

## **АНАЛІЗ ТОЧНОСТИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОРЕЛЯЦІЙНО-ЕКСТРЕМАЛЬНОГО АЛГОРИТМУ СТЕЖЕННЯ ЗА МАЛОРОЗМІРНИМ БПЛА З ВИКОРИСТАННЯМ ФІЛЬТРУ КАЛМАНА**

**Жук С.Я., Герасименко А.О., Соколов К.А.**

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*

### **ANALYSIS OF THE ACCURACY CHARACTERISTICS OF THE CORRELATION-EXTREMAL ALGORITHM FOR TRACKING A SMALL-SIZED UAV USING THE KALMAN FILTER**

With the help of statistical modeling, the analysis of the accuracy characteristics of the correlation-extreme algorithm for tracking a small-sized UAV using the Kalman filter was carried out and it was shown that it provides sub-pixel accuracy of the UAV position estimate at the current frame.

Шляхом статистичного моделювання проведено аналіз точностних характеристик кореляційно-екстремального алгоритму стеження за малорозмірним БПЛА з використанням фільтру Калмана і показано, що він забезпечує субпіксельну точність оцінювання положення БПЛА на поточному кадрі

В даний час малорозмірні безпілотні літальні апарати (БПЛА) знаходять все більше застосування в багатьох галузях економіки, а також для задоволення потреб комерційних і приватних споживачів. З іншого боку, їх розвиток і поширення призвели до появи нових загроз: шпигунство, тероризм, транспортування заборонених вантажів тощо. Тому важливими завданнями є відстеження БПЛА і контроль за дозволеною для них діяльністю. Важливим класом систем, які використовуються для їх вирішення є системи відеоспостереження [1]. Для реалізації супроводу рухомих об'єктів на послідовності зображень застосовується кореляційно-екстремальний метод [2,3], який має високу ефективність в силу використання не тільки характеристик яскравості об'єктів, але й їх форми та положення.

БПЛА на зображенні представляє собою сукупність зв'язаних точок. Він розміщується в прямокутній області, яка є моделлю об'єкту спостереження, і представляє еталонне зображення. Для визначення зміщення зображення БПЛА на поточному кадрі відносно еталонного зображення використовується кореляційно-екстремальний алгоритм. Стеження за БПЛА на послідовності зображень виконується з використанням фільтру Калмана [4].

Аналіз кореляційно-екстремального алгоритму стеження за малорозмірним БПЛА з використанням фільтру Калмана виконано шляхом статистичного моделювання у середовищі Матлаб. Розмір кадру дорівнював

1080×1920 пікселів. Зображення БПЛА перетворено з формату RGB до монохромного. При цьому яскравість приведена до діапазону  $[0,1]$ . Моделювався рух цілі на основі поліноміальної моделі другого порядку по кожній осі в прямокутній системі координат із початковими становищем  $x_1=100$  пікс (пікселів),  $y_1=100$  пікс і швидкістю  $\dot{x}=10$  пікс/такт,  $\dot{y}=10$  пікс/такт. Інтенсивність маневру встановлено  $\sigma_a = 1$  пікс/такт<sup>2</sup>. Кількість відліків траєкторій  $N=20$ . Помилки вимірювання прямокутних координат цілі кореляційно-екстремальним методом встановлено  $\sigma_x = \sigma_y = 1$  пікс. СКВ шуму на зображенні  $\sigma_n = 0,1$ . Кількість реалізацій метода Монте-Карло дорівнює 100.

На рис. 1 представлені незашумлене і зашумлене еталонні зображення БПЛА розміром  $10 \times 6$  пікс. На рис. 2 представлені результати обчислення нормованої взаємної кореляційної функції еталонного і поточного зображень, спотворених шумом.



Рис. 1. Зображення еталону  $10 \times 6$  пікселів а) без шуму, б) з шумом.

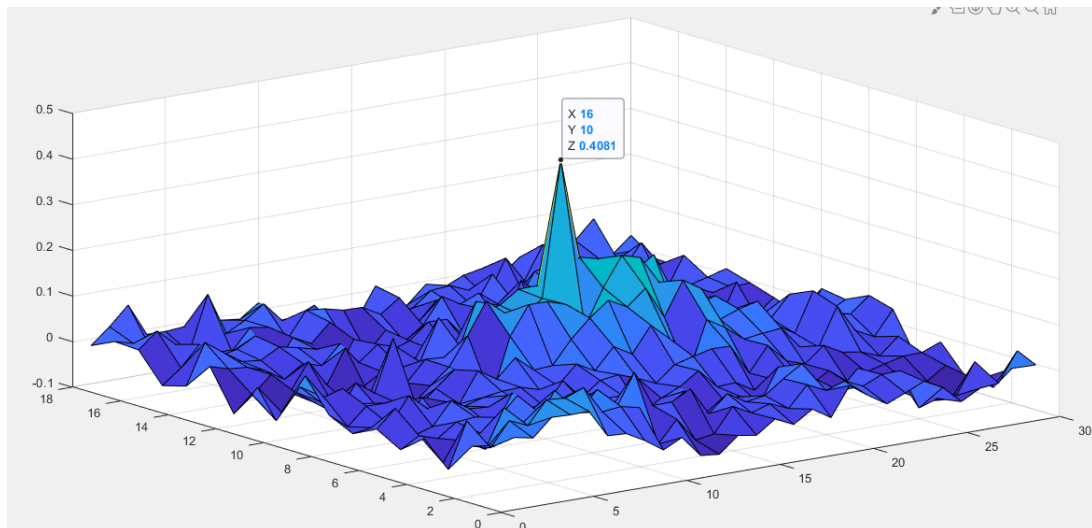


Рис. 2. Нормована взаємна кореляційна функція зашумлених зображень.

На рис.3 (а,в) показані математичні очікування  $m_x^*, m_y^*$  (зелена криві 1), СКВ помилок прогнозу положення цілі  $\sigma_x^*, \sigma_y^*$  (синя криві 2), що отримані методом Монте-Карло та СКВ помилок прогнозу положення цілі, що

розраховані фільтром  $\sqrt{p_x^*}, \sqrt{p_y^*}$  (червона криві 3). На рис. 3 (б,г) показані математичній очікування  $\hat{m}_x, \hat{m}_y$  (криві 1), СКВ помилок оцінки положення цілі  $\hat{\sigma}_x, \hat{\sigma}_y$  (криві 2), що отримані методом Монте-Карло та СКВ помилок оцінки положення цілі, що розраховані фільтром  $\sqrt{\hat{p}_x}, \sqrt{\hat{p}_y}$  (криві 3).

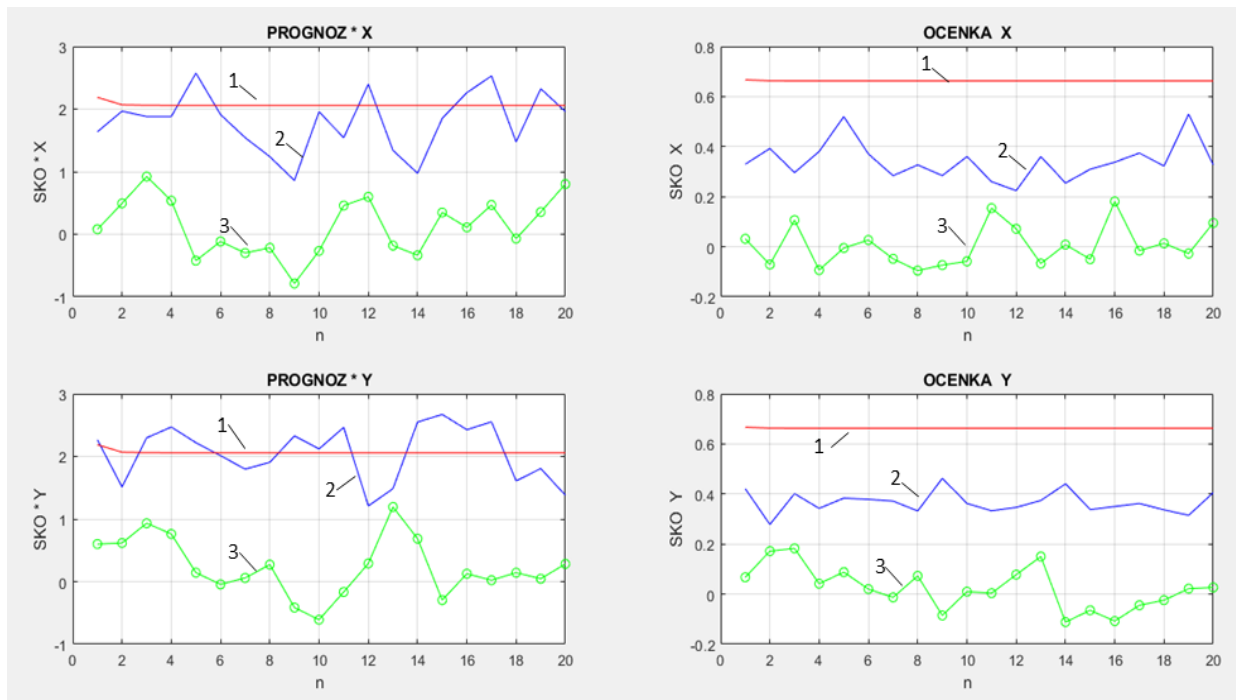


Рис. 3. Залежності математичного очікування і СКВ помилок прогнозу і оцінки координат БПЛА по осям X і Y.

**Висновки.** Як впливає з отриманих результатів кореляційно-екстремальний алгоритм стеження забезпечує субпіксельну точність оцінювання положення БПЛА на поточному кадрі. Він забезпечує стійке супроводження БПЛА при входному відношенні сигнал/шум  $q > 3$  дБ. При  $q < 2.7$  дБ ймовірність зриву супроводження БПЛА спрямовується до одиниці.

### Література

1. Алгоритмическое обеспечение оптико-электронных систем комплекса защиты объектов от беспилотных летательных аппаратов / В. А.Бондаренко, Г. Э. Каплинский, В. А. Павлова, В. А. Тупиков. // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – С. 15–27.
2. Алпатов Б.А., Бабаян П.В., Балашов О.Е., Степашкин А.И. Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов // Обработка изображений и управление. – М.: Радиотехника. – 2008. – 176 с.
3. Анализ алгоритмов обнаружения и измерения координат объектов в оптико-электронных системах / О.В. Корзунов, А.И. Лужинский // Известия ТулГУ. Технические науки. 2017. Вып. 12. Ч. 3.
4. Варфоломеев А. Ю. Методи та алгоритми автоматичного відслідковування об'єктів на відеопослідовностях: монографія / А. Ю. Варфоломеев. – К.: КІМ, 2013.-112 с.