УДК 517.977

ОПТИМИЗАЦИЯ ДВИЖЕНИЯ ПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА С ОГРАНИЧЕНИЕМ НА РАЗВОРОТ ПРИ УКЛОНЕНИИ ОТ ОДИНОЧНОГО СЕНСОРА

А.А. Галяев

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65

E-mail: galaev@ipu.ru

П.В. Лысенко

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65

E-mail: pashlys@yandex.ru

Ключевые слова: принцип максимума Понтрягина, кривизна траектории, машина Дубинса, интегральный риск обнаружения.

Аннотация: Рассмотрена задача оптимизации движения подвижного объекта с ограничением на разворот при уклонении от одиночного сенсора. Задача решена с помощью принципа максимума Понтрягина. Проведено сравнение решения с решениями задачи про машину Дубинса и аналогичной задачи без ограничения на кривизну траектории.

1. Введение

Благодаря развитию беспилотных летательных и подводных аппаратов становятся особенно актуальны задачи построения траекторий подвижных объектов (ПО) в различных средах с учётом естественных ограничений движения. Одним из подобных ограничений является максимальная кривизна траектории, связанная с физическими размерами аппарата и его рулей.

Система с подобной динамикой и ограничением называется машиной Дубинса и впервые рассматривалась А.А. Марковым в 1887 году. Однако в качестве критерия задачи оптимального управления по переводу машины Дубинса из одной точки на плоскости в другую традиционно использовался критерий быстродействия, как например в [1].

В настоящее время в различных областях применения беспилотных аппаратов актуальны задачи повышения скрытности при планирования маршрута движения подвижного объекта, которые можно рассматривать как задачи оптимального управления с критерием интегрального риска. Особенность таких задач заключается в том, что мгновенный уровень сигнала I, пришедшего на вход наблюдателя или сенсора зависит от текущего расстояния D до уклоняющегося объекта, а для некоторых типов полей он еще зависит и от модуля мгновенной скорости v объекта. Для описания подобной зависимости используется степенная модель

$$I \sim \frac{v^m}{D^k}. \tag{1}$$

В работе рассматривается задача планирования оптимального маршрута ПО при уклонении на плоскости от поисковой системы, состоящей из одиночного сенсора. Параметры степенной модели выбраны $m = 1, k = 2$, что соответствует обнаружению по первичному гидроакустическому полю. Особенностью задачи являются заданные начальное и конечное положение ПО, а также начальное и конечное направление его скорости. Помимо этого на возможные траектории движения наложено ограничение на радиус поворота, т.е. кривизну. Критерий задачи задается через интегральный уровень риска, вычисленный вдоль траектории.

Данная задача отличается от задачи, называемой «машина Дубинса» в части критерия. Решения обеих задач оптимального управления похожи, в них основной исследовательский интерес представляют траектории особого режима управления и задача синтеза траекторий, состоящих из участков обычных и особых режимов управления на них. Известно, что для задачи планирования траектории без ограничений на кривизну поворота и начальное и конечное направление вектора скорости оптимальным является движение по окружности, описанной около треугольника, вершинами которого являются начальная и конечная точки маршрута, а также положение сенсора [2], [3].

2. Постановка задачи

Рассмотрим ПО, движущийся по плоскости X_1X_2. Он может двигаться вперед с постоянной линейной скоростью и одновременно поворачиваться с ограниченной угловой скоростью. Динамика рассматриваемого управляемого объекта имеет вид:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \cos\theta, \\ \dot{x}_2 = \sin\theta, \\ \dot{\theta} = u, \end{cases} \tag{2}$$

где x_1, x_2 - координаты на плоскости, а θ - угол поворота вектора скорости.

Ограничение на управление имеет вид

$$|u| \leqslant K. \tag{3}$$

Здесь K - максимально допустимая кривизна траектории движения.

Объект требуется перевести из точки A в точку B при том, что направления вектора скорости в этих точках являются заданными:

$$x_1(0) = x_{1A},\ x_2(0) = x_{2A},\ x_1(T) = x_{1B},\ x_2(T) = x_{2B},\ \theta_1 = \theta_A,\ \theta_2 = \theta_B \tag{4}$$

Движение происходит в поле действия сенсора, расположенного в начале координат. Критерием оптимальности служит интегральный риск обнаружения на траектории от A до B, где ds – элемент дуги:

$$J = \int_A^B \frac{ds}{x_1^2 + x_2^2}. \tag{5}$$

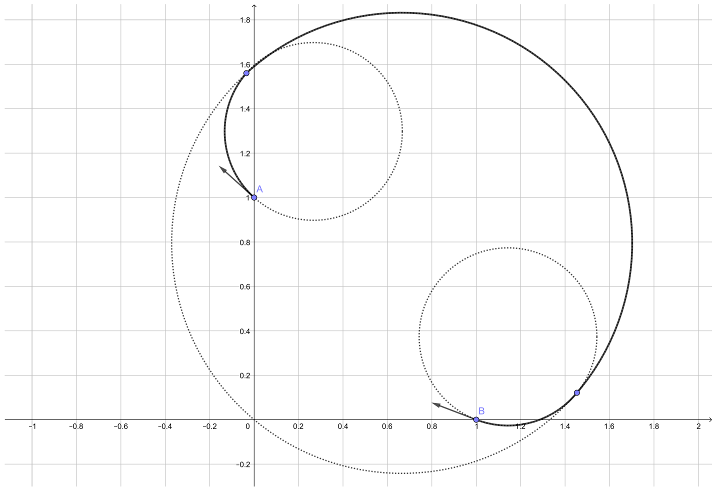

Рис. 1. Пример оптимальной траектории, содержащей дугу с особым режимом управления

Задача оптимального управления решается с помощью принципа максимума Понтрягина. По аналогии с решением задачи про машину Дубинса результат представляет собой траекторию с тремя интервалами управления: начальным и конечным с предельным значением $u = K$ и интервалом с особым управлением между ними. Но в отличии от решения классической задачи, траектория ПО при особом управлении представляет собой дугу окружности, проходящую через начало координат, что совпадает с решением аналогичной задачи при отсутствии ограничения на кривизну траектории, полученным в [2]. На рисунке продемонстрирован полученный результат.

3. Заключение

В докладе предложен подход к планированию оптимальной траектории движения ПО с ограничением на радиус разворота в задаче уклонения от обнаружения одиночным сенсором. Исходная задача планирования решена при помощи принципа максимума Понтрягина, исследованы условия возникновения режима особого управления, получена оптимальная траектория движения. Решение проиллюстрировано примером.

Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН №30 и ПФНИ ГАН № 0052-2014-0023.

Список литературы

1. Аграчев А.А., Сачков Ю.Л. Геометрическая теория управления. М.: Физматлиб, 2005. 392 с.
2. Галяев А.А., Маслов Е.П., Рубинович Е.Я. Об одной задаче управления движения объекта в конфликтной среде // Известия РАН. Теория и системы управления. 2009. № 3. С. 134-140.
3. Галяев А.А., Лысенко П.В. Планирование маршрута движения управляемого объекта в задаче повышения скрытности при ограничении на длину траектории и радиус разворота // Конференция, посвященная 110-летию со дня рождения Л.С. Понтрягина. 12-14 декабря 2018, Москва. С. 99-102.