

## ФИЛЬТРАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ БПЛА ПРИ КОМПЛЕКСНОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДАННЫХ СЕНСОРНОЙ СЕТИ, ПОЛУЧЕННЫХ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ TDOA И RSS

**Товкач И.О., Жук С.Я.**

*Радиотехнический факультет КПИ им. Игоря Сикорского, г. Киев, Украина*

*E-mail: tovkach.igor@gmail.com*

### Filtration of parameters of the UAV movement in case of complex use of data from the sensor network obtained on the basis TDOA and RSS methods

On the basis of a mathematical apparatus of the Kalman filtering, adaptive algorithm for filtration of parameters of the UAV movement in case of complex use of data from the sensor network obtained on the basis TDOA and RSS methods are realized. Analysis of the developed algorithm executed using statistical modeling.

Последние достижения в области беспроводных сенсорных сетей (БСС) открывают новые возможности при решении задачи определения местоположения и оценки параметров движения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). БСС представляет собой набор миниатюрных и недорогих устройств, оснащенных различными видами датчиков, небольшим микроконтроллером и приемопередатчиком, которые объединены с помощью сети WLAN, использующей для передачи данных радиоканалы.

Для определения местоположения БПЛА широкое распространение находят методы TDOA (time difference of arrival) [1] и RSS (received-signal strength) [2]. Уравнение наблюдения для метода TDOA, описывающее процесс измерения координат БПЛА сенсорной сетью, включающей  $L+1$  датчик, имеет вид

$$\Delta^l(k) = h_{\Delta}^l(u(k)) + v^l(k), \quad l = \overline{1, L} \quad (2)$$

где  $\Delta^l(k)$  – измеренная разность расстояний между  $l$ -м и опорным ( $l=0$ ) датчиками  $l = \overline{1, L}$ ;  $v^l(k)$  – ошибка измерения  $l$ -го датчика с дисперсией  $d^l$ ;

$$h_{\Delta}^l(u(k)) = \sqrt{(x(k) - x^l)^2 + (y(k) - y^l)^2} - \sqrt{x^2(k) + y^2(k)} - v^0(k). \quad (3)$$

Уравнение наблюдения для метода RSS имеет вид

$$p^l(k) = h_p^l(u(k)) + v^l(k), \quad l = \overline{1, L}, \quad (2)$$

где  $p^l(k)$  – измеренная  $l$ -м датчиком мощность сигнала БПЛА  $l = \overline{0, L}$ ;  $v^l(k)$  – ошибка измерения мощности принятого сигнала  $l$ -м датчиком с дисперсией  $d^l$ ;

$$h_p^l(u(k)) = p^0 - 10 \cdot \alpha \cdot \lg \left( \frac{\sqrt{(x(k) - x^l)^2 + (y(k) - y^l)^2}}{r^0} \right). \quad (3)$$

Движение БПЛА в прямоугольной системе координат описывается стохастической динамической системой вида [3]:

$$u(k) = Fu(k-1) + G\omega(k), \quad (1)$$

где  $u(k)$  - вектор состояния, включающий параметры движения БПЛА по осям

прямоугольной системы координат.

Повышение точности оценивания параметров движения БПЛА может быть достигнуто путем комплексной обработки данных, полученных на основе методов TDOA и RSS [4].

На основе математического аппарата Калмановской фильтрации синтезирован алгоритм оценивания параметров движения БПЛА при комплексном использовании данных сенсорной сети, полученных на основе методов TDOA и RSS. Структурная схема полученного расширенного фильтра Калмана с последовательной реализацией вычислений показана на рис. 1.

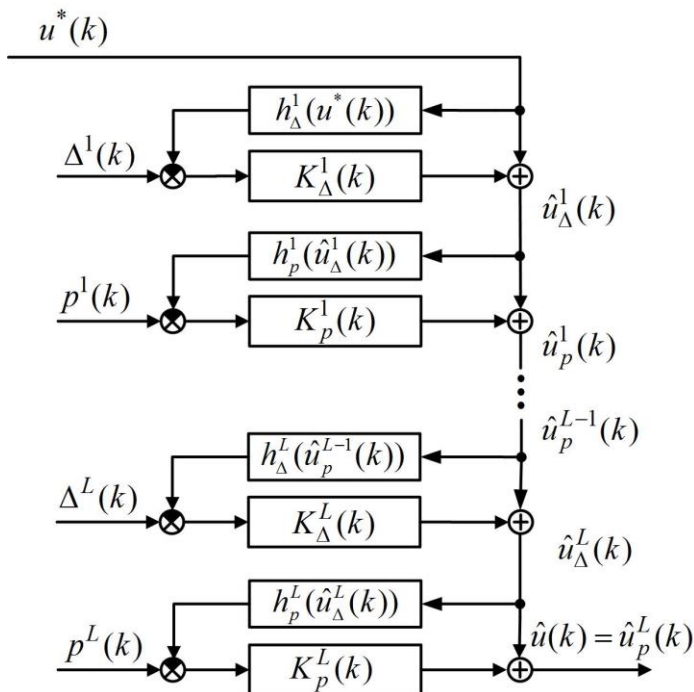


Рис. 1. Структурная схема фильтра при комплексировании TDOA и RSS измерений.

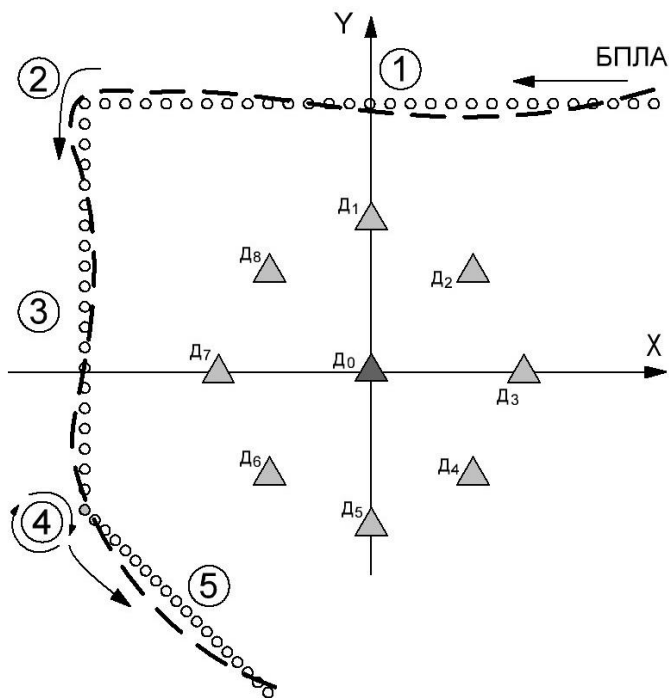


Рис. 2. Конфигурация сенсорной сети из 9 датчиков и траектория движения БПЛА.

Анализ эффективности разработанного алгоритма проведен с помощью статистического моделирования. При этом сенсорная сеть (рис. 2) состоит из девяти датчиков, располагающихся на окружности с радиусом 100 м. Для наглядности работы алгоритмов была сформирована тестовая траектория движения БПЛА, которая включает пять участков (рис. 2). СКО ошибок измерений при использовании методов TDOA и RSS  $\sigma_\Delta = 2.4$  м и  $\sigma_P = 1$  дБ соответственно. Темп поступления информации  $T=1$  с. Испытания проводились по ста реализациям.

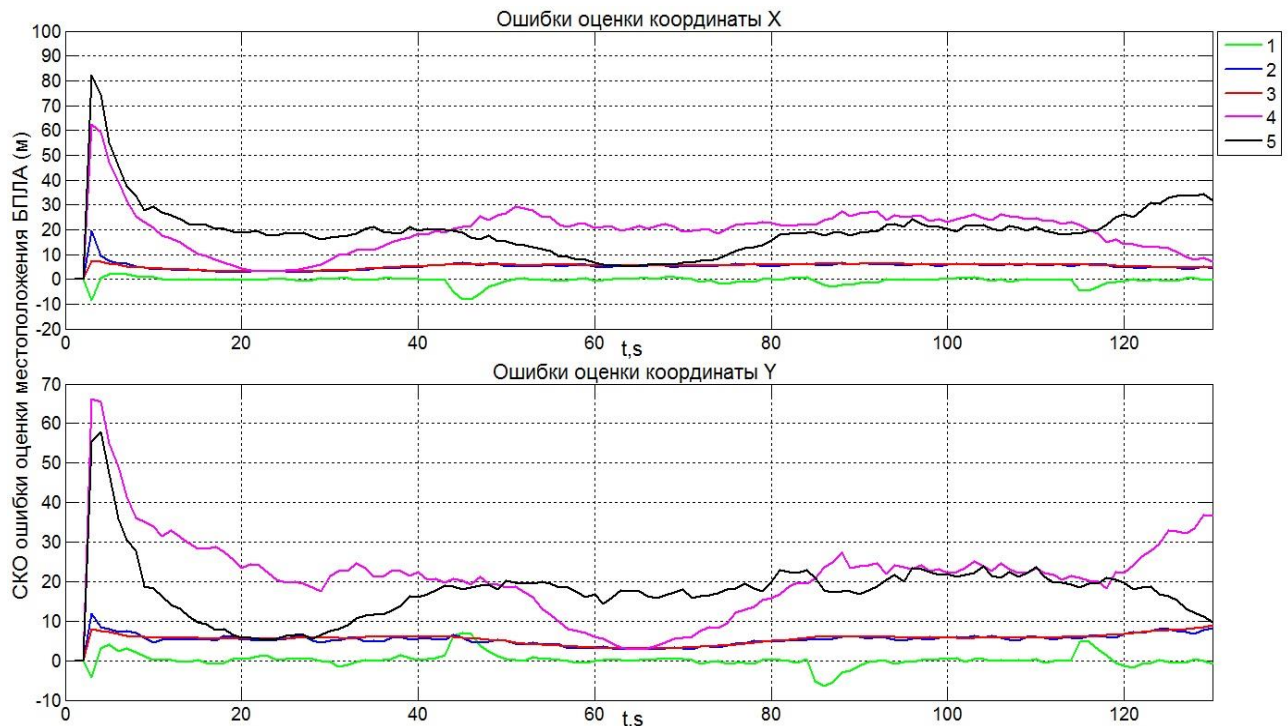


Рис. 3. SKO ошибки оценки местоположения БПЛА.

На рис. 3 показаны полученные методом Монте-Карло зависимости математических ожиданий (кривые 1) и SKO (кривые 2) ошибок оценки местоположения БПЛА по координатам  $X$ ,  $Y$ , а также SKO (кривые 3) ошибок оценки, рассчитанных разработанным фильтром. Также на рис. 3 показаны зависимости SKO ошибок оценки местоположения БПЛА фильтров Калмана при независимой обработке данных, полученных методом TDOA (кривые 4) и методом RSS (кривые 5). Комплексное использование данных позволяет уменьшить SKO ошибки определения местоположения БПЛА более, чем в 3 раза.

### Литература

1. Товкач И.О. Рекуррентный алгоритм пассивной локации в сенсорной сети по разностно-дальномерному методу при некоррелированных ошибках измерений / И.О. Товкач, С.Я. Жук // X Міжнародна Науково-технічна Конференція "ПРОБЛЕМИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ 2016", 19.04-22.04.2016 р.: тези доп. — Київ, 2016. — С.432-434.
2. Товкач И. О. Рекуррентный алгоритм пассивной локации в сенсорной сети на основе измерения мощности принимаемого сигнала / И.О. Товкач, С.Я. Жук // Вестник НТУУ «КПИ». Серия Радиотехника. Радиоаппаратостроение. – 2016. – № 66. – с. 46-55.
3. Жук С. Я. Методы оптимизации дискретных динамических систем со случайной структурой / С. Я. Жук: [Монография]. — К.: НТУУ «КПИ», 2008 – 232 с.
4. Hedley M. Wireless Sensor Network using Hybrid TDOA/RSS Tracking of Uncooperative Targets / M. Hedley, Q. Zhai // 17th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, – 2014, pp. 385–390.