

## АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РУХУ КВАДРОКОПТЕРІВ У МЕРЕЖАХ FANET

Якорнов Є.А., Цуканов О.Ф.

*Інститут телекомунікаційних систем КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна*

*E-mail: cukanov-o@ukr.net*

### **An algorithm for determining quadcopter motion parameters in FANET networks**

A stable algorithm for estimating the motion parameters of maneuvering quadcopters as elements of the FANET wireless sensor network is proposed based on the Kalman filter and the least squares method.

В роботі [1] була розглянута задача оцінювання параметрів руху безпілотних летальних апаратів (БПЛА) як елементів літаючих сенсорних мереж FANET. Враховуючи те, що останнім часом БПЛА на базі квадрокоптерів (КК) знаходять все більш широке застосування виникає задача оцінки параметрів траєкторії їх руху в тому числі і для мереж FANET.

Відмінністю КК від звичайного БПЛА є в управлінні траєкторією руху. Як показано в [1] управління БПЛА здійснюється шляхом зміни вектору швидкості, кутів нахилу траєкторії, ристання та тангажу. Математична модель руху в задачі оцінювання надається у вигляді поліномі третього ступеня. Такий підхід не може бути застосований під час рішення задачі оцінювання параметрів руху КК, оскільки він має в своєму складі чотири гвинта [2] і управління рухом а саме: швидкістю, напрямом та висотою здійснюється шляхом зміни швидкості обертання кожного з гвинтів.

Тому математична модель руху КК набагато складніше ніж звичайного БПЛА, оскільки траєкторія його руху може змінюватись як завгодно, а рух може розглядатися як "політ з постійним маневром".

Використовуючи методологію роботи [1] створимо модель руху КК, в якій інформація про параметри руху складається також зі вектору стану (ВС) в даний момент часу, якої має вигляд  $X_{in}^T = [x_{in}, y_{in}, z_{in}, \dot{x}_{in}, \dot{y}_{in}, \dot{z}_{in}]$ , а про помилки - у вигляді кореляційної матриці помилок (КМП)  $\widehat{K}_{in}$ . Тоді задача оцінювання ВС (параметрів руху) КК на підставі вхідної інформації про координати вектору вимірювань та КМП, яка є діагональною з елементами  $\widehat{\sigma}_{x_i}$ ,  $\widehat{\sigma}_{y_i}$ ,  $\widehat{\sigma}_{z_i}$  зводиться до алгоритму, зображеному на рис.1.

Порівняємо даний алгоритм з наданим в [1], в якому для отримання високоточних оцінок параметрів руху БПЛА шляхом вимірювання координат пропонується використовувати як рекурентні методи на основі фільтру Калмана-Бьюсі, з більш простішою моделлю руху, так і оцінювання методом найменших квадратів (МНК) в "ковзному вікні" [3] складових швидкостей, а не прискорень для забезпечення стійкості.

Початковими умовами даного алгоритму оцінювання є також ВС параметрів руху  $X_{in-1}$  і КМП  $K_{in-1}$  на  $n-1$  кроці оцінювання, причому вектор вимірювань має вигляд  $Y_{in}^T = [\widetilde{x}_{in}, \widetilde{y}_{in}, \widetilde{z}_{in}]$ .

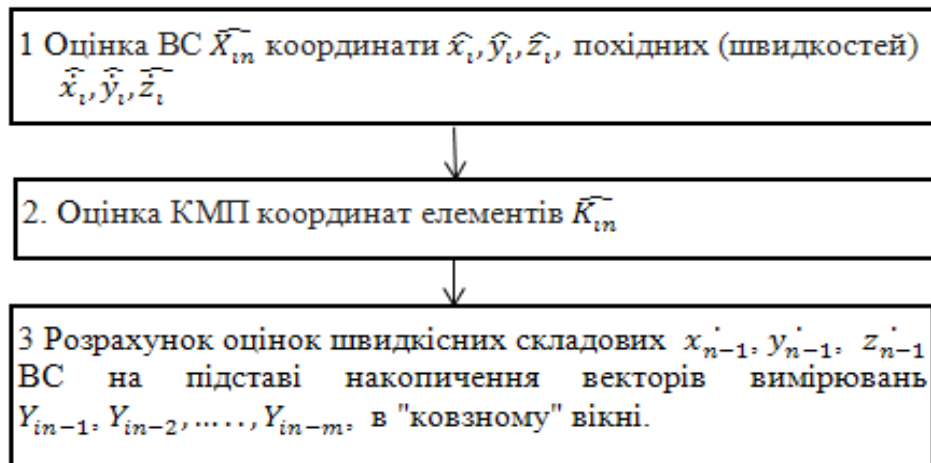


Рис. 1.

Екстрапольовані значення ВС  $X_{in}^e$  та КМП оцінки  $K_{in}^e$  можна представити у вигляді [4], на відмінно від [1], без урахування вектору управління

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

$$K_{in}^e = F_{in,n-1} K_{in-1} F_{in,n-1}^T + S_{in-1} \gamma, \quad (2)$$

де в (1) – (2)  $F_{in,n-1}$  - матриця екстраполяції,  $S_{in-1}$  - КМП шуму моделі руху, який представляє собою середньоквадратичне відхилення оцінок прискорень за координатами  $x, y, z$ ,  $\gamma$  – параметр стійкості (по результатам моделювання його оптимальне значення дорівнює 1.4).

Матричний коефіцієнт посилення [4] динамічного фільтра має вигляд

$$H_{in} = K_{in}^e (K_{in}^e + Q_{in})^{-1}. \quad (3)$$

де:  $Q_{in}$  - КМП вектору  $Y_{in}$ , на  $n$  - ому кроці вимірювань. Оцінки ВС  $\widehat{X}_{in}$  і КМП оцінювання  $\widehat{K}_{in}$  визначаються як

$$\widehat{X}_{in} = X_{in} + H_{in} (Y_{in} - C_n X_{in}^e), \quad (4)$$

$$\widehat{K}_{in} = K_{in}^e - K_{in}^e H_{in}, \quad (5)$$

Одночасно здійснюється оцінка значень вектору швидкості  $\dot{x}_{in-1}, \dot{y}_{in-1}, \dot{z}_{in-1}$ , за результатами апроксимації оцінювання координат в "ковзному вікні" шириною  $\Delta t = [t_{k-1}, t_{k-m}]$ . Модель руху маневрового БПЛА, описується алгебраїчним поліномом по кожній координаті ВС.

$$\tilde{X}_{n-1} = a_0 + a_1 t_{n-2} + a_2 t_{n-2}^2 \quad (6)$$

Далі за МНК визначається в "ковзному вікні" вектор коефіцієнтів по кожній з координат  $Y = Y_{in-1}, Y_{in-2}, \dots, Y_{in-m}$

$$A = (N^T N)^{-1} N^T Y, \quad (7)$$

Знаходимо першу похідну від (6) (на відмінно від [1] де знаходимо одразу другу похідну) та отримуємо поліном по кожній з координат у вигляді

$$\tilde{V}_{n-1} = a_1 + 2a_2 t_{n-2} \quad (8)$$

де  $\tilde{V}_{n-1} = |\widehat{x}_{l,n-1}, \widehat{y}_{l,n-1}, \widehat{z}_{l,n-1}|$ .

Вирази (1) - (8) являють собою запропонований стійкий алгоритм оцінювання. Завдання забезпечення стійкості алгоритму оцінювання параметрів руху КК, який постійно маневрує, вирішена шляхом обмеження знизу значень елементів матричного коефіцієнта посилення  $H_{in}$  за рахунок

роботи фільтра Калмана (1)-(5) та уточнення елементів швидкості ВС. Розглянутий алгоритм уточнення моделі руху дозволяє забезпечити стійке оцінювання без блоку виявлення маневру при раптовій зміні траєкторії руху КК. Якщо БПЛА не робить маневр тоді всі складові вектору управління  $\widehat{x}_{i,n-1}, \widehat{y}_{i,n-1}, \widehat{z}_{i,n-1}$  стануть постійними значеннями.

Результати імітаційного моделювання надані на рисунку 2, де показані залежності помилок по координатам та швидкостям під час зміни прискорення КК (середня помилка оцінки швидкості не перевищує 20 м/с).

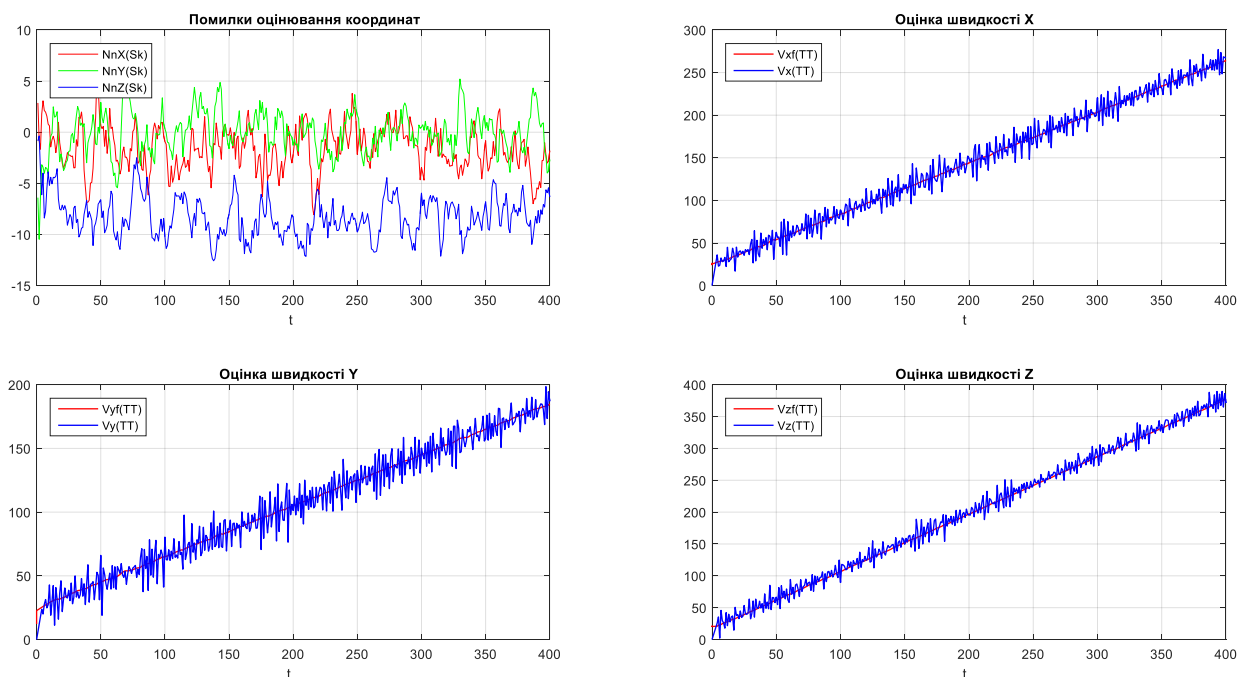


Рис. 2.

Таким чином, запропонований алгоритм дозволяє отримати стійкі оцінки параметрів руху КК із точністю близькою до оцінок звичайних БПЛА.

### Література

1. Визначення параметрів руху маневруючих безпілотних літальних апаратів у мережах FANET.// Якорнов Є.А., Цуканов О.Ф. Матеріали XIII-ої Міжнародної науково-технічної конференції «Перспективи телекомунікацій» (ПТ-19) К.: НТУУ «КПІ ім. І.Сікорського», 2019, с. 285 – 287.
2. Лысенко А. И. Математическая постановка задачи оптимизации движения группы квадрокоптеров / А. И. Лысенко, С. Н. Чумаченко, Е. Н. Тачинина // Техническая механика. - 2016. - № 1. - С. 74-83.
3. Жук С.Я, Адаптивная фильтрация параметров движения маневрирующего объекта в прямоугольной системе координат. / Жук С.Я., Кожешкурт В.И., Юзефович В.В. //Регистрація, зберігання і обробка даних, - 2009, Т. 11, № 2, С. 12-24.
4. Grewal M.S. «Kalman Filtering». / Grewal M.S., Andrews A.P. //Theory and Practice Using MATLAB- Wiley, 2001.