

## АДАПТИВНА ТРАЄКТОРНА ФІЛЬТРАЦІЯ МАЛОРОЗМІРНОГО БПЛА ПРИ КОМПЛЕКСНОМУ ВИКОРИСТАННІ ДАНИХ РЛС І ВІДЕОКАМЕРИ

**Соколов К.А., Жук С.Я.**

*Радіотехнічний факультет КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна*

*E-mail: k.sokolov@kpi.ua, s.zhuk@kpi.ua*

### SMALL-SIZED UAVS ADAPTIVE TRAJECTORY FILTERING WITH COMPLEXING USE OF RADAR AND VIDEO CAMERA DATA

The article considers the problem statement and synthesis of the adaptive trajectory filtering algorithm for small-sized UAVs with the integrated use of radar and video camera data, and analyzes its performance measures

На сьогодні важливе значення має задача виявлення і супроводження малорозмірних безпілотних літальних апаратів (МБПЛА) [1]. Широкого використання для її вирішення знайшли РЛС і відеокамери, які часто застосовуються сумісно. Сучасні МБПЛА, відносяться до інтенсивно маневруючих об'єктів, які спроможні рухатись із значними перевантаженнями. Тому актуальною задачею є розробка адаптивних алгоритмів траєкторних фільтрації МБПЛА за даними РЛС і відеокамери.

Рух МБПЛА з різними видами маневру в прямокутній системі координат описується математичною моделлю у вигляді стохастичної динамічної системи з випадковою структурою в дискретному часі [2]:

$$\mathbf{u}(k) = \mathbf{B}_j \mathbf{u}(k-1) + \mathbf{C}_j \mathbf{w}(k), \quad j = \overline{1, M}, \quad (1)$$

де  $\mathbf{u}(k)$  - вектор стану, що включає параметри руху МБПЛА по осях прямокутної місцевої СК;  $\mathbf{w}(k)$  - некорельована послідовність гаусівських векторів  $\mathbf{M}[\mathbf{w}(k)] = 0$ ,  $\mathbf{M}[\mathbf{w}(k)\mathbf{w}^T(k)] = \mathbf{I}$ ;  $\mathbf{F}_j$ ,  $\mathbf{C}_j$  - відомі матриці.

Для керування зміною структури моделі (1), використовується ланцюг Маркова  $a_j(k)$ ,  $j = \overline{1, M}$  з відомими ймовірнісними характеристиками.

Враховуючи обмеження щодо обсягу матеріалу, розглянуто випадок одночасного отримання даних від РЛС і відеокамери. В якості РЛС використано FMCW-радар, який вимірює дальність  $r^{\text{РЛС}}(k)$ , радіальну швидкість  $\dot{r}^{\text{РЛС}}(k)$ , азимут  $\beta^{\text{РЛС}}(k)$ , кут місця  $\varepsilon^{\text{РЛС}}(k)$  МБПЛА в сферичній СК, пов'язаній з місцем розташування РЛС. Відеокамера вимірює азимут  $\beta^{\text{В}}(k)$ , кут місця  $\varepsilon^{\text{В}}(k)$  МБПЛА в сферичній СК, пов'язаній з її місцем розташування. Шляхом лінеаризації нелінійних рівнянь вимірювання параметрів руху МБПЛА в сферичних СК отримати лінійні рівняння вимірювання координат БПЛА в єдиній прямокутній СК

Розширений процес  $(\mathbf{u}(k), a_j(k))$  належить до класу змішаних

марківських процесів у дискретному часі. Використовуючи метод синтезу оптимальних і квазіоптимальних алгоритмів оцінювання змішаних марківських процесів в дискретному часі [2], розроблено алгоритм адаптивної траєкторної фільтрації МБПЛА при комплексному використанні даних РЛС і відеокамери. Особливість синтезованого алгоритму полягає у нерозривній зв'язаності рівнянь фільтрації та екстраполяції дискретного  $a_j(k)$  та неперервного  $\mathbf{u}(k)$  компонентів між собою. При цьому апостеріорна щільність ймовірності  $W(\mathbf{u}(k))$  неперервного компоненту при переході на наступний крок фільтрації апроксимується сумою  $M$  гаусівських щільностей ймовірності. Адаптивний фільтр містить  $M$  каналів і відноситься до класу пристроїв зі зворотними зв'язками між каналами. При отриманні даних лише від РЛС, розроблений алгоритм співпадає з наведеним в [3].

Аналіз точносних характеристик синтезованого алгоритму оцінювання параметрів руху МБПЛА з розпізнаванням різних видів руху виконано за допомогою статистичного моделювання на ЕОМ. Модель руху МБПЛА описується стохастичною динамічною системою з випадковою структурою (1), яка враховує три основних види руху  $M=3$ : зависання  $j=1$ , майже рівномірний рух  $j=2$ , рух з маневром  $j=3$ . Вектор стану має наступний вигляд (2)

$$\mathbf{u}^T(k) = (x(k), \dot{x}(k), \ddot{x}(k), y(k), \dot{y}(k), \ddot{y}(k), z(k), \dot{z}(k), \ddot{z}(k)) \quad (2)$$

Темп формування траєкторії БПЛА  $T = 1$  секунда. Для наочності аналізу ефективності роботи алгоритму тестова траєкторія була розбита на інтервали, на яких моделювався відповідний тип руху:  $1 \leq k \leq 9 - j=2$ ,  $10 \leq k \leq 15 - j=3$ ,  $16 \leq k \leq 20 - j=2$ ,  $21 \leq k \leq 25 -$  скидання швидкості  $j=3$ ,  $26 \leq k \leq 33 - j=1$ ,  $34 \leq k \leq 39 - j=3$ ,  $40 \leq k \leq 50 - j=2$ . При описі адаптивного алгоритму оцінювання СКВ шумів збудження для різних типів руху МБПЛА встановлено:  $a_1 = 1$  м/с;  $a_2 = 1$  м/с<sup>2</sup>;  $a_3 = 7$  м/с<sup>3</sup>. РЛС і відеокамера розташовані сумісно в центрі прямокутної СК. Помилки вимірювання координат РЛС встановлено  $\sigma_\beta^{\text{РЛС}} = 0.1$  град.,  $\sigma_\varepsilon^{\text{РЛС}} = 0,1$  град.,  $\sigma_r^{\text{РЛС}} = 20$  м,  $\sigma_{\dot{r}}^{\text{РЛС}} = 10$  м/с, а помилки вимірювання відеокамери  $\sigma_\beta^{\text{В}} = 0.1$  град.,  $\sigma_\varepsilon^{\text{В}} = 0,1$  град. Кількість реалізацій метода Монте-Карло дорівнює 100.

На рис. 1 показані математичні очікування  $\hat{m}_x, \hat{m}_y, \hat{m}_z$  (точкові криві) і  $\hat{\sigma}_x, \hat{\sigma}_y, \hat{\sigma}_z$  (штрихові криві) помилок оцінки координат МБПЛА, які визначені шляхом статистичного моделювання, та СКВ помилок оцінки  $\sqrt{\hat{R}_x}, \sqrt{\hat{R}_y}, \sqrt{\hat{R}_z}$  (суцільні криві) положення об'єкту, які отримані з відповідних кореляційних матриць похибок оцінки за даними РЛС. На рис. 2 показані аналогічні залежності, отримані при комплексній обробці даних РЛС і відеокамери.

На рис. 3 показані ймовірностей розпізнавання  $p_{m1}$  (точкова крива) зависання,  $p_{m2}$  (штрихова крива) рівномірного руху,  $p_{m3}$  (суцільна крива) маневру МБПЛА адаптивним алгоритмом за даними РЛС, а на рис. 3 – РЛС і

відеокамери.

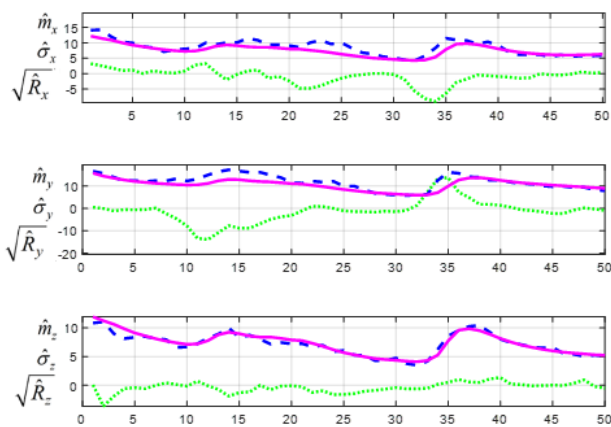


Рис. 1. Помилки оцінки координат X, Y, Z за даними РЛС

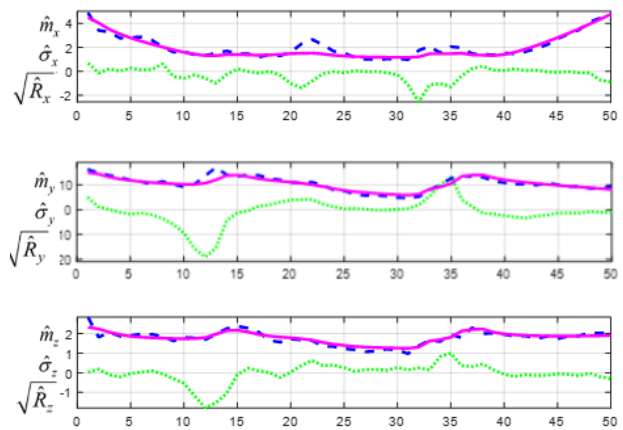


Рис. 2. Помилки оцінки координат X, Y, Z за даними РЛС і відеокамери

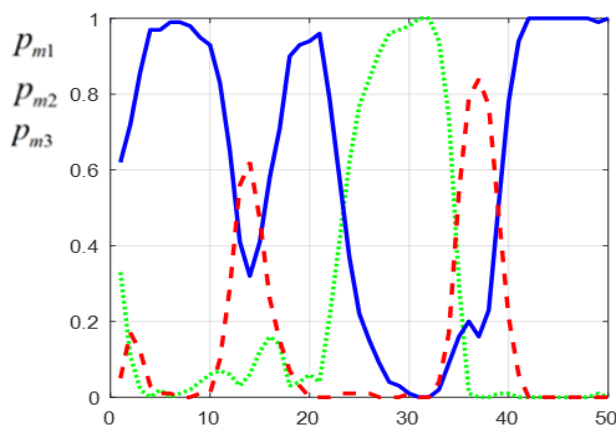


Рис. 3. Ймовірності розпізнавання видів руху МБПЛА за даними РЛС

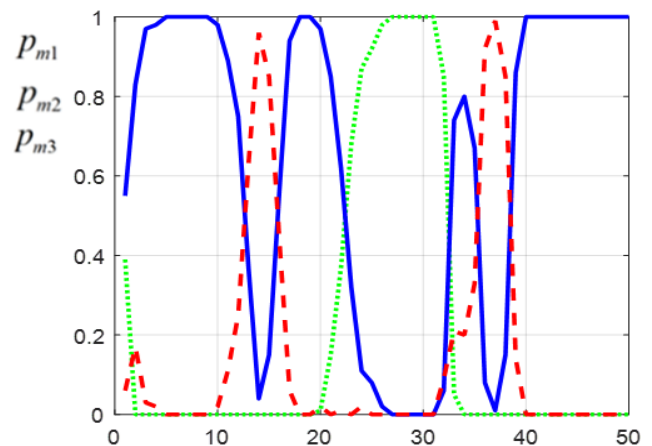


Рис. 4. Ймовірності розпізнавання видів руху МБПЛА за даними РЛС і відеокамери.

Комплексне використання даних від РЛС і відеокамери дозволило зменшити СКВ помилок визначення місцеположення МБПЛА за осями X і Zв 2-4 раз, а також підвищити ймовірність розпізнавання маневру на 18%–35%.

### Література

1. Сучасний стан та проблеми протидії маловисотним, низькошвидкісним та малорозмірним БПЛА / А.С. Дудуш, В.О. Тютюнник, О.А. Резніченко, С.Ю. Гогонянц // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони № 1(31)/2018.
2. Жук С.Я., Товкач І.О. Методи адаптивного оцінювання параметрів руху безпілотного літального апарату на основі вимірювань сенсорної мережі. -К.: «Політехніка», КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019, 172 с.
3. S. Y. Zhuk, O. S. Neuimin, I. O. Tovkach and V. O. Chmelov, "Adaptive algorithm for tracking maneuvering targets in a complex jamming environment for a radar with range rate measurement," 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv-Slavske, Ukraine, 2020, pp. 249-254, doi: 10.1109/TCSET49122.2020.235433.