

РЕКУРРЕНТНЫЙ АЛГОРИТМ ПАССИВНОЙ ЛОКАЦИИ В СЕНСОРНОЙ СЕТИ ПО РАЗНОСТНО-ДАЛЬНОМЕРНОМУ МЕТОДУ ПРИ НЕКОРРЕЛИРОВАННЫХ ОШИБКАХ ИЗМЕРЕНИЙ

Товкач И.О., Жук С.Я.

Радиотехнический факультет НТУУ «КПИ», м. Киев, Украина

E-mail: tovkach.igor@gmail.com

Recursive algorithm of the passive location in sensor networks based on the time difference of arrival method in case of uncorrelated errors of measurements

Using the mathematical apparatus of Kalman filtering is developed quasi-optimal recursive algorithm for determining the coordinates of the radio source in sensor networks based on the time difference of arrival method. Using statistical modeling is analyzed of the accuracy characteristics of the algorithm and compared with the Cramer-Rao lower bound.

Задача пассивного определения местоположения источников радиоизлучения (ИРИ) находит широкое применение при мониторинге окружающего пространства, ликвидации последствий стихийных бедствий, в интеллектуальных транспортных и охранных системах. В настоящее время для ее решения применяются сенсорные сети. При определении координат ИРИ на плоскости сенсорная сеть должна состоять из трех или более датчиков (Д).

Один из основных подходов пассивного определения местоположения ИРИ основывается на применении разностно-дальномерного метода (РДМ), в котором используются разности задержек между сигналами, полученными различными датчиками. Данный метод имеет существенное преимущество в простоте реализации, так как не требует синхронизации между ИРИ и датчиками сети и находит широкое применение на практике.

В известных методах определения местоположения ИРИ на основе РДМ [1], вычисление координат выполняется после поступления измерений от всех датчиков. В работе на основе математического аппарата калмановской фильтрации разработан квазиоптимальный алгоритм, который после формирования начальных условий на основе измерений времени прихода сигналов от четырех датчиков, позволяет рекуррентно уточнять местоположение ИРИ по мере поступления измерений от остальных датчиков.

На рис. 1 показана структурная схема сенсорной сети на плоскости, состоящей из девяти датчиков с координатами (x_i^D, y_i^D) , $i = \overline{0,8}$. Положение ИРИ характеризуется точкой с координатами (x, y) . Уравнения РДМ для сети, включающей $n+1$ датчиков, имеют вид

$$d_{i0} = R_i - R_0 + v_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где R_i – расстояние между i -м датчиком и ИРИ $i = \overline{1, n}$; R_0 – расстояние между опорным датчиком и ИРИ; d_{i0} разность расстояний между R_i и R_0 $i = \overline{1, n}$; v_i –

некоррелированная погрешность измерения [1] с дисперсией σ_v^2 $i = \overline{1, n}$.

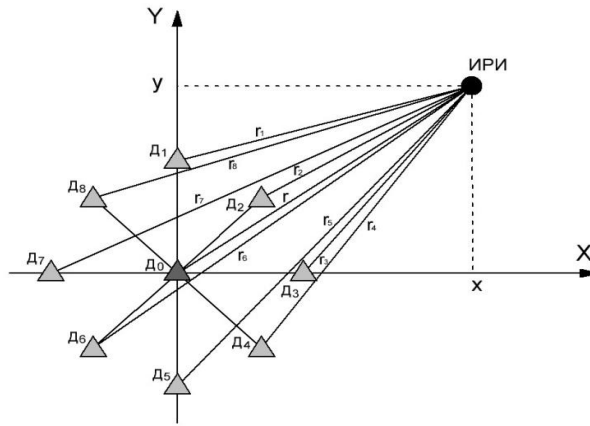


Рис. 1.

Полагается, что за время измерения разности дальностей между ИРИ и датчиками сети, его координаты не меняются, поэтому уравнение, описывающее динамику изменения координат положения ИРИ, имеет вид

$$u_k = u_{k-1}, \quad (2)$$

где $u_k = (x_k, y_k)^T$ – вектор состояния, включающий координаты положения ИРИ на текущем такте k .

Уравнение измерения с учётом (1) можно представить в виде

$$r_k = h(u_k) + v_k, \quad (3)$$

где $h(u_k)$ – нелинейная функция, которая описывается выражением

$$h(u_k) = \sqrt{(x_k - x_k^D)^2 + (y_k - y_k^D)^2} - \sqrt{x_k^2 + y_k^2}.$$

Уравнение измерения (3) является нелинейным.

С использованием модели (2), (3), квазиоптимальный алгоритм оценивания координат ИРИ может быть получен на основе расширенного фильтра Калмана [2] и описывается уравнениями

$$K_k = \hat{P}_{k-1} \cdot \frac{\partial h^T(\hat{u}_{k-1})}{\partial u_k} \left[\frac{\partial h(\hat{u}_{k-1})}{\partial u_k} \hat{P}_{k-1} \frac{\partial h^T(\hat{u}_{k-1})}{\partial u_k} + \sigma^2 \right]^{-1}; \quad (4)$$

$$\hat{u}_k = \hat{u}_{k-1} + K_k [r_k - h(\hat{u}_{k-1})]; \quad (5)$$

$$\hat{P}_k = \hat{P}_{k-1} - K_k \frac{\partial h(\hat{u}_{k-1})}{\partial u_k} \hat{P}_{k-1}, \quad (6)$$

где \hat{u}_k – оценка вектора состояния u_k ; \hat{P}_k – корреляционная матрица ошибки оценки вектора состояния u_k ; K_k – коэффициент усиления фильтра;

$$\frac{\partial h(\hat{u}_{k-1})}{\partial u_k} = \left[\frac{\hat{x}_{k-1} - x_k^D}{R_k^*}, \frac{\hat{x}_{k-1}}{R_{0k}^*}, \frac{\hat{y}_{k-1} - y_k^D}{R_k^*}, \frac{\hat{y}_{k-1}}{R_{0k}^*} \right]; R_k^* = \sqrt{(\hat{x}_{k-1} - x_k^D)^2 + (\hat{y}_{k-1} - y_k^D)^2}; R_{0k}^* = \sqrt{\hat{x}_{k-1}^2 + \hat{y}_{k-1}^2}.$$

Для выполнения калмановской фильтрации необходимо задать начальные условия. Начальная оценка вектора состояния \hat{u}_0 определяется на основе метода наименьших квадратов при наличии трех измерений разностей дальностей [3]. Начальная корреляционная матрица \hat{P}_0 определяется с использованием метода квадратичной коррекции [1].

Моделирование алгоритма на основе РДМ проведено для конфигурации сенсорной сети рис. 1, где Д0 (0;0), Д1 (0;20), Д2 (20√2;20√2), Д3 (20;0), Д4 (20√2;-20√2), Д5 (0;-20), Д6 (-20√2;-20√2), Д7 (-20;0), Д8 (-20√2;20√2). ИРИ располагается на окружности с радиусом 100 км. относительно опорного датчика Д0. Погрешность измерения датчиков $\sigma = 30$ м. В качестве показателя эффективности использовалось круговое СКО $\sigma = \sqrt{tr(P)}$.

Фактическое круговое СКО $\hat{\sigma}^{МК}$ (кривая 1) ошибки оценки местоположения ИРИ, полученное методом Монте-Карло, а также теоретическое СКО $\hat{\sigma}$ (кривая 2), которое получено аналитически, показаны на рис. 2. Значение фактического СКО колеблется относительно его теоретического. СКО $\hat{\sigma}^{МК}$ принимает значения в пределах от 0.65 до 1.08 км. Также на рис. 2 (кривая 3) показано СКО $\hat{\sigma}_{НГРК}$, которое соответствует нижней границе Рао-Крамера (НГРК), которая характеризует потенциальную возможную точность определения координат ИРИ.

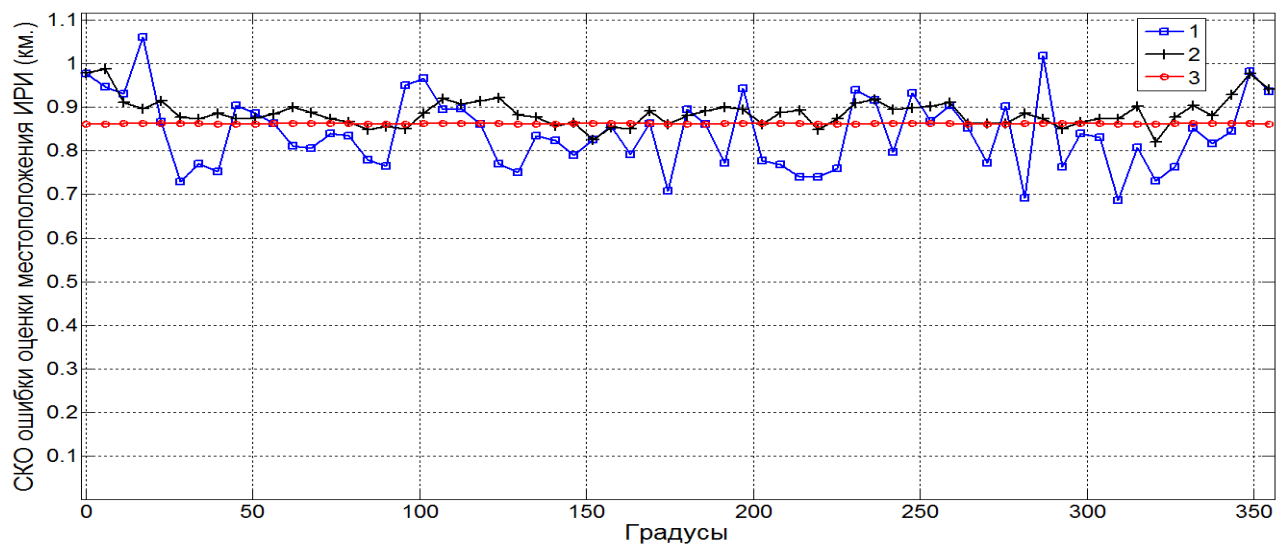


Рис. 2.

Как следует из результатов моделирования для рассмотренного алгоритма СКО погрешности оценки местоположения ИРИ достигает НГРК, Таким образом, он обладает точносными характеристиками, близкими к потенциально достижимым.

Литература

1. Бузуверов Г.В. Алгоритмы пассивной локации в распределенной сети датчиков по разностно-дальномерному методу / Г.В.Бузуверов, О.И. Герасимов. — М. : Информационно-измерительные и управляющие системы №5, 2008. — 12 с.
2. Greg Welch, Gary Bishop. “An Introduction to the Kalman Filter”, Department of Computer Science University of North Carolina at Chapel Hill, July 24, 2006. Available from https://www.cs.unc.edu/~welch/media/pdf/kalman_intro.pdf
3. Симаков В.А. Построение адаптивных систем пассивной радиолокации на принципах разностно-дальномерной координатометрии / В.А. Симаков // Научные ведомости Белгородский государственный университет . — 2005. — №2. — С. 221.