

## ФИЛЬТРАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ИСТОЧНИКА РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ УГЛОМЕРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ

**Товкач И.О., Жук С.Я.**

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

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

### Filtering of radio source movement parameters on the basis angle of arrival measurements of the sensor network

Using the mathematical apparatus of Kalman filter, the recurrent algorithm has been developed for estimating the radio source movement parameters based on AOA-measurements of sensor network. 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 источников радиоизлучения (ИРИ). БСС позволяют создавать локальные системы позиционирования, которые находят применение при мониторинге окружающего пространства, ликвидации последствий стихийных бедствий, в интеллектуальных транспортных и охранных системах. В течение последних лет был разработан ряд методов для определения местоположения неизвестного ИРИ с помощью БСС [1,2]: RSS (Received Signal Strength), ToA (Time of Arrival), TDoA (Time Difference of Arrival), AoA (Angle of Arrival). Одним из перспективных методов определения координат неизвестного ИРИ с использованием БСС является AoA метод на основе технологии MIMO [3].

AoA метод основан на определении местоположения ИРИ, как точки пересечения линий положения, соответствующих измеренным в двух разнесенных точках приема пеленгам. Достоинством данного метода является его простота. Поэтому он нашел самое широкое применение на практике.

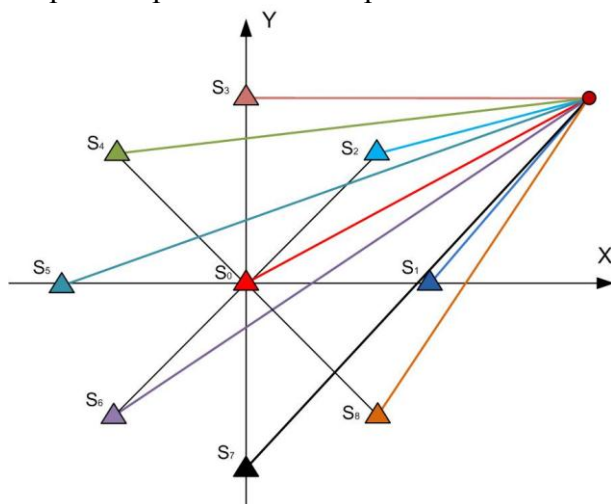


Рис. 1. Конфигурация сенсорной сети из девяти датчиков.

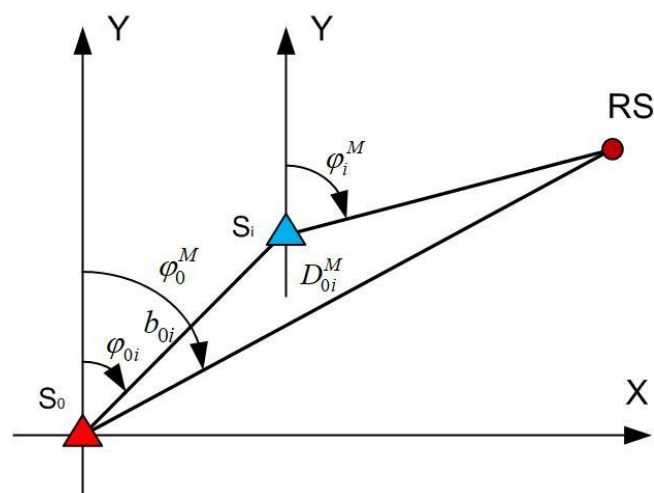


Рис. 2 Измерения азимутов ИРИ 0-м и i-м датчиками сенсорной сети.

БСС состоит из набора датчиков с координатами  $(x_j^S, y_j^S), j = \overline{0, n}$ . На рис. 1 показаны структурная схема сенсорной сети на плоскости, состоящей из девяти датчиков. Положение ИРИ характеризуется точкой с координатами  $(x, y)$ . Для определения

положения ИРИ используются пары датчиков  $S_0 S_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ . В качестве опорного для всех пар применяется датчик  $S_0$ . При использовании метода АОА в одном цикле измерения все датчики измеряют пеленги ИРИ  $\varphi_i^M$ ,  $i = \overline{0, n}$  с одинаковой дисперсией ошибок измерений пеленгов  $\sigma^2$   $i = \overline{0, n}$ .

Расстояние от опорного приемника  $S_0$  до цели находится с помощью измеренных 0-м и  $i$ -м датчиками пеленгов ИРИ  $\varphi_i^M$  и  $\varphi_0^M$ . По теореме синусов:

$$D_{0i}^M = \frac{b_{0i} \sin(180 - (\varphi_{0i} - \varphi_i^M))}{\sin((\varphi_{0i} - \varphi_i^M) - (\varphi_{0i} - \varphi_0^M))}, \quad (1)$$

где  $\varphi_{0i}$  – азимут  $i$ -ой базы;  $b_{0i}$  – длина  $i$ -ой базы.

Координаты ИРИ в прямоугольной системе координат на основе рассчитанного значения дальности  $D_{0i}^M$  и измеренного опорным датчиком азимута  $\varphi_0^M$  определяются по формулам:

$$x_{0i}^M = D_{0i}^M \sin \varphi_{0i}^M; \quad (2)$$

$$y_{0i}^M = D_{0i}^M \cos \varphi_{0i}^M. \quad (3)$$

Повышение точности определения местоположения ИРИ может быть достигнуто путем траекторной фильтрации. Необходимо на основе математического аппарата калмановской фильтрации синтезировать алгоритм оценивания параметров движения ИРИ на основе АОА-измерений сенсорной сети.

Движение ИРИ в прямоугольной системе координат описывается стохастической динамической системой вида [4]:

$$u(k) = Fu(k-1) + G\omega(k), \quad (3)$$

где  $u(k)$  – вектор состояния, включающий параметры движения ИРИ по осям прямоугольной системы координат.

Выполняя линеаризацию уравнений (2,3), можно получить рекуррентный алгоритм оценивания вектора состояния  $u_k$ , в виде фильтра Калмана [4]

$$K_k = \hat{P}_{k-1} \cdot H \left[ H \hat{P}_{k-1} H + R_k \right]^{-1}; \quad (4)$$

$$\hat{u}_k = \hat{u}_{k-1} + K_k \left[ Y_k - H \hat{u}_{k-1} \right]; \quad (5)$$

$$\hat{P}_k = \hat{P}_{k-1} - K_k H \hat{P}_{k-1}, \quad (6)$$

где  $\hat{u}_k$  – оценка вектора состояния  $u_k$  на  $k$ -м шаге;  $\hat{P}_k$  – корреляционная матрица ошибки оценки вектора состояния  $u_k$  на  $k$ -м шаге;  $Y_k = (x_{0i}^M, x_{0i}^M)^T$  – вектор измерения;  $K_k$  – коэффициент усиления фильтра;  $H$  – матрица наблюдения,  $R_k$  – корреляционная матрица, имеют вид

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad R_k = \begin{bmatrix} \sigma_{0iX}^2 & \sigma_{0iXY}^2 \\ \sigma_{0iXY}^2 & \sigma_{0iY}^2 \end{bmatrix}.$$

Анализ эффективности разработанного алгоритма проведен с помощью статистического моделирования. При этом сенсорная сеть (рис. 1) состоит из девяти датчиков, располагающихся на окружности с радиусом 100 м. Для наглядности работы алгоритмов была сформирована тестовая траектория движения ИРИ в виде окружности с

радиусом 1000 м относительно опорного датчика  $S_0$ . СКО ошибок измерений  $\sigma = 0.4^\circ$ . Темп поступления информации  $T=1$ с. Испытания проводились по ста реализациям.

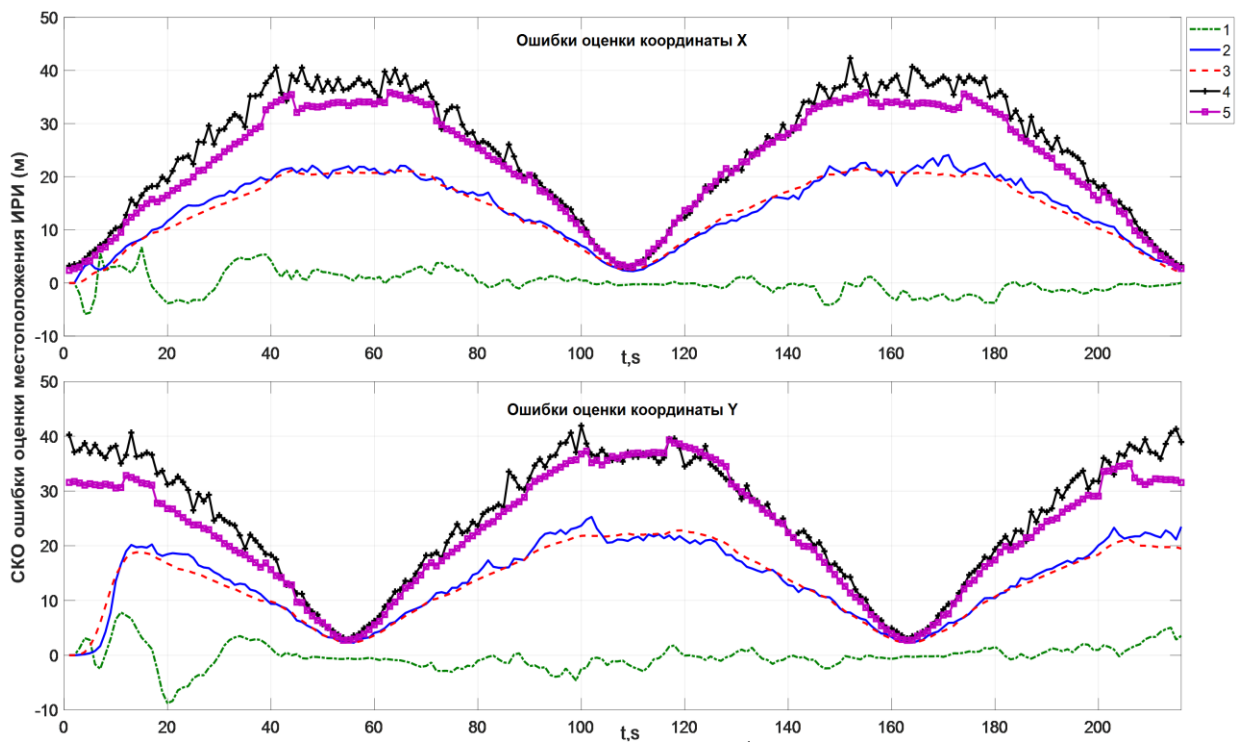


Рис. 3. СКО ошибки оценки местоположения цели для пары датчиков сенсорной сети.

На рис. 3 показаны полученные методом Монте-Карло зависимости математических ожиданий (кривые 1) и СКО (кривые 2) ошибок оценки местоположения БПЛА по координатам  $X$ ,  $Y$ , а также СКО (кривые 3) ошибок оценки, рассчитанных разработанным фильтром. Также на рис. 3 показаны зависимости СКО ошибок оценки местоположения ИРИ, которое соответствует рекуррентному методу определения местоположения (кривые 4,5). Применение траекторной фильтрации позволяет уменьшить СКО ошибки определения местоположения ИРИ в 1.5-2 раза.

### Литература

1. Zhang, Weile & Yin, Qinye & Chen, Hongyang & Gao, Feifei & Ansari, Nirwan., "Distributed Angle Estimation for Localization in Wireless Sensor Networks". IEEE Transactions on Wireless Communications. 12, 2012, 527-537. 10.1109/TWC.2012.121412.111346.
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. Amiri, Rouhollah & Zamani, Hojatollah & Behnia, Fereidoon & Marvasti, Farokh., "Sparsity-aware target localization using TDOA/AOA measurements in distributed MIMO radars", ICT Express. 2, 2016. 10.1016/j.icte.2016.02.002.
4. Жук С.Я. Методи адаптивного оцінювання параметрів руху безпілотного літального апарату на основі вимірювань сенсорної мережі : монографія / С.Я. Жук, І.О. Товкач. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2019, – 172 с.