляційна матриця процесу $\xi(t)$ є такою:

$$Q(t, u) = Q(t) \cdot \delta(t - u), \quad (2)$$

де $Q(t)$ – квадратна матриця розміром $l \times l$.

3) сукупність процесів на m виходах фільтра утворює векторний спостережуваний процес:

$$y(t) = C(t) \cdot x(t) + n(t), \quad (3)$$

де $y(t)$ – вектор-функція, що складається з елементів; $C(t)$ – прямокутна матриця розміром $m \times n$; $n(t)$ – m –мірний вектор білих шумів (шумів вимірювання) з кореляційною матрицею:

$$R(t, u) = R(t) \cdot \delta(t - u), \quad (4)$$

де $R(t)$ – позитивно-визначена квадратична матриця розміром $m \times m$.

4) структура ідентифікатора описується векторним диференціальним рівнянням:

$$\frac{d\hat{x}}{dt} = F(t) \cdot \hat{x}(t)K(t, t) \times [y(t) - C \cdot \hat{x}(t)], \quad (5)$$

де $\hat{x}(t)$ – векторний процес на виході оптимального фільтра, який відтворює з деякою помилкою процес $x(t)$:

$$K(t, t) = P(t) - C^T(t) - R^{-1}(t), \quad (6)$$

$P(t)$ – матриця дисперсії помилок фільтрації, зміна якої описується таким рівнянням:

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dt} = & F(t) \cdot P(t) + P(t) \cdot F^T(t) - \\ & - P(t) \cdot C^T(t) \cdot R^{-1}(t) \cdot C(t) \cdot P(t) + \\ & + H(t) \cdot Q(t) \cdot H^T(t). \end{aligned} \quad (7)$$

Для запобігання старінню коефіцієнтів фільтра та покращення оцінки кута ковзання через деякий час після початку роботи фільтра було зупинене інтегрування коваріаційної матриці P , тобто коефіцієнти фільтра мають бути взяті як константи на деякий час, який залежить від типу БПЛА та сили бічного вітру. Час підбирається експериментальним шляхом і для БПЛА літакового типу складає близько 2 с. Запишемо диференціальні рівняння бічного руху БПЛА при дії бічного вітру.

$$\begin{cases} \dot{\beta} = \bar{Z}_\beta^\beta + \bar{Z}_\beta^{\omega_X} \omega_X + \bar{Z}_\beta^{\omega_Y} \omega_Y + \bar{Z}_\beta^\gamma, \\ \dot{\omega}_X = \bar{M}_X^\beta \beta + \bar{M}_X^{\omega_X} \omega_X + \bar{M}_X^{\omega_Y} \omega_Y + \bar{M}_X^{\delta_E} \delta_E, \\ \dot{\omega}_Y = \bar{M}_Y^\beta \beta + \bar{M}_Y^{\omega_X} \omega_X + \bar{M}_Y^{\omega_Y} \omega_Y + \bar{M}_Y^{\delta_H} \delta_H, \\ \dot{\gamma} = \omega_X, \\ \dot{\psi} = \hat{\omega}_Y, \\ \dot{\phi} = \bar{Z}_\beta^\psi \beta + \bar{Z}_{\omega_X}^\psi \omega_X^{\omega_X}, \end{cases} \quad (8)$$

де β – кут ковзання БпЛА; ω_x – кутова швидкість обертання БпЛА навколо осі ОХ; ω_y – кутова швидкість обертання БпЛА навколо осі ОУ; γ – кут крену БпЛА; ψ – кут курсу БпЛА; ϕ – кут шляху БпЛА; δ_E – кут відхилення елеронів; δ_H – кут відхилення рулів напрямку; $\bar{Z}^\beta, \bar{Z}^{\omega_x}, \bar{Z}^{\omega_y}, \bar{Z}^\gamma, \bar{M}_x^\beta, \bar{M}_x^{\omega_x}, \bar{M}_x^{\omega_y}, \bar{M}_x^{\delta_E}, \bar{M}_y^\beta, \bar{M}_y^{\omega_x}, \bar{M}_y^{\omega_y}, \bar{M}_y^{\delta_H}$ – коефіцієнти математичної моделі (ММ) бічного руху БпЛА.

Запишемо систему рівнянь (8) у вигляді:

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad (9)$$

де

$$x = \begin{pmatrix} \beta \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \gamma \\ \psi \\ \phi \end{pmatrix}, \quad (10)$$

$$A = \begin{pmatrix} \bar{Z}^\beta & \bar{Z}^{\omega_x} & \bar{Z}^{\omega_y} & \bar{Z}^\gamma & 0 & 0 \\ \bar{M}_x^\beta & \bar{M}_x^{\omega_x} & \bar{M}_x^{\omega_y} & 0 & 0 & 0 \\ \bar{M}_y^\beta & \bar{M}_y^{\omega_x} & \bar{M}_y^{\omega_y} & \bar{M}_y^{\delta_H} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Z}^\psi & \bar{Z}^{\omega_x} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$\hat{\beta} = \bar{Z}^\beta \hat{\beta} + \bar{Z}^{\omega_x} \hat{\omega}_x + \bar{Z}^{\omega_y} \hat{\omega}_y + \bar{Z}^\gamma \hat{\gamma} + K_{\omega_x}^\beta (Z_{\omega_x} - \hat{\omega}_x) + K_{\omega_y}^\beta (Z_{\omega_y} - \hat{\omega}_y) + K_\gamma^\beta (Z_\gamma - \hat{\gamma}) + K_\psi^\beta (Z_\psi - \hat{\psi}),$$

$$\hat{\omega}_x = \bar{M}_x^\beta \hat{\beta} + \bar{M}_x^{\omega_x} \hat{\omega}_x + \bar{M}_x^{\omega_y} \hat{\omega}_y + K_{\omega_x}^{\omega_x} (Z_{\omega_x} - \hat{\omega}_x) + K_{\omega_y}^{\omega_x} (Z_{\omega_y} - \hat{\omega}_y) + K_\gamma^{\omega_x} (Z_\gamma - \hat{\gamma}) + K_\psi^{\omega_x} (Z_\psi - \hat{\psi}) + \bar{M}_x^{\delta_E} \delta_E,$$

$$\hat{\omega}_y = \bar{M}_y^\beta \hat{\beta} + \bar{M}_y^{\omega_x} \hat{\omega}_x + \bar{M}_y^{\omega_y} \hat{\omega}_y + K_{\omega_x}^{\omega_y} (Z_{\omega_x} - \hat{\omega}_x) + K_{\omega_y}^{\omega_y} (Z_{\omega_y} - \hat{\omega}_y) + K_\gamma^{\omega_y} (Z_\gamma - \hat{\gamma}) + K_\psi^{\omega_y} (Z_\psi - \hat{\psi}) + \bar{M}_y^{\delta_H} \delta_H, \quad (12)$$

$$\hat{\gamma} = \hat{\omega}_x + K_{\omega_x}^\gamma (Z_{\omega_x} - \hat{\omega}_x) + K_{\omega_y}^\gamma (Z_{\omega_y} - \hat{\omega}_y) + K_\gamma^\psi (Z_\gamma - \hat{\gamma}) + K_\psi^\gamma (Z_\psi - \hat{\psi}),$$

$$\hat{\psi} = \hat{\omega}_y + K_{\omega_x}^\psi (Z_{\omega_x} - \hat{\omega}_x) + K_{\omega_y}^\psi (Z_{\omega_y} - \hat{\omega}_y) + K_\gamma^\psi (Z_\gamma - \hat{\gamma}) + K_\psi^\psi (Z_\psi - \hat{\psi}),$$

$$\hat{\phi} = \bar{Z}^\psi \hat{\beta} + \bar{Z}^{\omega_x} \hat{\omega}_x + \bar{Z}^\psi \gamma + K_{\omega_x}^\psi (Z_{\omega_x} - \hat{\omega}_x) + K_{\omega_y}^\psi (Z_{\omega_y} - \hat{\omega}_y) + K_\gamma^\psi (Z_\gamma - \hat{\gamma}) + K_\psi^\psi (Z_\psi - \hat{\psi}).$$

де Z_{ω_x} – виміряна кутова швидкість обертання БпЛА навколо осі ОХ; Z_{ω_y} – виміряна кутова швидкість обертання БпЛА навколо осі ОУ; Z_γ – виміряний кут крену БпЛА; Z_ψ – виміряний кут курсу БпЛА; Z_ϕ – виміряний шляховий кут БпЛА; $\hat{\beta}, \hat{\omega}_x, \hat{\omega}_y, \hat{\gamma}, \hat{\psi}, \hat{\phi}$ – оцінки відповідних параметрів; $\bar{Z}^\beta, \bar{Z}^{\omega_x}, \bar{Z}^{\omega_y}, \bar{Z}^\gamma, \bar{M}_x^\beta, \bar{M}_x^{\omega_x}, \bar{M}_x^{\omega_y}, \bar{M}_x^{\delta_E}, \bar{M}_y^\beta, \bar{M}_y^{\omega_x}, \bar{M}_y^{\omega_y}, \bar{M}_y^{\delta_H}$ – коефіцієнти математичної моделі руху БпЛА.

Варто звернути увагу на те, що сам кут вітрового зносу обчислюється алгебраїчно, виходячи з формули:

$$\hat{\beta}_W = \phi - \psi + \hat{\beta}. \quad (13)$$

Моделювання системи управління та ідентифікатора проводилося у середовищі імітаційного моделювання Simulink.

Вітер моделювався у вигляді поривів, тобто зміна кута вітрового зносу була стрибком або дуже “крутою” лінійною залежністю.

$$u = \begin{pmatrix} \delta_H \\ \delta_E \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \bar{M}_x^{\delta_E} \\ \bar{M}_y^{\delta_H} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (11)$$

На рис. 1 наведено перелік вхідних та вихідних координат ідентифікатора, побудованого на базі оптимального ФК.

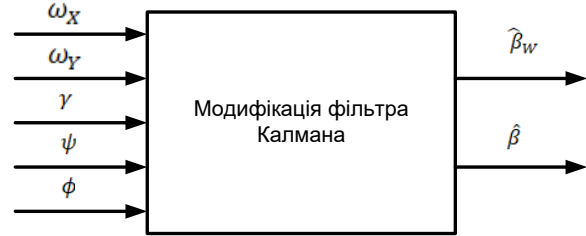


Рис. 1. Ідентифікатор кута ковзання та кута вітрового зносу: γ, ψ – кути крену та курсовертикалі; ω_x, ω_y – кутові швидкості навколо пов'язаних осей з датчиків кутових швидкостей; ϕ – кут шляху; $\hat{\beta}$ – оцінка кута ковзання; $\hat{\beta}_W$ – оцінка кута вітрового зносу

Наведемо рівняння ідентифікатора зі сталими коефіцієнтами для поздовжнього каналу:

Задані такими значеннями похибками датчиків та середньоквадратичним значенням швидкості поривів вітру:

- похибка датчика кутових швидкостей при вимірі кутової швидкості крену $\sigma_{\omega_x} = 0,0029$ рад/с;
- похибка датчика кутових швидкостей при вимірі кутової швидкості ризику $\sigma_{\omega_y} = 0,0029$ рад/с;
- похибка курсовертикалі при вимірі кута крену $\sigma_\gamma = 0,0172$ рад;
- похибка курсовертикалі під час вимірювання кута курсу $\sigma_\psi = 0,05$ рад;
- похибка супутникової навігаційної системи під час вимірювання кута шляху $\sigma_\phi = 0,03$ рад;
- середньоквадратичне значення швидкості поривів вітру $\sigma_{\beta_W}^2 = 1(\text{м/хв})^2$.

Тоді матриці шумів вимірювання (R) та вітрового збурення (Q) набудуть вигляду:

$$(Q) = \sigma_{\beta_W}^2,$$

$$R = \begin{pmatrix} \sigma_{\omega_x}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\omega_y}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\omega_z}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{\psi}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{\dot{\psi}}^2 \end{pmatrix}.$$

Початкова коваріаційна матриця була обрана експериментальним шляхом:

$$P_0 = \begin{pmatrix} 0.02 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.05 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.05 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.02 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.02 \end{pmatrix}.$$

Матриця спостереження БЛА:

$$H = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Матриці F та B аналогічні матрицям з математичної моделі об'єкта.

Перевіримо спостереження представленої системи. Розрахуємо ранг матриці спостереження за формулою:

$$\text{rank}(Z) = \text{rank}(H^T, A^T, H^T, \dots, (A^{n-1})^T H^T), \quad (14)$$

де Z – матриця спостереження, A – матриця системи, H – матриця спостережень, n – розмірність системи.

В результаті обчислення було отримано, що $\text{rank}(Z) = 6$, тобто дорівнює порядку системи, отже згідно з критерієм спостереження, система є спостережуваною.

Для перевірки роботи фільтра було проведено експеримент, у якому на БЛА із встановленою нею системою управління курсом впливав вітер. Результати експерименту наведено на рис. 2 та 3.

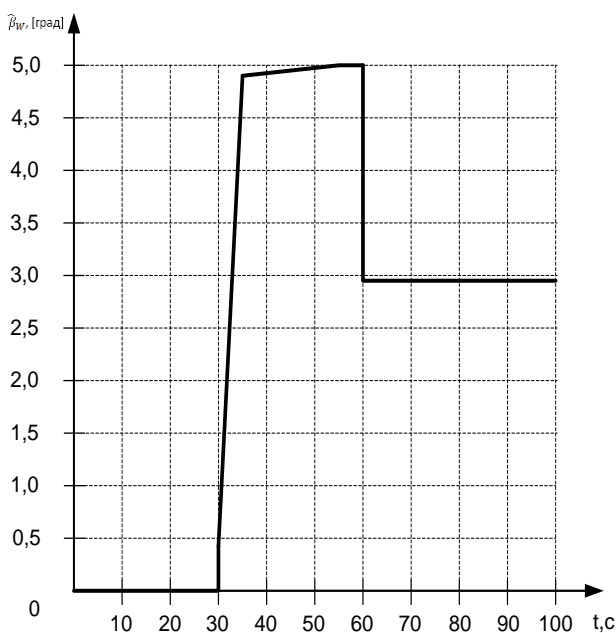


Рис. 2. Зміна кута вітрового зносу БЛА

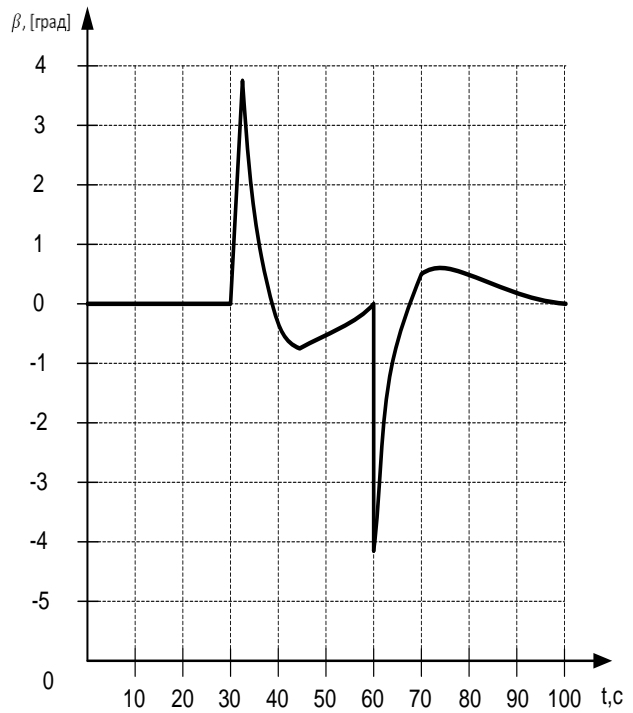


Рис. 3. Кут ковзання БЛА та його оцінка

Як видно з результатів експерименту, значення кута ковзання було оцінено з незначною малою похибкою, а час оцінки не перевищував однієї секунди.

Результати оцінки кута вітрового зносу за аналогічних вітрових впливів наведено на рис. 4.

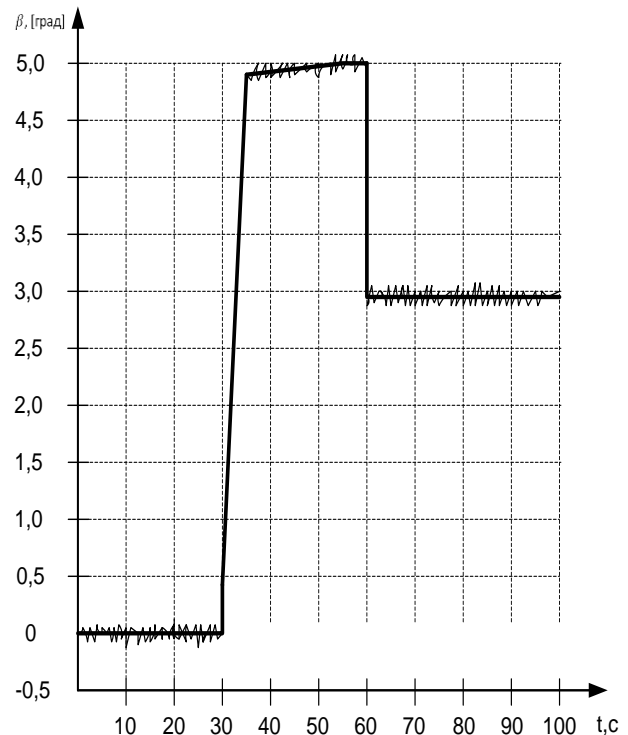


Рис. 4. Результати експерименту з ідеальною математичною моделлю БЛА (реальні значення кута вітрового зносу та його оцінка)

Висновки

Як видно з наведених графіків, даний метод досить точно оцінює кут вітрового зносу навіть при відхиленні параметрів математичної моделі й може бути застосований при компенсації впливу бокового вітру на безпілотного літального апарату.

Таким чином, замість нестационарного оптимального ФК отримано стаціонарний ідентифікатор, що може ефективно оцінювати бічний вітер та зменшувати ступінь завантаження бортового обчислювального пристрою в процесі виконання маневрів при моніторингу елементів критичної інфраструктури.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Закон України “Про внесення змін до деяких законів України щодо повноважень уповноваженого органу у сфері захисту критичної інфраструктури України” 18 жовтня 2022 року № 2684-IX. Режим доступу <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2684-20#Text>
2. Шмигаль Д.В. За час повномасштабної війни уражено понад 400 об'єктів критичної інфраструктури у сфері електро- і теплопостачання. Електронний ресурс. Режим доступу <https://interfax.com.ua/news/general/871517.html>
3. Bae, K.-Y., Kim, Y.-D., & Han, J.-H. (2015). Finding a risk-constrained shortest path for an unmanned combat vehicle. *Computers & Industrial Engineering*, 80, 245–253. doi:10.1016/j.cie.2014.12.016
4. Shreyamsh Kamate, Nuri Yilmazer. Application of Object Detection and Tracking Techniques for Unmanned Aerial Vehicles. *Procedia Computer Science*. 2015. № 61. P. 436–441. doi.org/10.1016/j.procs.2015.09.183
5. Kharchenko, V., Sachenko, A., Kochan, V., Fesenko, H. (2016), “Reliability and Survivability Models of Integrated Drone-Based Systems for Post Emergency Monitoring of NPPs”, *Proceeding of The International Conference on Information and Digital Technologies 2016, IDT 2016, July 5–7, 2016, Rzeszow, Poland*, pp. 127–132 (IEEE Catalog Number CFP16CDT-USB). doi: 10.1109/DT.2016.7557161
6. Математичні методи дослідження операцій. Лінійне програмування. Частина 1: навч. пос. / А. А. Яровий, Л. М. Ваховська, Л. В. Крилик. – Вінниця : ВНТУ, 2020. – 86 с. Електронний ресурс. Режим доступу <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/30859>
7. *Current Trends in Communication and Information Technologies*. Mykhailo Pchenko, Petro Vorobiyenko, Iryna Strelkovska. IPF 2020, volume 212, Number of Pages XIX, 438. Режим доступу <https://doi.org/10.1007/978-3-030-76343-5>
8. Глотов В. М., Фис М. М. Застосування БПЛА у військовій справі та аерозніманні. Львів. Львівська політехніка, 2022, 196 с. SBN: 978-966-941-700-8.
9. Ait Saadi, A.; Soukane, A.; Meraihi, Y.; Benmessaoud Gabis, A.; Mirjalili, S.; Ramdane-Cherif, A. UAV path planning using optimization approaches: A survey. *Arch. Comput. Methods Eng.* 2022, 29, 4233–4284. . Електронний ресурс. Режим доступу <https://doi.org/10.1007/s11831-022-09742-7>
10. Bal, M. An overview of path planning technologies for unmanned aerial vehicles. *Therm. Sci.* 2022, 26, 2865–2876. . Електронний ресурс. Режим доступу <https://doi.org/10.2298/TSCI2204865B>
11. Wu, Y. A survey on population-based meta-heuristic algorithms for motion planning of aircraft. *Swarm Evol. Comput.* 2021, 62, 100844. . Електронний ресурс. Режим доступу <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2021.100844>
12. Majeed, A.; Hwang, S.O. A multi-objective coverage path planning algorithm for UAVs to cover spatially distributed regions in urban environments. *Aerospace* 2021, 8, 343. . Електронний ресурс. Режим доступу <https://doi.org/10.3390/aerospace8110343>
13. Saeed, R.A.; Omri, M.; Abdel-Khalek, S.; Ali, E.S.; Alotaibi, M.F. Optimal path planning for drones based on swarm intelligence algorithm. *Neural Comput. Appl.* 2022, 34, 10133–10155. Електронний ресурс. Режим доступу <https://doi.org/10.1007/s00521-022-06998-9>
14. Moriya, N. (2011). *Primer to Kalman Filtering: A Physicist Perspective*. New York: Nova Science Publishers, Inc ISBN 978-1-61668-311-5. Електронний ресурс. Режим доступу <https://www.scribd.com/document/660055294/Kalman-filter>
15. Ситник О. О. Аналіз алгоритмів оптимальної фільтрації за показниками точності при скалярних вимірюваннях / Раєвський М. В., Кисельова Г. О. // Відбір і обробка інформації. – Київ : Наукова думка, 2011. – Вип. 34 (110). – ISSN 0474-8662

Received (Надійшла) 29.11.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 31.01.2024

The model of crosswind accounting for flight route planning of unmanned aerial vehicle

Ruslan Kulish

Abstract. In the article, the model of crosswind accounting for flight route planning of unmanned aerial vehicle (UAV) has been developed, which is based on the construction of the optimal Kalman filter. This model is based on modern methods of the flight path optimizing of an unmanned aerial vehicle (UAV), taking into account the existing limitations. The model allows adjusting the waypoints of UAVs, performing monitoring tasks of critical infrastructure elements, which reduces the flight route of UAVs while performing monitoring tasks with taking into account adverse flight conditions and it reduces the loading degree of the UAVs onboard computing device.

Keywords: unmanned aerial vehicle, routing, monitoring of critical infrastructure objects, route planning.