

## ОЦІНКА ПАРАМЕТРІВ РУХУ ГРУПИ ПОСТІЙНО МАНЕВРУЮЧИХ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Цуканов О.Ф., Якорнов Є.А.

*Навчально-науковий Інститут телекомунікаційних  
систем КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна  
E-mail: cukanov-o@ukr.net*

### ESTIMATION OF MOTION PARAMETERS OF A GROUP OF CONSTANTLY MANEUVERING UNMANNED AERIAL VEHICLES

A model for estimating movement parameters for maneuvering unmanned aerial vehicles based on a Kalman filter with limited memory is presented. The stability of operation is ensured by the correct selection of only one parameter, the value of which is determined by the results of simulation. Such a model can be easily adapted for any unmanned aircraft both for the task of estimating movement parameters and for solving escort tasks.

Інтенсивне використання на полі бою групи безпілотних літальних апаратів (БПЛА), наприклад, на базі квадрокоптерів передбачає, що кожен апарат функціонує в режимах постійного маневру. Тому одним із завдань, яке необхідно вирішувати на наземному пункті управління, - визначення параметрів руху (ПД) таких БПЛА з високою точністю.

Відомо [1] рішення для рівномірного руху БПЛА на основі опису ПД системою диференціальних рівнянь. Розглянемо застосовність даної методології з метою оцінки ПД апаратів із постійним маневром.

Сформулюємо завдання оцінки ПД маневрують БПЛА при їхньому квазіоднорідному розподілі в просторі наступним чином.

На підставі наявної інформації про координати  $\tilde{x}_i$ ,  $\tilde{y}_i$ ,  $\tilde{z}_i$  та їх середньоквадратичні помилки  $\overline{\sigma x_i}$ ,  $\overline{\sigma y_i}$ ,  $\overline{\sigma z_i}$  необхідно визначити ПД: оцінку вектора стану (ВС)  $\overline{X}_n$ , координати  $\hat{x}_i$ ,  $\hat{y}_i$ ,  $\hat{z}_i$ , похідні (швидкості)  $\hat{\dot{x}}_i$ ,  $\hat{\dot{y}}_i$ ,  $\hat{\dot{z}}_i$  і кореляційні матриці помилок (КМО)  $K_n$ , і надалі після чергового етапу вимірювань відстаней між сусідніми БПЛА проводити їх уточнення.

Для отримання високоточних оцінок ПД у разі маневру БПЛА при багаторазових вимірах скористаємося моделлю оцінювання з урахуванням фільтра Калмана [2]. При цьому припускаємо, що помилки визначення координат які, у свою чергу, є входною інформацією для уточнення розташування елементів групи мають закон розподілу помилок, який у загальному випадку відрізняється від нормального.

Початковими умовами моделі оцінювання є ВС  $X_{n-1}$  та апріорна КМО

$K_{n-1}$  на  $n-1$  кроці вимірювань.

ВС можна записати у вигляді:

$$\begin{aligned} X_{in}^T &= |x_{in}, \dot{x}_{in}, y_{in}, \dot{y}_{in}, z_{in}, \dot{z}_{in}|, \\ Y_{in}^T &= |\widetilde{x}_{in}, \widetilde{y}_{in}, \widetilde{z}_{in}|. \end{aligned} \quad (1)$$

Тоді екстрапольоване значення ВС у загальному вигляді можна записати

$$X_{in}^e = F_{in,n-1} X_{in-1} + G_{n-1} U_{n-1}, \quad (2)$$

де  $F_{in,n-1}$  - матриця екстраполяції,  $G_{n-1}$  - матриця управління,

$U_{n-1}^T = |0 \ 0 \ 0 \ a_{x,n-1} \ a_{y,n-1} \ a_{z,n-1}|$  - вектор управління, в якому  $a_{x,n-1} \ a_{y,n-1} \ a_{z,n-1}$  - прискорення БПЛА за координатами.

За аналогією з (2) екстрапольовану апріорну оцінку КМО можна також подати наступним чином

$$K_{in}^e = F_{in,n-1} K_{in-1} F_{in,n-1}^T + \gamma G_{n-1} S_{n-1} G_{n-1}^T, \quad (3)$$

де  $K_{in-1}$  - екстрапольована апріорна КМО,  $\gamma$  - параметр стійкості.

де  $K_{in-1}$  - екстрапольована апріорна КМО,  $\gamma$  - параметр стійкості.

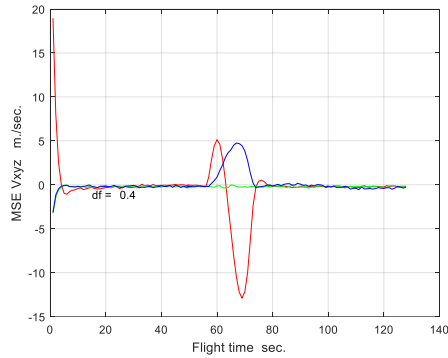
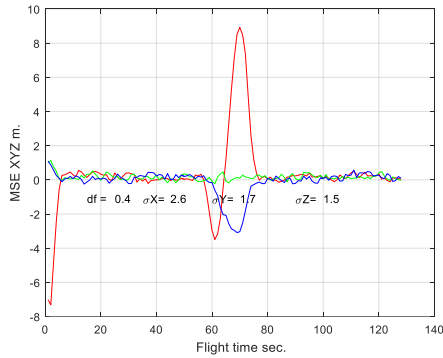
Оцінка ВС стану та КМО оцінювання показана в [3]. Співвідношення (2)-(3) дозволяють забезпечити стійке оцінювання ВС при раптовій зміні траєкторії руху БПЛА. Оцінки ВС БПЛА включають координати  $|\widehat{x}_{in}, \widehat{y}_{in}, \widehat{z}_{in}|^T$ . При цьому помилки визначення координат  $\sigma x_i, \sigma y_i, \sigma z_i$  без урахування кореляційних моментів можуть бути графічно представлені у вигляді еліпсоїда, в центрі якого знаходиться БПЛА.

Аналогічно - за швидкісними складовими ВС  $|\widehat{\dot{x}}_{in}, \widehat{\dot{y}}_{in}, \widehat{\dot{z}}_{in}|$  помилки визначення швидкостей за координатами  $\sigma \dot{x}_i, \sigma \dot{y}_i, \sigma \dot{z}_i$  також можна подати у вигляді еліпсоїда, але з великими розмірами за абсолютними величинами.

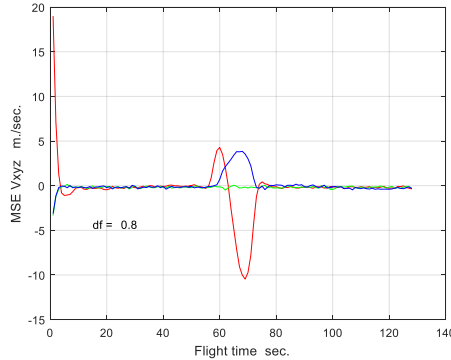
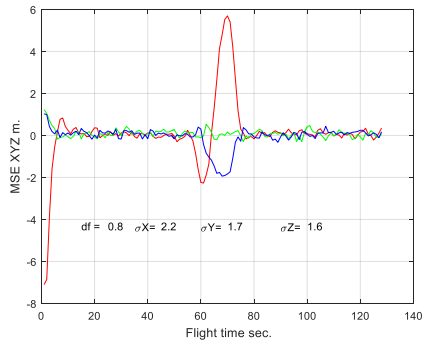
Якщо "обсяг" таких паралелепіпедів буде досить малим, можна говорити про стійкий автосупровід кожного БПЛА з високою точністю. Якщо такого високоточного автосупроводу не потрібно, оцінюються лише координати розташування.

Стійкість оцінювання ВС БПЛА забезпечується "примусовим збільшенням" значень діагональних елементів  $\sigma \dot{a}_x^2, \sigma \dot{a}_y^2, \sigma \dot{a}_z^2$  матриці  $G_{in,n-1}$  шляхом множення на параметр  $\gamma$ . Таким чином, константами в моделі (3) є параметр  $\gamma$  і величина  $\Delta t$  - час між вимірюваннями відстані між БПЛА. У зв'язку з цим, при моделюванні можна заздалегідь поставити елементи КМО вектору управління  $S_{n-1}$  (2) для забезпечення стійкості та необхідної точності оцінювання. Для перевірки запропонованої моделі оцінки ПД БПЛА, що постійно маневрує, використовувалася модель руху на основі реальних технічних характеристик апарату типу "Орлан".

Деякі результати моделювання траєкторій польоту БПЛА при його розвороті на  $90^\circ$  для різних значень параметра представлені на малюнку (при  $\gamma=0$ , має місце розбіжність процесу оцінювання, тобто, фільтр Калмана не стійкий).



$\gamma = 0.4$



$\gamma = 0.8$

Для значень  $0.4 \leq \gamma \leq 0.8$  запропонована модель забезпечує стійкість процесу оцінювання. Аналіз величини помилки оцінювання за координатами і швидкостями із усередненням по 100 реалізаціям показує, що у ділянці маневру максимальна помилка за координатами становить 18 м при  $\gamma=0.1$ , а мінімальна - 5 м. при  $\gamma=0.4$ .

Максимальна помилка за швидкостями становить 18 м/с. при  $\gamma=0.1$ , а мінімальна - 10 м/с. при  $\gamma=0.4$ . Оптимальне значення з допомогою якого отримані такі помилки оцінювання дорівнює 0.8.

При цьому значення забезпечується стійке оцінювання ПД БПЛА при досягненні мінімального значення помилки визначення ВС в середньому за 8 кроків оцінювання.

### Література

1. Товкач И. О., Жук С. Я. Адаптивная фильтрация параметров движения БПЛА по данным сенсорной сети на основе измерения мощности принимаемого сигнала. Вестник НТУУ «КПИ». Серия Радиотехника. Радиоаппаратостроение. 2017. № 69. с. 41-48.
2. Grewal M.S., Andrews A.P., «Kalman Filtering — Theory and Practice Using MATLAB», Wiley, 2001.
3. Y. Yakornov, O. Tsukanov Estimation of the Motion Parameters of Unmanned Aircraft of Wireless Sensor Networks Using Taylor Fractional Series. 2021 IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (IEEE UkrMiCo'2021), Kyiv, Ukraine, November 29 – December 3, 2021, pp. 212-215.