

УДК 621.396.96

## АДАПТИВНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ИСТОЧНИКА РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ TDOA-ИЗМЕРЕНИЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ ПРИ НАЛИЧИИ АНОМАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

С. Я. ЖУК, И. О. ТОВКАЧ, Ю. Ю. РЕУТСКАЯ

*Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского»,  
Украина, Киев, 03056, пр-т Победы 37*

**Аннотация.** Методы на основе TDOA-измерений находят широкое применение для определения местоположения источника радиоизлучения с помощью беспроводных сенсорных сетей. В реальных условиях часто возникает необходимость учитывать наличие аномальных результатов измерений. Их появление означает существенное нарушение работы датчика сенсорной сети, что приводит к расхождению традиционных алгоритмов калмановской фильтрации параметров движения источника радиоизлучения. В работе на основе математического аппарата смешанных марковских процессов в дискретном времени синтезированы оптимальный и квазиоптимальный алгоритмы адаптивной фильтрации параметров движения источника радиоизлучения на основе TDOA-измерений сенсорной сети при наличии аномальных измерений. Оптимальный алгоритм описывает эволюцию совместной апостериорной плотности вероятности вектора параметров движения и переменных переключения, определяющих вид ошибок измерения датчиков сети. В полученном путем линеаризации уравнения измерения квазиоптимальном алгоритме реализован последовательный способ обработки поступающих данных и выполняется гауссовская аппроксимация апостериорной плотности вероятности параметров движения источника радиоизлучения. Для рассмотренного с помощью статистического моделирования примера разработанный квазиоптимальный алгоритм позволяет распознать появление аномальных ошибок измерений с вероятностью, близкой к единице, и устранить их влияние на точность определения параметров движения источника радиоизлучения.

**Ключевые слова:** TDOA-измерения, сенсорная сеть, аномальные измерения, параметры движения источника радиоизлучения, смешанные марковские процессы, алгоритм адаптивного оценивания.

### ВСТУПЛЕНИЕ

Задача пассивного определения местоположения источников радиоизлучения (ИРИ) находит широкое применение при мониторинге окружающего пространства, ликвидации последствий стихийных бедствий, в интеллектуальных транспортных и охранных системах [1–3]. Местоположение ИРИ может быть определено с помощью беспроводных сенсорных сетей (БСС) [4–7], которые стали важной областью исследований в течение последних лет.

БСС начинают активно применяться в различных областях, таких как: аварийно-спасательные операции, автономное наблюдение и мониторинг промышленных процессов и окружающей среды (мониторинг животного мира), контроль и управление подвижными объектами и др. При выполнении аварийно-спасательных операций БСС обеспечивают возможность определения местоположения членов спасательных команд (например, пожарной команды), а также технических средств (на-

DOI: [10.20535/S002134701902002X](https://doi.org/10.20535/S002134701902002X)

© С. Я. Жук, И. О. Товкач, Ю. Ю. Реутская, 2019



БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Emery, M.; Denko, M. "IEEE 802.11 WLAN based real-time location tracking in indoor and outdoor environments," *Proc. of Canadian Conf. on Electrical and Computer Engineering*, CCECE'07, 22-26 Apr. 2007, Vancouver, Canada. IEEE, 2007, p. 1062–1065. DOI: [10.1109/CCECE.2007.271](https://doi.org/10.1109/CCECE.2007.271).
2. Xu, E.; Ding, Z.; Dasgupta, S. "Target tracking and mobile sensor navigation in wireless sensor networks," *IEEE Trans. Mobile Comput.*, Vol. 12, No. 1, p. 177–186, Jan. 2013. DOI: [10.1109/TMC.2011.262](https://doi.org/10.1109/TMC.2011.262).
3. Sinclair, A. J.; Lovell, T. A.; Darling, J. "RF localization solution using heterogeneous TDOA," *IEEE Aerospace Conf.*, 7-14 Mar. 2015, Big Sky, USA. IEEE, 2015. DOI: [10.1109/AERO.2015.7119256](https://doi.org/10.1109/AERO.2015.7119256).
4. Mahfouz, S.; Mourad-Chehade, F.; Honeine, P.; Farah, J.; Snoussi, H. "Target tracking using machine learning and Kalman filter in wireless sensor networks," *IEEE Sensors J.*, Vol. 14, No. 10, p. 3715–3725, Oct 2014. DOI: [10.1109/JSEN.2014.2332098](https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2332098).
5. Лю, Ф.; Ли, Х.; Ян, Ч. "Метод оценивания последовательно отсутствующих данных сенсоров с использованием глубокой нейронной сети," *Известия вузов. Радиоэлектроника*, Т. 61, № 6, с. 336–348, 2018. DOI: [10.20535/S0021347018060043](https://doi.org/10.20535/S0021347018060043).
6. Alsheikh, Mohammad Abu; Lin, Shaowei; Niyato, Dusit; Tan, Hwee-Pink. "Machine learning in wireless sensor networks: Algorithms strategies and applications," *IEEE Commun. Surveys & Tutorials*, Vol. 16, No. 4, p. 1996–2018, 2014. DOI: [10.1109/COMST.2014.2320099](https://doi.org/10.1109/COMST.2014.2320099).
7. Amar, Alon; Leus, Geert. "A reference-free time difference of arrival source localization using a passive sensor array," *IEEE Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop*, 4-7 Oct. 2010, Jerusalem, Israel. IEEE, 2010, pp. 157–160. DOI: [10.1109/SAM.2010.5606725](https://doi.org/10.1109/SAM.2010.5606725).
8. Zhang, X.; Huang, J.; Wang, Y.; Zhou, Y. "An efficient estimator for target localization in a multistation redundancy system without matrix inversion," *J. Sensors*, Vol. 2018, p. 1–12, 2018. DOI: [10.1155/2018/6362939](https://doi.org/10.1155/2018/6362939).
9. Rullan-Lara, Jose L.; Sanahuja, Guillaume; Lozano, Rogelio; Salaza, Sergio; Garcia-Hernandez, Ramon; Ruz-Hernandez, Jose A. "Indoor localization of a quadrotor based on WSN: a real-time application," *Int. J. Advanced Robotic Systems*, Vol. 10, No. 1, 2013. DOI: [10.5772/53748](https://doi.org/10.5772/53748).
10. El Gemayel, N.; Koslowski, S.; Jondral, F. K.; Tschan, J. "A low cost TDOA localization system: Setup, challenges and results," *Proc. of 10th Workshop on Positioning, Navigation and Communication*, WPNC, 20-21 Mar. 2013, Dresden Germany. IEEE, 2013, pp. 1–4. DOI: [10.1109/WPNC.2013.6533293](https://doi.org/10.1109/WPNC.2013.6533293).



11. El Gemayel, Noha; Jakel, Holger; Jondral, Friedrich K. "Error analysis of a low cost TDoA sensor network," *Proc. of IEEE/ION Position, Location and Navigation Symp.*, 5-8 May 2014, Monterey, USA. IEEE, 2014, pp. 1140-1145. DOI: [10.1109/PLANS.2014.6851484](https://doi.org/10.1109/PLANS.2014.6851484).
12. Wan, Pengwu; Li, Zan; Hao, Benjian. "Time delay estimation of co-frequency signals in TDOA localization based on WSN," *Proc. of Int. Conf. on Computer, Information and Telecommunication Systems, CITS*, 6-8 Jul. 2016, Kunming, China. IEEE, 2016. DOI: [10.1109/CITS.2016.7546399](https://doi.org/10.1109/CITS.2016.7546399).
13. Makki, Ahmed; Siddig, Abubakr; Saad, Mohamed; Cavallaro, Joseph R.; Bleakley, Chris J. "Indoor localization using 802.11 time differences of arrival," *IEEE Trans. Instrumentation Meas.*, Vol. 65, No. 3, p. 614-623, Mar 2016. DOI: [10.1109/TIM.2015.2506239](https://doi.org/10.1109/TIM.2015.2506239).
14. Куприянов, А. И.; Сахаров, А. В. *Теоретические основы радиоэлектронной борьбы: Учеб. пособие*. М.: Вузовская книга, 2007. 356 с.
15. Сирота, А. А.; Кирсанов, Э. А. "Нейросетевые и статистические алгоритмы оценки координат источника радиоизлучения в многопозиционных радиосистемах при наличии аномальных ошибок измерения первичных параметров," *Известия вузов. Радиоэлектроника*, Т. 49, № 4, С. 19-27, 2006. URI: <http://radio.kpi.ua/article/view/S0021347006040030>.
16. You, He; Jianjuan, Xiu; Xin, Guan. *Radar Data Processing with Applications*. Wiley, 2016. DOI: [10.1002/9781118956878](https://doi.org/10.1002/9781118956878).
17. Tovkach, I. O.; Zhuk, S. Ya. "Recurrent algorithm for TDOA localization in sensor networks," *J. Aerosp. Technol. Manag.*, Vol. 9, No. 4, p. 489-494, 2017. DOI: [10.5028/jatm.v9i4.727](https://doi.org/10.5028/jatm.v9i4.727).
18. Евланов, П. А.; Жук, С. Я. "Комплексирование измерителей с отказами," *Известия вузов. Радиоэлектроника*, Т. 33, № 7, с. 40-45, 1990.
19. Тихонов, В. И.; Харисов, В. Н. *Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. Учебное пособие для вузов*. 3-е изд. М.: Горячая Линия—Телеком, 2014. 607 с.
20. Трифонов, А. П.; Шинаков, Ю. С. *Совместное различение сигналов и оценка их параметров на фоне помех*. М.: Медиа, 2012. 264 с.
21. Жук, С. Я. "Синтез цифровых обнаружителей-измерителей смешанных марковских процессов," *Известия вузов. Радиоэлектроника*, Т. 32, № 11, с. 31-37, 1989. URI: <http://radio.kpi.ua/article/view/S002134701989110063>.
22. Товкач, И. О.; Жук, С. Я. "Адаптивная фильтрация параметров движения источника радиоизлучения при комплексном использовании данных сенсорной сети, полученных на основе методов TDOA и RSS," *Известия вузов. Радиоэлектроника*, Т. 60, № 12, с. 685-695, 2017. DOI: [10.20535/S0021347017120020](https://doi.org/10.20535/S0021347017120020).

Поступила в редакцию 25.04.2018

После доработки 14.01.2019

Принята к публикации 24.01.2019