

О ПРОТИВОДЕЙСТВИИ СКРЫТНОМУ ПЕРЕДВИЖЕНИЮ УПРАВЛЯЕМОГО ПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА В КОНФЛИКТНОЙ СРЕДЕ

М.А. Самохина

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: ph@ipu.ru

А.С. Самохин

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: samokhin@ipu.ru

Ключевые слова: конфликтная среда, оптимальное управление, функционал риска обнаружения, расстановка обнаружителей.

Аннотация: В настоящей работе рассматривается задача противодействия скрытному перемещению управляемого подвижного объекта в конфликтной среде. Конфликтная среда представлена обнаружителями. Задача заключается в размещении на плоскости обнаружителей таким образом, чтобы функционал риска обнаружения на лучшей возможной траектории уклоняющегося от обнаружения объекта был как можно хуже. Уклоняющийся объект перемещается между двумя заданными точками на плоскости за заданное время, при движении расположение обнаружителей ему известно. Для решения задачи расстановки обнаружителей сначала на основе принципа максимума решается вспомогательная задача классификации путей уклоняющегося объекта для фиксированных расстановок обнаружителей. Обе задачи решаются численно, получены конфигурации расположения различного числа обнаружителей.

1. Введение

Настоящая работа по смыслу состоит из двух частей. В первой части рассматривается задача классификации локально-оптимальных путей уклоняющегося от обнаружения управляемого подвижного объекта (УПО). Движение УПО происходит в конфликтной среде [1, 2], представленной неподвижными обнаружителями, их расположение УПО известно. Оптимизируется функционал риска обнаружения [3]. Задача формализуется как задача оптимального управления, исследуется на основе принципа максимума Л.С. Понтрягина и далее решается численно методом стрельбы.

Во второй части работы рассматривается задача оптимизации расстановки обнаружителей на плоскости с целью максимального противодействия скрытному перемещению УПО. То есть необходимо расставить обнаружители таким образом, чтобы минимально возможный риск обнаружения УПО был максимален. В результате оптимизации в работе получены конфигурации расположения различного числа обнаружителей.

Актуальность работы связана с широким применением в последнее время автономных аппаратов в задачах прорыва охраняемого периметра, продолжающимся развитием этой области, и соответствующим совершенствованием охранных систем.

2. Задача классификации локально оптимальных путей

2.1. Формализация

Задача рассматривается в упрощённой постановке, УПО и обнаружители считаются точками. Пусть обнаружители имеют координаты (a_i, b_i) . Тогда минимизируемый УПО функционал риска обнаружения будет иметь вид:

$$\int_0^T \left(\sum_{i=1}^N \frac{v^2}{(x - a_i)^2 + (y - b_i)^2} \right) dt \rightarrow \min,$$

где T — заданное время перемещения УПО, N — количество обнаружителей, v — величина вектора скорости УПО, а (x, y) — координаты УПО в момент времени t .

Материальная точка УПО управляется величиной v , не превосходящей заданную константу v_{\max} , и направлением φ вектора скорости:

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \varphi, \\ \dot{y} = v \sin \varphi. \end{cases}$$

Задача заключается в поиске всевозможных локально оптимальных траекторий передвижения УПО между двумя заданными точками.

2.2. Краевая задача

Задача оптимального управления УПО исследуется на основе принципа максимума Л.С. Понтрягина [4]. Система дифференциальных уравнений краевой задачи формируется из исходной системы управления УПО и уравнений на сопряжённые переменные p_x, p_y :

$$\begin{cases} \dot{p}_x = - \sum_{i=1}^N \frac{\hat{v}^2}{((x - a_i)^2 + (y - b_i)^2)^2} \cdot (x - a_i), \\ \dot{p}_y = - \sum_{i=1}^N \frac{\hat{v}^2}{((x - a_i)^2 + (y - b_i)^2)^2} \cdot (y - b_i), \end{cases}$$

где $\hat{v} = \min \left(\frac{\sqrt{p_x^2 + p_y^2}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{(x - a_i)^2 + (y - b_i)^2}}, v_{\max} \right)$.

Краевая задача в работе решалась численно с подбором двух параметров пристрелки, характеризующих начальное положение вектора сопряжённых переменных. Задача решалась многократно для различного количества обнаружителей и различной расстановки их на плоскости.

3. Задача расстановки обнаружителей на плоскости

Для решения задачи расстановки обнаружителей вводится прямоугольная сетка. Начальные конфигурации обнаружителей соответствуют их расположению в узлах данной сетки.

В ходе решения для каждого заданного расположения обнаружителей решалась описанная выше вспомогательная задача классификации локально оптимальных путей

и находилось минимально возможное значение функционала риска обнаружения, благодаря чему возможно проводить числовое сравнение различных конфигураций обнаружителей.

В случае малого количества обнаружителей оптимальное расположение на сетке может быть найдено перебором всех возможных конфигураций. Результаты для расстановки 2, 3 обнаружителей приведены в работах [5, 6].

В случае большего количества обнаружителей рассматривались случайные стартовые расположения обнаружителей, а далее для каждого стартового положения их конфигурация уточнялась градиентным методом.

4. Заключение

В работе рассмотрены задачи классификации путей уклоняющегося от обнаружения в конфликтной среде УПО и расстановки обнаружителей с целью противодействия скрытному перемещению УПО.

Первая задача рассматривается как вспомогательная, исследуется на основе принципа максимума, для каждой конкретной конфигурации сенсоров решается численно методом стрельбы.

Вторая основная задача решается перебором на сетке различных конфигураций обнаружителей с уточнением их расположения градиентным методом. Для каждого фиксированного расположения обнаружителей при этом решается первая вспомогательная задача классификации путей и вычисляется лучшее значение функционала риска обнаружения.

Для решения данных задач авторами был разработан и реализован соответствующий программный комплекс на языке C, включающий в себя решение задач Коши с автоматическим выбором шага и решение краевых задач методом стрельбы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №(23-19-00134).

Список литературы

1. Галяев А.А., Маслов Е.П., Рубинович Е.Я. Об одной задаче управления движением объекта в конфликтной среде // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2009. № 3. С. 134-140.
2. Dogan A., Zengin U. Unmanned Aerial Vehicle Dynamic-Target Pursuit by Using Probabilistic Threat Exposure Map // Journal of Guidance, Control and Dynamics. 2006. Vol. 29, No. 4. P. 723-732. Doi: 10.2514/1.18386.
3. Галяев А.А. Задача уклонения от обнаружения системой разнородных наблюдателей: один сенсор – группа детекторов // Проблемы управления. 2016. № 3. С. 72-77.
4. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Наука, 1983. 393 с.
5. Galyaev A.A., Samokhin A.S., Samokhina M.A. On problem of optimal observers' placement on plane // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1864(1):012075. 6 p. Doi: 10.1088/1742-6596/1864/1/012075.
6. Galyaev A., Samokhin A., Samokhina M. Application of the Gradient Projection Method to the Problem of Sensors Arrangement for Counteraction to the Evasive Object // 28th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS). Saint Petersburg, Russia, 2021. 3 p. Doi: 10.23919/ICINS43216.2021.9470857.