

Научная статья

УДК 004.942

DOI: <https://doi.org/10.18127/j20700970-202503-08>

Мультиагентный поиск источника радиации группой беспилотных летательных аппаратов

Г.В. Моисеев¹, А.Н. Алуюнов², В.В. Иванов³

^{1–3} Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации (Москва, Россия)

¹ grg.moiseev@gmail.com

Аннотация

Постановка проблемы. Из-за малой дальности действия ГМ-детектора единичного беспилотного летательного аппарата (БПЛА) эффективность поиска источника радиации на больших площадях ограничена. Чтобы решить эту проблему, предлагается использовать существующие математические модели для группы БПЛА. Групповое применение БПЛА позволяет обмениваться результатами измерений, что повышает эффективность поиска и точность оценки источника радиации. Дополнительно предлагается использовать алгоритм слияния частиц, который поможет сократить количество расчетов при групповом поиске источника радиации.

Цель. Предложить алгоритм совместного поиска неизвестного источника радиации с помощью объединения информации с группы БПЛА и стратегии свободной энергии с адаптивным размером шага.

Результаты. На основе информации от нескольких БПЛА проведено слияние частиц в соответствии с заданными условиями для получения точных параметров местоположения источника радиации. Предположен пошаговый обмен информацией между БПЛА для решения задачи поиска неизвестного источника радиации с помощью стратегии свободной энергии с адаптивным размером шага.

Практическая значимость. Результаты предварительных численных экспериментов показывают, что коэффициент успешности поиска по предложенному алгоритму превышает 90%.

Ключевые слова

Групповое применение БПЛА, источник радиации, синтез частиц, адаптивный размер шага

Для цитирования

Моисеев Г.В., Алуюнов А.Н., Иванов В.В. Мультиагентный поиск источника радиации группой беспилотных летательных аппаратов // Нелинейный мир. 2025. Т. 23. № 3. С. 66–72. DOI: <https://doi.org/10.18127/j20700970-202503-08>

A brief version in English is given at the end of the article

Введение

Быстрый поиск источника радиации может уменьшить вред, наносимый человеку и окружающей среде. Поиск источника радиации в среде, приближенной к реальности, построение сценариев препятствий и рассмотрение ситуации ограниченной связи – сложные актуальные математические задачи. Несомненно, что для их практической реализации могут использоваться группа беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Следовательно, требуется разработка алгоритма оценки параметров от группы распределенных БПЛА для обработки значений обнаружения и последующей локализации местоположения источника радиации.

В [1], на примере роботов, используется стратегия распределения свободной энергии с переменной длиной шага, которая направляет каждого робота к следующей позиции для продолжения обнаружения. Процесс выполняется итеративно до тех пор, пока не будет выполнена задача поиска источника радиации. Совместное использование информации о соседних устройствах в пределах диапазона связи увеличивает разнообразие частиц в алгоритме локального фильтра частиц, повышает точность оценки, а также обеспечивает согласованность оценки параметров источника и результатов поиска источника [3–6].

Авторы [2] предлагают два роботизированных расширения оптимизации роя частиц и дарвиновской оптимизации роя частиц, чтобы адаптировать данные методы к области мультироботных систем. В [7–10] предложены алгоритмы для групп имитируемых роботов, выполняющих распределенную исследовательскую задачу.

Из-за малой дальности действия ГМ-детектора единичного БПЛА эффективность поиска источника радиации на больших площадях ограничена [1]. Чтобы решить эту проблему, предлагается использовать математические модели для группы роботов. Групповое применение БПЛА позволяет обмениваться результатами измерений, что повышает эффективность поиска и точность оценки источника радиации. Дополнительно предлагается использовать алгоритм слияния частиц, который поможет сократить количество расчетов при групповом поиске источника радиации [11–14].

Ц е л ь р а б о т ы – предложить алгоритм совместного поиска неизвестного источника радиации с помощью объединения информации с группы БПЛА и стратегии свободной энергии с адаптивным размером шага.

Алгоритм поиска источника радиации с использованием группы БПЛА

В рамках системы фильтрации частиц основная идея предлагаемого алгоритма объединения информации заключается в следующем: вес частиц БПЛА может быть определен по данным наблюдений других БПЛА, т.е. путем объединения измерительной информации. Все частицы i -го БПЛА расположены в порядке возрастания и убывания в соответствии с весом $^i w_k$. Чтобы получить отсортированный набор частиц $^i \tilde{\mathcal{A}}_k$, $^i \tilde{\mathcal{A}}_k$, необходимо заменить частицы i -го БПЛА с низкой вероятностью на частицы других БПЛА с высокой вероятностью. Алгоритм продолжается до тех пор, пока не будет завершено полное слияние частиц.

Конкретные операции заключаются в следующем. Распределение предшествующей вероятности переноса выбирается как $Q(^i \mathcal{A}_k | ^i \mathcal{A}_{1:k-1}, z_{1:k}) = P(^i \mathcal{A}_k | ^i \mathcal{A}_{k-1})$, а масса частиц $^i w_k$ i -го БПЛА может быть вычислена по данным наблюдений других m БПЛА:

$$^i w_k^j = P(z_k^j | ^i \mathcal{A}_k^j) ^i w_{k-1}^j \prod_{m=1, i \neq m}^N P(z_k^m | ^i \mathcal{A}_k^j).$$

Однако, учитывая, что другие БПЛА обмениваются неверной информацией в процессе вычисления массы частиц $^i w_k$, появление неверной информации повлияет на принятие другими БПЛА решения о поиске источника радиации. Чтобы решить эту проблему, в алгоритм введена функция проверки измерительной информации, где параметр β_{mi} используется для измерения разницы в распределении частиц [15]. Чем больше разница в распределении частиц у БПЛА m и БПЛА i , тем меньше β_{mi} . Параметр β_{mi} может быть аппроксимирован расхождением KL между различными распределениями частиц БПЛА на основе гауссовского распределения с двумя переменными $\mathcal{N}(\mu_k^i, \Sigma_k^i)$ как предлагали OLE_LINK31[16]. Гауссовское распределение с двумя переменными является подходящим результатом распределения частиц БПЛА m и БПЛА i . При этом

$$\mu_k^i = (\mu_{k,x}^i, \mu_{k,y}^i)^T; \quad \Sigma_k^i = \begin{bmatrix} (\sigma_{k,x})^2 & \rho \sigma_{k,x} \sigma_{k,y} \\ \rho \sigma_{k,x} \sigma_{k,y} & (\sigma_{k,y})^2 \end{bmatrix}.$$

Когнитивные различия β_{mi} определяются следующим образом:

$$\beta_{mi} = \exp \left[D_{KL} \left(^i P_k \parallel ^m P_k \right) \right].$$

Расхождение KL между гауссовскими распределениями с двумя переменными вычисляется так:

$$D_{KL} \left(^i P_k \parallel ^m P_k \right) \approx \frac{1}{2} \left\{ \log \frac{|\Sigma_k^i|}{|\Sigma_k^m|} - 2 + \text{tr} \left(\frac{\Sigma_k^m}{\Sigma_k^i} \right) + \frac{(\mu_k^i - \mu_k^m)^T \cdot (\mu_k^i - \mu_k^m)}{\Sigma_k^i} \right\}.$$

Следовательно, после проверки могут быть получены веса измеренных частиц информационного синтеза:

$${}^i w_k^{*j} = P(z_k^i | {}^i \mathcal{A}_k^j) {}^i w_{k-1}^{*j} \prod_{m=1, i \neq m}^N [P(z_k^m | {}^i \mathcal{A}_k^j)]^{\beta_{mi}}.$$

Частицы с малой массой вносят незначительный вклад в алгоритм, что приводит к неточной оценке параметров источника радиации. Поэтому, чтобы уменьшить влияние частиц малого веса на оценку параметров источника радиации при одновременном увеличении разнообразия частиц каждого БПЛА, предлагается взаимодействовать только с частицами высокой вероятности каждого БПЛА. Все частицы i -го БПЛА располагаются в порядке возрастания и убывания в соответствии с весом ${}^i w_k^*$, получая отсортированный набор частиц ${}^i \tilde{\mathcal{A}}_k$, ${}^i \bar{\mathcal{A}}_k$. Слияние набора частиц ${}^i \tilde{\mathcal{A}}_k$, ${}^{i+1} \bar{\mathcal{A}}_k$ выполняется БПЛА в соответствии с заданным количеством h слитых частиц. h частиц $(i+1)$ -го БПЛА с наибольшей вероятностью используются для замены аналогичного количества частиц i -го БПЛА с меньшей вероятностью. После того, как все БПЛА завершат объединение информации о частицах, будет получен новый набор частиц ${}^i \mathcal{A}_k^*$.

Для наибольшей наглядности представим этапы слияния частиц в виде алгоритма, представленного на рис. 1.

Алгоритм 1. Слияние частиц
Input: частицы $({}^i \mathcal{A}_k, {}^i w_k^*)_{i=1:N}$, число слияния h Output: $({}^i \mathcal{A}_k^*, {}^i w_k^*)_{i=1:N}$ 1: if $i \leq N$ then 2: $({}^i \tilde{\mathcal{A}}_k, {}^i \tilde{w}_k^*) \leftarrow \text{sort}({}^i \mathcal{A}_k, {}^i w_k^*, \text{убыван.})$ Частицы расположены в порядке убывания их веса 3: $({}^i \bar{\mathcal{A}}_k, {}^i \bar{w}_k^*) \leftarrow \text{sort}({}^i \mathcal{A}_k, {}^i w_k^*, \text{возраст.})$ Частицы расположены в порядке возрастания их веса 4: end if 5: for $i=1, \dots, N$ do 6: for $j=1, \dots, h$ do 7: if $i < N$ then 8: ${}^i \bar{\mathcal{A}}_k^j \leftarrow {}^{i+1} \bar{\mathcal{A}}_k^j$ Заменяем частицы с низкой вероятностью на частицы с высокой вероятностью. 9: else 10: ${}^i \bar{\mathcal{A}}_k^j \leftarrow {}^i \tilde{\mathcal{A}}_k^j$ Все БПЛА выполняют слияние частиц в заданном порядке 11: end if 12: end for 13: end for 14: $({}^i \mathcal{A}_k^*, {}^i w_k^*)_{i=1:N} \leftarrow ({}^i \bar{\mathcal{A}}_k^j, {}^i \bar{w}_k^*)_{i=1:N}$

Рис. 1. Алгоритм слияния частиц

Fig. 1. Particle fusion algorithm

После того, как несколько БПЛА выполняют объединение измерительной информации и информации о частицах в момент времени k , параметр $\mathcal{A}$ источника радиации может быть оценен на основе информации о частицах ${}^i \mathcal{A}_k^*$ и весах частиц ${}^i w_k^*$. Однако для того, чтобы получить точную оценку источника радиации, расположенного в свободном пространстве, необходимо выполнить многократные измерения в разных точках. Поиск источников радиации с помощью группы БПЛА является пошаговым непрерывным процессом.

Стратегия поиска источников радиации с использованием группы БПЛА

Процесс поиска источника радиации каждым БПЛА можно рассматривать как частично наблюдаемый марковский процесс принятия решений (ЧНМПР) [17]. БПЛА i получает дозу излучения в момент времени k в соответствии с датчиком ГМ, и несколько БПЛА могут оценить параметры источника радиации в момент времени k с помощью алгоритма фильтрации частиц. Затем, в соответствии с оцененными параметрами и информацией о распределении частиц, рассчитывается

функция вознаграждения за соответствующие альтернативные действия каждого БПЛА для получения значения вознаграждения за действие. Каждый БПЛА выбирает следующее действие, основываясь на величине вознаграждения в своем собственном наборе действий. Этот цикл продолжается до тех пор, пока не будет найден источник радиации.

В данной работе предлагается использовать стратегию распределенного поиска источников радиации группой БПЛА с адаптивным размером шага, основанную на стратегии свободной энергии [18]. Стратегия свободной энергии разделена на три этапа:

- 1) разведка;
- 2) разведочно-эксплуатационная деятельность;
- 3) эксплуатация.

На ранней стадии поиска функция вознаграждения носит исследовательский характер и описывается с помощью информационной энтропии. На среднем этапе функция вознаграждения преобразуется в функцию поиска и эксплуатации, которая совместно определяется информационной энтропией и расстоянием до предполагаемого источника радиации. На финальном этапе, когда параметры источника радиации были точно оценены, БПЛА использует оценочную информацию для принятия мер по достижению предполагаемого местоположения как можно быстрее, т. е. для получения наибольшего вознаграждения.

Функции вознаграждения за каждое альтернативное действие i -го БПЛА, определенные стратегией свободной энергии, формулируются следующим образом:

$$R(a_k) = -i r_k^{a_k} - \sum_{j=1}^n i w_k^{*j} i r_k^{*j} + \sum_{j=1}^n i w_k^{*j, a_k} \log i w_k^{*j, a_k} \cdot \text{tr}(\Sigma_k^i)^{0,1},$$

где $i r_k^{a_k}$ – позиция, достигнутая i -м БПЛА из текущей позиции при выполнении действия a_k в момент времени k ; $i r_k^{*j}$ – двумерный вектор, состоящий из двух элементов $i \mathcal{A}_k^{*j}$, в форме

$(i X_k^{*j}, i Y_k^{*j})^T$; $\sum_{j=1}^n i w_k^{*j} i r_k^{*j}$ – положение источника радиации, оцененное i -м БПЛА в момент времени k с использованием алгоритма фильтрации частиц, основанного на объединении измерений;

$\sum_{j=1}^n i w_k^{*j, a_k} \log i w_k^{*j, a_k}$ – информационная энтропия Шеннона, полученная i -м БПЛА после выполнения действия a_k ; $\text{tr}(\Sigma_k^i)^{0,1}$ представляет собой след ковариационной матрицы в гауссовском

аппроксимирующем распределении частиц, который уменьшается, когда частицы начинают концентрироваться. Показатель степени 0,1 был установлен для ускорения перехода алгоритма от разведки к использованию.

В стратегии свободной энергии в момент времени k размер шага S каждого действия a_k в наборе действий A фиксирован, $A = \{a_k(S) | S = \text{Const}\}$, что ограничивает эффективность поиска групповой роботизированной системы. При разработке стратегии действий в рамках поисковой стратегии необходимо учитывать адаптивность окружающей среды. Например, в [19] предложен набор действий, которые изменяются в зависимости от линейной и угловой скорости БПЛА при поиске источника радиации: $\{(v, \Delta\theta), (-v, \Delta\theta), (v, -\Delta\theta), (-v, -\Delta\theta), (v, 0), (-v, 0), (0, \Delta\theta), (0, -\Delta\theta)\}$.

Предлагается использовать адаптивный размер шага $a_k(S^*, \Delta\theta)$, где S^* связано с расчетным расстоянием от текущего положения до источника и дисперсией распределения частиц. В момент времени k , когда i -й БПЛА находится далеко от расчетного местоположения источника радиации, используется больший размер адаптивного шага S^* для получения дополнительной информации об источнике радиации, т. е. информации об измерении мощности дозы в различных пространственных положениях. Однако расчетные параметры являются неточными, поскольку БПЛА находится слишком далеко от источника излучения. Таким образом, чтобы БПЛА не двигался

слишком сильно в неправильном направлении, для ограничения размера шага добавлена функция экспоненциальной дисперсии распределения частиц. Поскольку частицы не сходятся при движении в неправильном направлении, функция отрицательной экспоненциальной дисперсии принимает достаточно малое значение и размер шага невелик. Адаптивная функция размера шага определяется следующим образом:

$$S^* = {}^i r_k^c - \sum_{j=1}^n {}^i w_k^{*j} {}^i r_k^{*j} \cdot e^{-({}^i \sigma_{k,x}^2 + {}^i \sigma_{k,y}^2)^\alpha},$$

где ${}^i r_k^c$ – положение i -го БПЛА в момент времени k ; α – показатель суммы дисперсий двух переменных в гауссовском аппроксимирующем распределении частицы, представляющий скорость снижения.

Основные этапы алгоритма поиска распределенного источника радиации с адаптивным размером шага на автономном БПЛА приведены на рис. 2.

Алгоритм 2. Совместный поиск источника радиации i -го БПЛА
Input: исходное положение БПЛА и источника $({}^i r_0^c, \mathcal{A})_{i=1:N}$, исходные частицы $({}^i \mathcal{A}_0, {}^i w_0^*)_{i=1:N}$ 1: for $k = 1, \dots, k_{\text{const}}$ or $\ {}^i r_k^{\text{current}} - \sum_{j=1}^n {}^i w_k^{*j} \cdot {}^i r_k^{*j} \ \leq r_{\text{const}}$ do 2: $z_k^i \leftarrow$ БПЛА i считывает результаты измерений в момент k 3: $P(z_k^i {}^i \mathcal{A}_k^j) \leftarrow$ Вычисление функции правдоподобия измерения i-го БПЛА 4: for $m = 1, \dots, N$ and $m \neq i$ do 5: $z_k^m \leftarrow$ БПЛА m участвует в измерении в момент k 6: $P(z_k^m {}^i \mathcal{A}_k^j) \leftarrow$ Вычислите функцию правдоподобия измерений БПЛА m с помощью ${}^i \mathcal{A}_k^j$ 7: $\beta_{mi} \leftarrow$ Вычисление когнитивных различий 8: end for 9: ${}^i w_k^{*j} \leftarrow$ Вычисление веса всех частиц ${}^i \mathcal{A}_k^j$ с помощью уравнения 10: $S^* \leftarrow$ Вычисление размера адаптивного шага 11: $R(a_k(S^*)) \leftarrow$ Вычисление функцию вознаграждения с адаптивным размером шага 12: ${}^i r_k^{c+1} \leftarrow ({}^i r_k^c, \arg\max_{a_k \in A} R(a_k(S^*)))$ БПЛА i выполняет задание с наибольшим вознаграждением 13: $({}^i \mathcal{A}_k^*, {}^i w_k^*) \leftarrow$ Выполнение слияния частиц $(({}^i \mathcal{A}_k^j, {}^i w_k^{*j}), ({}^{i+1} \mathcal{A}_k^j, {}^{i+1} w_k^{*j}))$ см. Алгоритм 1. 14: ${}^i r_k^c \leftarrow {}^i r_k^{c+1}$ Точное местоположение i-го БПЛА 15: $({}^i \mathcal{A}_{k+1}^*, {}^i w_{k+1}^*) \leftarrow ({}^i \mathcal{A}_k^*, {}^i w_k^*)$ Обновление частиц i-го БПЛА 16: end for

Рис. 2. Алгоритм поиска источника радиации группой БПЛА

Fig. 2. UAV group radiation source search algorithm

Представленный на рис. 2 алгоритм реализует распределенное оценивание состояния и принятие решений в группе БПЛА, сочетая фильтр частиц и адаптивное управление на основе вознаграждения. Алгоритм подходит для других задач, где важна коллективная работа и учет неопределенности. Достоинством разработанного алгоритма является адаптивность, поскольку размер шага и вознаграждение позволяют гибко реагировать на изменения. Учет данных от других БПЛА улучшает оценку состояния, а фильтр частиц устойчив к шумам измерений, что является преимуществом робастности.

Большое число частиц и БПЛА увеличивает нагрузку, что требует достаточных вычислительных ресурсов. Кроме того, для некоторых параметров нужна тонкая настройка. Очевидно и то, что требуется развитие предложенного алгоритма, предусматривающее потерю связи БПЛА, при которой кооперация нарушается.

Заключение

На основе информации от нескольких БПЛА проводится слияние частиц в соответствии с заданными условиями для получения точных параметров местоположения источника радиации. Предположен пошаговый обмен информацией между БПЛА для решения задачи поиска неизвестного источника радиации с помощью стратегии свободной энергии с адаптивным размером шага. Результаты предварительных численных экспериментов показывают, что коэффициент успешности поиска по предложенному алгоритму превышает 90%.

Список источников

1. *Huo Jianwen, Ling Mingrun, Luo Minghua, Hu Li.* Distributed: Missing Radiation Source Search Method Based On Consensus Parameter Estimation And Free Energy Strategy. The Proceedings of the International Conference on Nuclear Engineering (ICONE). 2023.30. 1385. 10.1299/jsmecone.2023.30.1385.
2. *Couceiro Micael, Rocha Rui, Ferreira N.* A novel multi-robot exploration approach based on Particle Swarm Optimization algorithms. 9th IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics. 2011. SSR. 327–332. 10.1109/SSRR.2011.6106751.
3. *Li B., Zhu Y., Wang Z., Li C., Peng Z., Ge L.* Use of Multi-Rotor Unmanned Aerial Vehicles for Radioactive Source Search, Remote Sensing. 2018. V. 10 (5). P. 728.
4. *Bos A., Rosenfeld A., Kron T., Errico F., Moscovitch M.* Fundamentals of Radiation Dosimetry. Concepts & Trends in Medical Radiation Dosimetry. American Institute of Physics. 2011. P. 5–23.
5. *Cho H.S., Woo T.H.* Mechanical analysis of flying robot for nuclear safety and security control by radiological monitoring. Ann. Nucl. Energy. 2016. V. 94. P. 138–143.
6. *Durrieu J.L., Thiran J.P., Kelly F.* Lower and upper bounds for approximation of the Kullback-Leibler divergence between Gaussian Mixture Models. 2012 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). IEEE. 2012.
7. *Rao N.S.V., Shankar M., Chin J.C.* et al. Identification of low-level point radiation sources using a sensor network. In: 2008 International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN 2008). 2008 Apr 22–24. St. Louis, USA. IEEE. 2008. P. 493–504.
8. *Gunatilaka A., Ristic B., Gailis R.* On localisation of a radiological point source. In: 2007 Information. Decision and Control. 2007 Feb 12–14. Adelaide, Australia. IEEE. 2007. P. 236–41.
9. *Nemzek R.J., Dreicer J.S., Torney D.C., Warnock T.T.* Distributed sensor networks for detection of mobile radioactive sources. IEEE Trans Nucl Sci 2004. V. 51. P. 1693–700.
10. *Brewer E.T.* Autonomous localization of 1/R² sources using an aerial platform. Virginia Tech; 2009. Available from: <https://vtechworks.lib.vt.edu/handle/10919/36378>. [Last accessed on 18 Dec 2023].
11. *Morelande M.R., Ristic B.* Radiological source detection and localisation using Bayesian techniques. IEEE Trans Signal Process. 2009. V. 57. P. 4220–31.
12. *Jarman K.D., Miller E.A., Wittman R.S., Gesh C.J.* Bayesian radiation source localization. Nucl Technol 2011. V. 175. P. 326–34.
13. *Huo J., Liu M., Neusypin K.A., Liu H., Guo M., Xiao Y.* Autonomous search of radioactive sources through mobile robots. Sensors. 2020. V. 20. P. 3461.
14. *Ling M., Huo J., Moiseev G.V., Hu L., Xiao Y.F.* Multi-robot collaborative radioactive source search based on particle fusion and adaptive step size. Ann Nucl Energy. 2022. V. 173. P. 10910.
15. *Song C., He Y., Ristic B., Lei X.* Collaborative infotaxis: Searching for a signal-emitting source based on particle filter and Gaussian fitting. Robotics and Autonomous Systems. V. 125. P. 103414. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2019.103414>
16. *Durrieu J.L., Thiran J.P., Kelly F.* Lower and upper bounds for approximation of the Kullback-Leibler divergence between Gaussian Mixture Models. 2012 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). IEEE. 2012.
17. *Rahbar F., Marjovi A., Martinoli A.* Design and Performance Evaluation of an Algorithm Based on Source Term Estimation for Odor Source Localization. Sensors. 2019. V. 19 (3). P. 656. <https://doi.org/10.3390/s19030656>.
18. *Masson J.B.* Olfactory searches with limited space perception. Proc natl acad sci u s a. 2013. V. 110(28). P. 11261–11266.
19. *Huo J., Liu M., Neusypin K.A., Liu H., Guo M., Xiao Y.* Autonomous Search of Radioactive Sources through Mobile Robots. Sensors. 2020. V. 20 (12). P. 3461.

Информация об авторах

Георгий Викторович Моисеев – к.т.н., доцент

SPIN-код: не представлен

Александр Николаевич Алёнов – к.т.н., доцент

SPIN-код: 7482-8234

Вадим Витальевич Иванов – студент

SPIN-код: не представлен

Статья поступила в редакцию 10.06.2025

Одобрена после рецензирования 19.06.2025

Принята к публикации 30.06.2025

Original article

Radiation source multi-agent search by drones

G.V. Moiseev¹, A.N. Alyunov², V.V. Ivanov³^{1–3} Financial University under the Government of the Russian Federation (Moscow, Russia)¹ grg.moiseev@gmail.com**Abstract**

Due to the short range of the GM detector of a single unmanned aerial vehicle, the effectiveness of searching for a radiation source over large areas is limited. To solve this problem, it is proposed to use existing mathematical models for a group of robots. The group use of UAVs allows the exchange of measurement results, which increases the efficiency of the search and the accuracy of the assessment of the radiation source. Additionally, it is proposed to use a particle fusion algorithm, which will help reduce the number of calculations when searching for a radiation source in a group.

Target – this article proposes an algorithm for jointly searching for an unknown radiation source by combining information from a group of UAVs and a free energy strategy with an adaptive step size.

Based on information from several UAVs, particle fusion is carried out in accordance with the specified conditions to obtain accurate parameters of the location of the radiation source. It assumes a step-by-step exchange of information between robots to solve the problem of searching for an unknown source of radiation using a free energy strategy with an adaptive step size.

The results of preliminary numerical experiments show that the success rate of the search using the proposed algorithm can reach 95%.

Keywords

Multi-robot, Radioactive source, Particle fusion, Adaptive step size, Collaborative search

For citation

Moiseev G.V., Alyunov A. N., Ivanov V. V. Radiation source multi-agent search by drones. Nonlinear World. 2025. V. 23. № 3. P. 66–72. DOI: <https://doi.org/10.18127/j20700970-202503-08> (In Russian)

REFERENCES

- Huo Jianwen, Ling Mingrun, Luo Minghua, Hu Li. Distributed: Missing Radiation Source Search Method Based On Consensus Parameter Estimation And Free Energy Strategy. The Proceedings of the International Conference on Nuclear Engineering (ICONE). 2023.30. 1385. 10.1299/jsmeicone.2023.30.1385.
- Couceiro Micael, Rocha Rui, Ferreira N. A novel multi-robot exploration approach based on Particle Swarm Optimization algorithms. 9th IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics. 2011. SSR 2011. 327 – 332. 10.1109/SSRR.2011.6106751.
- Li B., Zhu Y., Wang Z., Li C., Peng Z., Ge L. Use of Multi-Rotor Unmanned Aerial Vehicles for Radioactive Source Search, Remote Sensing. 2018. V. 10 (5). P. 728.
- Bos A., Rosenfeld A., Kron T., Errico F., Moscovitch M. Fundamentals of Radiation Dosimetry. Concepts & Trends in Medical Radiation Dosimetry. American Institute of Physics. 2011. P. 5–23.
- Cho H.S., Woo T.H. Mechanical analysis of flying robot for nuclear safety and security control by radiological monitoring. Ann. Nucl. Energy. 2016. V. 94. P. 138–143.
- Durrieu J.L., Thiran J.P., Kelly F. Lower and upper bounds for approximation of the Kullback-Leibler divergence between Gaussian Mixture Models. 2012 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). IEEE. 2012.
- Rao N.S.V., Shankar M., Chin J.C. et al. Identification of low-level point radiation sources using a sensor network. In: 2008 International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN 2008). 2008 Apr 22–24. St. Louis, USA. IEEE. 2008. P. 493–504.
- Gunatilaka A., Ristic B., Gailis R. On localisation of a radiological point source. In: 2007 Information. Decision and Control. 2007 Feb 12–14. Adelaide, Australia. IEEE. 2007. P. 236–41.
- Nemzek R.J., Dreicer J.S., Torney D.C., Warnock T.T. Distributed sensor networks for detection of mobile radioactive sources. IEEE Trans Nucl Sci 2004. V. 51. P. 1693–700.
- Brewer E.T. Autonomous localization of 1/R2 sources using an aerial platform. Virginia Tech; 2009. Available from: <https://vtechworks.lib.vt.edu/handle/10919/36378>. [Last accessed on 18 Dec 2023].
- Morelande M.R., Ristic B. Radiological source detection and localisation using Bayesian techniques. IEEE Trans Signal Process. 2009. V. 57. P. 4220–31.
- Jarman K.D., Miller E.A., Wittman R.S., Gesh C.J. Bayesian radiation source localization. Nucl Technol 2011. V. 175. P. 326–34.
- Huo J., Liu M., Neusypin K.A., Liu H., Guo M., Xiao Y. Autonomous search of radioactive sources through mobile robots. Sensors. 2020. V. 20. P. 3461.
- Ling M., Huo J., Moiseev G.V., Hu L., Xiao Y.F. Multi-robot collaborative radioactive source search based on particle fusion and adaptive step size. Ann Nucl Energy. 2022. V. 173. P. 10910.
- Song C., He Y., Ristic B., Lei X. Collaborative infotaxis: Searching for a signal-emitting source based on particle filter and Gaussian fitting. Robotics and Autonomous Systems. V. 125. P. 103414. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2019.103414>
- Durrieu J.L., Thiran J.P., Kelly F. Lower and upper bounds for approximation of the Kullback-Leibler divergence between Gaussian Mixture Models. 2012 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). IEEE. 2012.
- Rahbar F., Marjovi A., Martinoli A. Design and Performance Evaluation of an Algorithm Based on Source Term Estimation for Odor Source Localization. Sensors. 2019. V. 19 (3). P. 656. <https://doi.org/10.3390/s19030656>.
- Masson J.B. Olfactory searches with limited space perception. Proc natl acad sci u s a. 2013. V. 110(28). P. 11261–11266.
- Huo J., Liu M., Neusypin K.A., Liu H., Guo M., Xiao Y. Autonomous Search of Radioactive Sources through Mobile Robots. Sensors. 2020. V. 20 (12). P. 3461.

Information about the authors**Georgy V. Moiseev** – Ph.D. (Eng.), Associate Professor**Alexandr N. Alyunov** – Ph.D. (Eng.), Associate Professor**Vadim V. Ivanov** – Student

The article was submitted 10.06.2025

Approved after reviewing 19.06.2025

Accepted for publication 30.06.2025