

УДК 519.878, 004.896

## ПОИСК НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ ГРУППОЙ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭНТРОПИЙНОГО ПОДХОДА

Н.А. Михайлов (*n.mikahylov.mai@mail.ru*)  
Московский авиационный институт (национальный  
исследовательский университет), Москва

**Аннотация.** В статье представлен алгоритм согласованного поиска группой беспилотных летательных аппаратов. В основе алгоритма лежит вычисления энтропийной карты местности для множества целей. Критерием выбора траектории следования является максимум суммарной пропускной способности. В работе представлены результаты компьютерного моделирования предложенного алгоритма. Показано повышение производительности решения задачи в сравнении с решением аналогичной задачи алгоритмом поиска по максимальной априорной вероятности присутствия объектов.<sup>1</sup>

**Ключевые слова:** поиск объектов, группа БЛА, информационная энтропия, планирование маршрута.

### Введение

Задача поиска наземных объектов является актуальной на сегодняшний день. Особый интерес представляет решение задачи вторичного поиска. Основной особенностью вторичного поиска является наличие известной априорной вероятности возможного присутствия объекта поиска в некоторой области. Эта особенность позволяет направлять поисковые силы в области максимальной вероятности, что повышает эффективность поиска. Примерами задачи вторичного поиска являются:

- Поиск пострадавших в районах стихийного бедствия;
- Поиск очагов лесных пожаров;
- и др.

От эффективности и надежности решения задачи вторичного поиска, в приведенных выше примерах, могут зависеть человеческие жизни.

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 19-08-00613-а)

В работах [Амелин и др. 2009], [Kim et al. 2015] представлены варианты решения задачи поиска наземных объектов с использованием беспилотных летательных аппаратов (БЛА).

В работе [Михайлов, 2017] было показано, что учет фактора наблюдаемости в области поиска, таких как: туман, дым, загорание обломками или деревьями, - повышает эффективность решения задачи поиска наземных объектов.

Однако в известных работах не рассматривалась задача поиска множества наземных объектов группой БЛА с учетом фактора наблюдаемости.

## 1 Постановка задачи

Проблема планирования поиска группой БЛА состоит в том, что при организации вторичного поиска полет строем в ряде случаев является избыточным. Целесообразно распределять поисковые ресурсы в различные области пространства поиска.

Таким образом, целью работы является повышение эффективности поиска наземных объектов за счет разработки методики планирования маршрутов движения БЛА в составе группы, при которой учитывались бы факторы: априорная вероятность присутствия объекта поиска в заданной области, наблюдаемость объекта поиска в заданной области, а также взаимное расположение БЛА и объекта поиска.

Как было показано в работе [Ким и др., 2018] необходимо задать априорную вероятность присутствия объекта поиска в области поиска с размерами  $X_{MAX}, Y_{MAX}$ . В случае множества объектов поиска  $M$  данные вероятности задаются в виде  $P_m(x, y)$  где  $m \in \overline{0, M}$ ;  $x, y$  – координаты.

Для обнаружения объекта необходимо задать набор признаков  $\bar{u} = \{u_1 \in U_1, \dots, u_R \in U_R\}$ , где  $R$  общее количество признаков, к которым можно отнести: яркость, цвет, текстуру, размеры, форму и др. Наиболее полным описанием признаков является условная плотность распределения вероятности возникновения значения признака  $u_r$ , при условии нахождения или отсутствия объекта поиска [Ким, 2001].

В работе [Бодунков, 2015] показано, что данные плотности могут быть построены с учетом различных факторов: погодные условия, время суток, время года и др.

В качестве критерия эффективности решения задачи поиска в работе принято минимальное время поиска  $T_{\Pi}$  при заданной минимальной вероятности правильного обнаружения:

$$\min_t T \text{ при } P_{\text{по}} \text{ и } P_{\text{тр}} \quad (2)$$

Требуется разработать методику планирования траекторий для каждого БЛА в составе группы, обеспечивающей минимум заданного критерия.

## 2 Алгоритм согласованного поиска группой

Пусть, на каждом шаге процесса формирования поисковой траектории каждый БЛА обладает полной информации о положении других БЛА, текущем состоянии наблюдаемой сцены и вероятностях присутствия объектов поиска в области. Зададим ограничения, что в каждой точке области поиска одновременно может присутствовать лишь один БЛА. Тогда, в момент начала операции каждый БЛА рассчитывает критерий пропускной способности [Коган, 1981]  $C_m(x, y)$  для каждого объекта поиска  $m$ . Далее необходимо выбрать оптимальное распределение БЛА по зонам максимумов пропускной способности. С учетом введенного выше ограничения, необходимо выбрать такое распределение, при котором доставлялся бы максимум суммарной пропускной способности. Таким образом, если количество БЛА обозначить как  $N$ , то количество вариантов распределения будет равно  $q = N \cdot N$ , а оптимальный план  $q^*$  будем находить из условия:

$$C_{\Sigma}(q^*) = \max_q \sum_{n=1}^N C_n(q), \quad (3)$$

где  $C_n(q) = \max_{x, y} C_m(x, y)$  – максимальное значение пропускной способности для БЛА под номером  $n$ . Для учета ограничения необходимо при составлении плана для БЛА под номером  $n$  исключать точки  $x, y$ , которые были выбраны аппаратами с индексами  $[1, n-1]$ .

После составления плана осуществляется движение в сторону выбранных точек. При достижении одним из БЛА плановой точки, происходит решение задачи обнаружения. В результате решения задачи обнаружения в соответствии с [Михайлов, 2017] изменяется распределение вероятностей присутствия объекта поиска за счет получения нового значения  $P_m(x, y) = P_{\text{по}}(x, y)$ . Если  $P_{\text{по}} \geq P_{\text{тр}}$  то объект считается обнаруженным. Если объект не удалось обнаружить, или обнаруженный объект был не последним, то данная информация попадает на борт остальных участников поиска. Далее происходит вторичное определение плана с учетом текущего положения БЛА и новых значений  $P_m(x, y)$ . Вся процедура распределения, полета и обнаружения продолжается до тех пор,

пока не будут обнаружены все объекты поиска или не останется областей, для успешного решения задачи обнаружения [Ким, 2001].

### 3 Компьютерное моделирование

Для проверки работоспособности алгоритма и оценки его эффективности было проведено компьютерное моделирование. Группа БЛА состояла из  $N = 4$  агентов. Область поиска составляет  $X_{MAX} \times Y_{MAX} = 50 \times 50$ . В области поиска необходимо обнаружить  $M = 10$  объектов. Для каждого объекта имеется распределение  $P_m(x, y)$ , причем суммарное значение вероятностей на всей карте поиска равно единице.

Было проведено две серии экспериментов: «хорошая» наблюдаемость и «плохая» наблюдаемость. «Хорошая» наблюдаемость состоит в том, что для каждой точки карты выполняется условие:

$$P(O(x, y) | \bar{u}^*) \geq 0.9, \quad (5)$$

где  $P(O(x, y) | \bar{u}^*)$  – вероятность правильного обнаружения при получении значения признака  $\bar{u}^*$  в точке с координатами  $x, y$ ;  $\bar{u}^*$  – значение признака соответствующее области правильного обнаружения [Ким, 2001]. Другими словами, при нахождении объекта поиска в точке  $x, y$  он будет обнаружен с вероятностью  $P \geq 0.9$ .

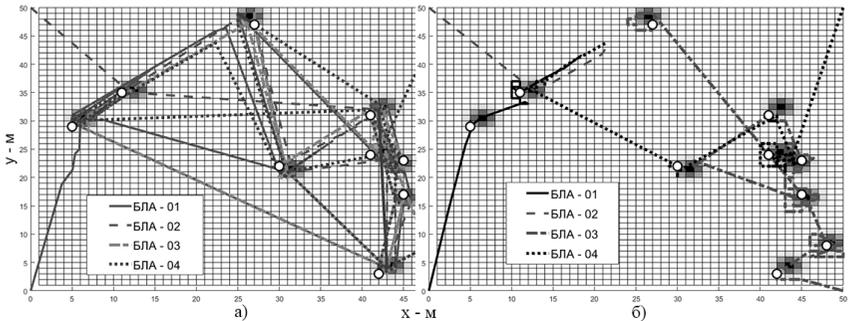


Рис. 1. Траектории поиска группой БЛА: а) траектории построенный с использованием алгоритма поиска по максимальной вероятности; б) траектории построенный с использованием энтропийного подхода.

Для эксперимента с «плохой» наблюдаемостью в некоторой точке, в которой находится случайно выбранный объект, выполняется условие:

$$P(O(x, y) | \bar{u}^*) < 0.55 \quad (6)$$

Начальные положения БЛА: БЛА1 (0,0); БЛА2 (50,0); БЛА3 (0,50); БЛА4 (50,50). На рисунке (рис. 1) показаны конечные траектории поиска для алгоритма поиска по максимальной вероятности присутствия (рис. 1, а) и энтропийного поиска (рис. 1, б) при условии «хорошей» наблюдаемости. Кружками отмечены фактические положения объектов поиска на фоне распределения вероятностей присутствия (чем темнее, тем выше вероятность).

На рисунке (рис 2.) показана оценка эффективности поиска, которая проводилась на основе изменения энтропии положения объектов поиска от суммарного затраченного времени поиска.

По результатам моделирования поиска при «хорошей» наблюдаемости видно существенное различие в длине траекторий, это объясняется тем, что при выборе следующей точки пути энтропийный алгоритм учитывает расстояние до ближайших областей поиска. Из графиков (рис 2.) для случая «хорошей» наблюдаемости суммарное время поиска составило 119.9 секунд, в то время как поиск по максимальной вероятности потребовал 178.1 секунду. Превышение затрат времени на 48%.

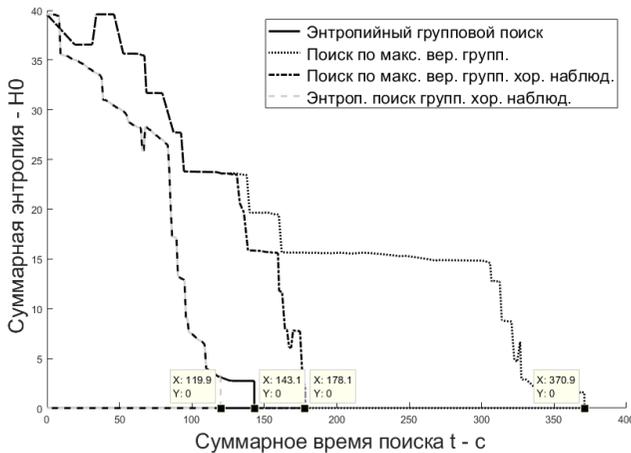


Рис. 2. Изменение энтропии при поиске группой БЛА.

На графиках (рис 2.) также представлены результаты при «плохой» наблюдаемости. Время энтропийного поиска составляет 143 секунды, а время поиска по максимальной вероятности составило 370.9 секунды. Превышение затрат времени на 159%. Таким образом, энтропийный подход обеспечивает существенное снижение времени группового поиска по сравнению с методом планирования по максимальной вероятности.

## 4 Выводы

Предложена методика планирования траекторий для поиска наземных объектов группой БЛА. Основные особенности алгоритма: учет фактора наблюдаемости объектов поиска, учет вероятности присутствия каждого объекта поиска, а также учет расстояния между текущим положением БЛА и предполагаемыми точками поиска (расстояние может быть заменено на некоторую функцию потерь, учитывающую и другие важные факторы при поиске).

Результаты моделирования подтверждают работоспособность и эффективность предлагаемой методики при групповом применении БЛА. Тестовые примеры показали повышение эффективности поиска, в случаях «плохой» видимости, в более чем 1.5 раза.

## Список литературы

- [Амелин и др. 2009] Амелин К.С., Антал Е.И., Васильев В.И., Граничина Н.О. Адаптивное управление автономной группой беспилотных летательных аппаратов // Стохастическая оптимизация в информатике; Изд-во СПбГУ, т. 5, №1, 2009, стр. 157-166.
- [Kim N, 2015] Kim N., Chervonenkis M. Situational control unmanned aerial vehicles for traffic monitoring. // Modern Applied Science, 2015, Vol. 9, No. 5, Special Issue//Canadian Center of Science and Education. ISSN (printed): 1913-1844. ISSN (electronic): 1913-1852
- [Ким и др., 2018] Ким Н.В., Михайлов Н.А. Энтропийный подход к решению задачи поиска наземных объектов с учетом фактора наблюдаемости объекта поиска// Техническое зрение в системах управления – 2018. Сборник тезисов; Москва, 2018, стр. 59.
- [Михайлов, 2017] Михайлов Н.А. Планирование маршрута поиска для автономного беспилотного летательного аппарата с использованием энтропийного подхода // сборник трудов семинара, IV Всероссийский научно-практический семинар Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта, 5-6 октября 2017, Казань, Казанский (Приволжский) университет, стр. 126-135.
- [Коган, 1981] Коган И.М., Прикладная теория информации // М.: Радио и связь. 198., 216 с.
- [Бодунков, 2015]. Бодунков Н.Е. Расширение условий функционирования систем визуальной навигации автономных беспилотных летательных аппаратов // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Московский авиационный институт (технический университет), 2015, 155 стр.
- [Ким, 2001] Ким Н.В. Обработка и анализ изображений в системах технического зрения: Учебное пособие. // М.: Изд-во МАИ, 2001 – 164 с