

## **АКУСТИЧЕСКАЯ ЛОКАЛИЗАЦИЯ ДЛЯ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ РОЕВ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В УСЛОВИЯХ ОТСУТСТВИЯ GPS**

Шхагор Мд Шхахханур Ислам<sup>1</sup>, А.И. Заревич<sup>1</sup>, М.А. Заревич<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»

<sup>2</sup>ФГАОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»

**Аннотация.** В статье описывается подсистема акустической локализации децентрализованного роя беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), работающая независимо от спутниковых навигационных систем. Предложенный метод использует разность времени прихода акустического сигнала, оцениваемую с помощью обобщённой взаимной корреляции с фазовым преобразованием. Полученные временные задержки преобразуются в гиперболические ограничения, которые решаются нелинейным методом наименьших квадратов (Trust-Region Reflective) с мягкой L1-потерей. Эксперименты в полётных условиях показывают среднюю ошибку локализации менее 3 метров в двумерной плоскости и устойчивость к ветру до 8 м/с (ошибка <2.2 м). Подсистема интегрирована с механизмом мониторинга задержек между C++ и Python, что позволяет при превышении времени кругового пути >280 мс автоматически переходить на упрощённый алгоритм с тремя ближайшими датчиками. Представленная архитектура доказала свою пригодность для роев, действующих в условиях глушения GPS, задымления или городских «каньонов».

**Ключевые слова:** акустическая локализация, рой дронов, навигация без GPS, нелинейный метод наименьших квадратов, Trust-Region Reflective.

## **ACOUSTIC LOCALIZATION FOR DECENTRALIZED SWARMS OF UNMANNED AERIAL VEHICLES IN THE ABSENCE OF GPS**

Shkhagor Md Shkhakhanur Islam<sup>1</sup>, A.I. Zarevich<sup>1</sup>, M.A. Zarevich<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov

<sup>2</sup>Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

**Abstract.** The article describes a subsystem of acoustic localization of a decentralized swarm of unmanned aerial vehicles (UAVs) operating independently of satellite navigation systems. The proposed method uses the acoustic signal arrival time difference, estimated using generalized phase transformation cross-correlation. The resulting time delays are transformed into hyperbolic constraints, which are solved by the nonlinear least squares (Trust-Region Reflective) method with a soft L1 loss. Experiments in flight conditions show an average localization error of less than 3 meters in a two-dimensional plane and wind resistance of up to 8 m/s (error <2.2 m). The subsystem is integrated with a delay monitoring mechanism between C++ and Python, which allows for automatic switching to a simplified algorithm with three nearby sensors when the roundabout time is >280 ms. The presented architecture has proven its suitability for swarms operating in conditions of GPS jamming, smoke or urban "canyons".

**Keywords:** acoustic localization, drone swarm, navigation without GPS, nonlinear least squares method, Trust-Region Reflective.

## **Введение**

Современные рои беспилотных летательных аппаратов всё чаще применяются в сценариях, где глобальные навигационные спутниковые системы (GNSS) недоступны, заглушены или скомпрометированы спуфингом. В таких условиях традиционная навигация на основе GPS становится ненадёжной, а иногда и полностью невозможной. Поэтому возникает потребность в альтернативных или резервных методах определения местоположения, которые не зависят от внешних радиосигналов. В данном контексте особый интерес представляют акустические методы. Они пассивны (не излучают электромагнитную энергию), устойчивы к радиоэлектронным помехам и могут работать в условиях плохой видимости (туман, дым, ночь). Однако акустическая локализация в рое дронов сталкивается с рядом проблем: шум винтов, ветровые возмущения, многолучевое распространение и ограниченные вычислительные ресурсы на борту.

Цель данной статьи – детально представить и экспериментально обосновать подсистему акустической локализации, разработанную в рамках полностью децентрализованной архитектуры роя. Основное внимание уделяется методу оценки временной задержки, нелинейному слиянию гиперболических ограничений и механизму адаптивного резервирования по задержке.

## **Постановка задачи**

Рассмотрим рой из  $N$  дронов, каждый из которых оснащён массивом из четырёх микрофонов, расположенных в горизонтальной плоскости (координаты датчиков известны). При появлении акустического источника (например, рабо-

тающего двигателя другого дрона или внешнего объекта) система должна вычислить его двумерные координаты  $(x, y)$  в системе координат роя, используя только записи микрофонов.

Формально задача формулируется следующим образом. Пусть  $(p_i = (x_i, y_i))$  – известное положение  $(i)$ -го микрофона (или дрона-приёмника),  $(v_s \approx 343)$  м/с – скорость звука. Для каждой пары датчиков  $((i, j))$  измеряется разность времени прихода сигнала  $(\Delta t_{ij})$ . Тогда справедливо гиперболическое уравнение:

$$|x - p_i| - |x - p_j| = v_s \Delta t_{ij}.$$

Необходимо решить эту переопределённую систему (для 4 датчиков можно составить до 6 независимых уравнений) и оценить координаты источника  $(x = (x, y))$  с минимальной среднеквадратичной ошибкой.

### **Обзор подсистемы акустической локализации**

В предлагаемой архитектуре акустическая локализация является одной из шести основных подсистем и встроена в общий децентрализованный конвейер обработки. В контексте данной статьи мы рассматриваем её изолированно, но следует помнить, что на практике она взаимодействует с летающим реестром (блокчейн-аудитом) и модулем резервирования по задержкам.

Типовой поток обработки одного события локализации:

1. Регистрация акустических сигналов с четырёх микрофонов (частота дискретизации 48 кГц).
2. Вычисление оценок временных задержек  $(\widehat{\tau}_{ij})$  для всех возможных пар микрофонов.
3. Пересчёт временных задержек в разности расстояний по формуле  $d_{ij} = v_s \widehat{\tau}_{ij}$ .
4. Решение нелинейной задачи метода наименьших с применением стратегии мультиинициализации.
5. Расчёт метрики доверия; при превышении порогового значения 0.35 результат передаётся в сеть роя.

### **Экспериментальная проверка метода**

Полевые испытания проводились на открытом полигоне с участием четырёх дронов, оснащённых микрофонными решётками. Источник тестового аку-

стического сигнала (электронная сирена) размещался в точке с заранее известными координатами (18; 11) м. Датчики располагались в вершинах прямоугольника размером 40×35 м. Параметры регистрации: частота дискретизации 48 кГц, длительность записи – 2 секунды на эксперимент.

По результатам 50 независимых измерений средняя евклидова ошибка локализации составила 2.41 м, максимальная – 2.98 м. Ни одно из измерений не превысило порог в 3.0 м.

При добавлении аддитивного гауссова шума с параметром  $\sigma = 0.05$  (нормализованная амплитуда) значение метрики доверия оставалось выше 0.35, что позволяло успешно завершать процедуру локализации. В диапазоне скоростей ветра от 2.5 до 8.0 м/с ошибка не превышала 2.2 м, что свидетельствует о слабой чувствительности алгоритма к аэродинамическим возмущениям.

Для оценки эффективности предложенный подход был сопоставлен с двумя альтернативными методами.

Таблица 1 – Сравнение с другими подходами

| Метод                                                                                                  | Средняя ошибка, м | Время вычисления, мс | Чувствительность к шуму |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|----------------------|-------------------------|
| Базовая взаимная корреляция                                                                            | 5.7               | 12                   | высокая                 |
| Обобщённая взаимная корреляция с фазовым преобразованием + линейная трилатерация (замороженная высота) | 4.1               | 8                    | средняя                 |
| Предлагаемый метод                                                                                     | 2.4               | 45                   | низкая                  |

Несмотря на то что вычислительных затрат чуть больше, точность нашего метода полностью отвечает требованиям большинства приложений в роевой робототехнике. А там самое важное – избегать столкновений и понимать, где ты находишься относительно соседей. Дополнительные ресурсы оправданы тем, что рой может работать автономно, не полагаясь на сигналы GPS.

## Заключение

В статье мы представили готовую подсистему акустической локации для децентрализованного роя дронов – и GPS ей не нужен. Вот ключевые результаты.

Метод обобщённой взаимной корреляции с фазовым преобразованием надёжно оценивает временные задержки даже при шумах и отражениях звука.

Встроенный механизм резервирования по задержке автоматически снижает вычислительную сложность, когда система перегружена. Эксперименты подтвердили, что метод работает даже при ветре до 8 метров в секунду.

В итоге предложенная акустическая подсистема – это практически пригодное решение для навигации роев там, где GPS глушат или его вообще нет. Далее будем расширять на три измерения и оптимизировать для бортовых компьютеров с ограниченными ресурсами.

### Список литературы

1. Floreano D., Husbands P., Nolfi S. Evolutionary robotics // Springer Handbook of Robotics. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2008. – Pp. 1423-1451.
2. Van den Berg J., Lin M., Manocha D. Reciprocal velocity obstacles for real-time multi-agent navigation // 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 2008. – Pp. 1928-1935.
3. Заревич А. И., Макаренко Ф. В., Ягодкин А. С., Зольников К. В. Моделирование поведения мобильных роботов с использованием генетических алгоритмов // Моделирование систем и процессов. – 2022. – Т. 15, № 3. – С. 7-16.
4. Karaman S., Frazzoli E. Sampling-based algorithms for optimal motion planning // The International Journal of Robotics Research. – 2011. – Vol. 30, № 7. – Pp. 846-894.
5. Santos F. M., Silva M. G., Moreira A. P. Hybrid RRT\*-RVO for multi-robot navigation in dynamic environments // ROBOTICA. – 2019. – Vol. 37, № 9. – Pp. 1571-1587.
6. Моделирование ослабления ионизирующего излучения за счет защитного корпуса микросхем / А. В. Полуэктов, Р. Ю. Медведев, А. И. Заревич // Моделирование систем и процессов. – 2024. – Т. 17, № 2. – С. 93–100. – DOI 10.12737/2219-0767-2024-17-2-93-100. – EDN QQRQXE.
7. Регрессионный анализ оценки загрузки платного отделения стоматологической поликлиники / Т. П. Новикова, А. А. Бодин, А. И. Заревич // Научно-технический вестник Поволжья. – 2023. – № 3. – С. 77–80.
8. Применение элементов отрицательной логики при построении энергоэффективного комбинационного устройства / Ф. В. Макаренко, А. С. Ягодкин, О. А. Денисова [и др.] // Моделирование систем и процессов. – 2023. – Т. 16, № 1. – С. 56–66. – DOI 10.12737/2219-0767-2023-16-1-56-66.

9. Технология разработки RTL-модели описания изделия при разработке программно-аналитического комплекса САПР / Д. В. Шеховцов, А. М. Плотников, К. В. Зольников, А. И. Заревич // Моделирование систем и процессов. – 2023. – Т. 16, № 3. – С. 79–86.
10. Генетические алгоритмы в моделировании поведения робота / А. С. Логвиненко, Л. Ю. Смилянский, А. И. Заревич, Ф. В. Макаренко // Новые аспекты моделирования систем и процессов : материалы Междунар. науч.-практ. конф. / отв. ред. В. К. Зольников, А. И. Заревич. – Воронеж, 2023. – С. 94–103.
11. Компьютерное моделирование работы транзисторов и полупроводниковых приборов на его основе / А. В. Полуэктов, Ф. В. Макаренко, Р. Ю. Медведев // Моделирование систем и процессов. – 2023. – Т. 16, № 1. – С. 77–84. – DOI 10.12737/2219-0767-2023-16-1-77-84. – EDN LOLZMT.
12. Моделирование работы диода и оценка параметров его работы / А. В. Полуэктов, Р. Ю. Медведев, В. К. Зольников // Моделирование систем и процессов. – 2023. – Т. 16, № 1. – С. 85–93. – DOI 10.12737/2219-0767-2023-16-1-85-93. – EDN RALIJG.
13. Интеграция программного продукта Calibre в среду Cadence Virtuoso и повышение интеллектуальных свойств САПР проектировании микросхем / А. В. Полуэктов, Д. В. Шеховцов, И. В. Скоркин, П. А. Чубунов // Моделирование систем и процессов. – 2023. – Т. 16, № 4. – С. 71–80. – DOI 10.12737/2219-0767-2023-16-4-71-80. – EDN PBUJZO.
14. Использование сторонних библиотек при написании программ для обработки статистических данных / А. В. Полуэктов, Ф. В. Макаренко, А. С. Ягодкин // Моделирование систем и процессов. – 2022. – Т. 15, № 2. – С. 33–41. – DOI 10.12737/2219-0767-2022-15-2-33-41. – EDN HHYURU.
15. Экспериментальные исследования радиационного воздействия на микросхемы FRAM / В. К. Зольников, Н. Г. Гамзатов, В. И. Анциферова [и др.] // Моделирование систем и процессов. – 2022. – Т. 15, № 3. – С. 16–24. – DOI 10.12737/2219-0767-2022-15-3-16-24. – EDN UOCKEW.
16. Моделирование колебательных процессов в пакете MVSTUDIUM / А. В. Полуэктов, К. В. Зольников, В. И. Анциферова // Моделирование систем и процессов. – 2021. – Т. 14, № 4. – С. 139–148. – DOI 10.12737/2219-0767-2021-14-4-139-148. – EDN PPOUDI.

17. Аппаратно-программный комплекс для автоматизированных испытаний сильноточных преобразователей / А. И. Заревич, С. В. Муравьев, Е. В. Бедарева [и др.] // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322, № 4. – С. 180–184.

### References

1. Floreano D., Husbands P., Nolfi S. Evolutionary robotics // Springer Handbook of Robotics. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2008. – Pp. 1423-1451.

2. Van den Berg J., Lin M., Manocha D. Reciprocal velocity obstacles for real-time multi-agent navigation // 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 2008. – Pp. 1928-1935.

3. Zarevich A. I., Makarenko F. V., Yagodkin A. S., Zolnikov K. V. Modeling the behavior of mobile robots using genetic algorithms // Modeling systems and processes. – 2022. – Vol. 15, No. 3. – Pp. 7-16.

4. Karaman S., Frazzoli E. Sampling-based algorithms for optimal motion planning // The International Journal of Robotics Research. – 2011. – Vol. 30, № 7. – Pp. 846-894.

5. Santos F. M., Silva M. G., Moreira A. P. Hybrid RRT\*-RVO for multi-robot navigation in dynamic environments // ROBOTICA. – 2019. – Vol. 37, № 9. – Pp. 1571-1587.

6. Modeling of attenuation of ionizing radiation due to the protective housing of microcircuits / A.V. Poluektov, R. Y. Medvedev, A. I. Zarehiv // Modeling of systems and processes. – 2024. – Vol. 17, No. 2. – Pp. 93-100. – DOI 10.12737/2219-0767-2024-17-2-93-100. – EDN QQRQXE.

7. Regression analysis of the assessment of the workload of the paid department of the stomatological polyclinic / T. P. Novikova, A. A. Bodin, A. I. Zarevich // Scientific and Technical Bulletin of the Volga region. - 2023. – No. 3. – Pp. 77-80.

8. Application of negative logic elements in the construction of an energy-efficient combination device / F. V. Makarenko, A. S. Yagodkin, O. A. Denisova [et al.] // Modeling of systems and processes. – 2023. – Vol. 16, No. 1. – Pp. 56-66. – DOI 10.12737/2219-0767-2023-16-1-56-66.

9. Technology for the development of an RTL model of a product description in the development of a CAD software and analytical complex / D. V. Shekhovtsov, A.M. Plotnikov, K. V. Zolnikov, A. I. Zarevich // Modeling systems and software- the process. - 2023. – Vol. 16, No. 3. – Pp. 79-86.

10. Genetic algorithms in modeling robot behavior / A. S. Logvinenko, L. Y. Smilyansky, A. I. Zarevich, F. V. Makarenko // New aspects of modeling systems and processes : materials of the International Scientific and Practical Conference / ed. by V. K. Zolnikov, A. I. Zarevich. – Voronezh, 2023. – Pp. 94-103.
11. Computer simulation of transistors and semi-conductor devices based on it / A.V. Poluektov, F. V. Makarenko, R. Y. Medvedev // Modeling of systems and processes. – 2023. – Vol. 16, No. 1. – Pp. 77-84. – DOI 10.12737/2219-0767-2023-16-1-77-84. – EDN LOLZMT.
12. Simulation of diode operation and evaluation of its operation parameters / A.V. Poluektov, R. Y. Medvedev, V. K. Zolnikov // Modeling of systems and processes. – 2023. – Vol. 16, No. 1. – Pp. 85-93. – DOI 10.12737/2219-0767-2023-16-1-85-93. – EDN RALIJG.
13. Integration of the Calibre software product into the Cadence Virtu-oso environment and improvement of the intellectual properties of CAD in the design of microcircuits / A.V. Poluektov, D. V. Shekhovtsov, I. V. Skorkin, P. A. Chubunov // Modeling of systems and processes. – 2023. – Vol. 16, No. 4. – Pp. 71-80. – DOI 10.12737/2219-0767-2023-16-4-71-80. – EDN PBUJZO.
14. The use of third-party libraries when writing programs for processing statistical data / A.V. Poluektov, F. V. Makarenko, A. S. Yagodkin // Modeling of systems and processes. – 2022. – Vol. 15, No. 2. – Pp. 33-41. – DOI 10.12737/2219-0767-2022-15-2-33-41. – EDN HHYURU.
15. Experimental studies of radiation effects on FRAM microcircuits / V. K. Zolnikov, N. G. Gamzatov, V. I. Antsiferova [et al.] // Modeling of systems and processes. – 2022. – Vol. 15, No. 3. – Pp. 16-24. – DOI 10.12737/2219-0767-2022-15-3-16-24. – EDN UOCKEW.
16. Modeling of oscillatory processes in the MVSTUDIUM package / A.V. Poluektov, K. V. Zolnikov, V. I. Antsiferova // Modeling of systems and processes. – 2021. – Vol. 14, No. 4. – Pp. 139-148. – DOI 10.12737/2219-0767-2021-14-4-139-148. – EDN PPOUDI.
17. Hardware and software complex for automated tests of high-current converters / A. I. Zarevich, S. V. Muravyev, E. V. Bedareva [et al.] // Proceedings of Tomsk Polytechnic University. - 2013. – Vol. 322, No. 4. – Pp. 180-184.