

ЗАДАЧА ОБЛЕТА ТЕРРИТОРИИ БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ С УЧЕТОМ ВЕТРОВЫХ НАГРУЗОК¹

М.В. Хачумов (khmike@inbox.ru)
Институт системного анализа РАН, Москва

В работе решается задача облета беспилотным летательным аппаратом территории, заданной опорными точками, в условиях ветровой нагрузки и ограничения на управление. Она разбивается на задачу планирования траектории облета и задачу следования по выбранному маршруту. В соответствии с принципом раздельного движения рассматривается плоский случай. Решение задачи следования основывается на продукционных правилах.

Введение

Возможность планирования оптимальной траектории полета по маршруту в реальном времени с учетом расстояния между опорными точками и воздействий на летательный аппарат (ЛА) способствует снижению эксплуатационных затрат за счет выбора наиболее экономичных маршрутов. В работе [Хачумов, 2010] задача планирования траектории движения летательного аппарата решается на основе венгерского метода [Кудрявцев, 1984] путем введения ограничений на перемещения и учета порядка облета пунктов. В настоящей работе планирование траектории полета с возвратом в исходную точку рассматривается как решение задачи коммивояжера на основе искусственной нейронной сети Кохонена. После того как маршрут облета территории рассчитан, необходимо решить задачу следования по нему с минимальными временными и координатными отклонениями. Моделирование следования БПЛА по заданному маршруту решается как задача преследования цели. Ранее подобный подход был предложен и рассмотрен автором в работе [Абрамов и др., 2013].

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-07-00025 А и № 14-07-31020 мол_а) и проекта Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 18.

1. Постановка задачи

Пусть заданы n опорных точек $(x_i, y_i), i = 1, \dots, n$ и известны расстояния между ними $d_{ij} = d((x_i, y_i), (x_j, y_j))$. Задача коммивояжера, заключается в отыскании самого короткого маршрута, проходящего через каждую из n точек по одному разу с последующим возвратом в исходную позицию [Кузин, 1973]. Задача относится к классу NP — полных задач, где число вариантов оценивается как $N!$

Если ввести переменные:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если БПЛА из точки } i \text{ движется в точку } j; \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

то задача формулируется следующим образом:

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n d_{ij} x_{ij} \rightarrow \min; \quad \sum_{i=0}^n x_{ij} = 1, \forall j; \quad \sum_{j=0}^n x_{ij} = 1, \forall i, \text{ где:} \quad (1.1)$$

$$\begin{cases} j = 1, \dots, n; \quad i = 1, \dots, n; \\ u_i - u_j + n x_{ij} \leq n - 1, \quad i \neq j; \end{cases} \quad (1.2)$$

Требования цикличности записывается в виде (1.2), где u_i - номер шага, на котором посетили точку i .

Решение задачи требует относительно больших затрат времени, что не позволительно при решении оперативно-тактических задач с помощью БПЛА. Известны эвристические методы решения задачи коммивояжера на основе ИНС Кохонена и Хопфилда [Ежов и др., 1998]. Заметим, что решение задачи коммивояжера на нейронной сети Хопфилда требует введения ряда параметров, которые можно определить только экспериментально путем подбора, что невозможно в условиях оперативных действий. В отличие от этого ИНС Кохонена позволяет получать достаточно быстро приемлемое решение для задачи большой размерности в условиях дефицита времени, поэтому выбор между указанными ИНС сделан в пользу последней.

Недостатком постановки (1.1)-(1.2) является отсутствие учета ветровых нагрузок на летательный аппарат, которые носят случайный характер и могут вызывать существенные отклонения от маршрута. Предлагается на первом этапе решать в реальном времени задачу выбора маршрута, а на втором - задачу его облета уже с учетом действующих случайных нагрузок и имеющейся математической модели летательного аппарата. В соответствии с принципом раздельного движения рассматривается плоский случай решения задачи следования по маршруту

с управлением углом тангажа θ в установленных моделью диапазонах и двухпозиционным управлением скоростью летательного аппарата. Эталонная траектория летательного аппарата задана движением псевдообъекта, называемого далее «цель», и представлена последовательностью из n опорных точек $(x_i, y_i), i = 1, \dots, n + 1$, $x_1 = x_{n+1}, y_1 = y_{n+1}$. Начальная и конечная точки совпадают. Индексом p будем помечать переменные БПЛА, а индексом e – цели. В простейшем случае цель осуществляет прямолинейное движение между соседними опорными точками траектории с постоянной (эталонной) скоростью $v^{(e)}$ и углом $\theta_i^{(e)}$, задающим направление. БПЛА преследует ее, руководствуясь выбранной стратегией и возможностью управления скоростью и углом тангажа. Известно желаемое время прохождения отдельных опорных точек $t_i^{(e)}, i = 1, \dots, n$, и всего маршрута в целом $T^{(e)}$. В результате ветровой нагрузки возможно отклонение летательного аппарата от своего маршрута, причем существенное, что может отклонение реального времени полета $T^{(p)}$ от заданного $T^{(e)}$. Направление ветра может быть как встречным, так и попутным в зависимости от фазы полета.

Скорость БПЛА устанавливается соответствующим рычагом управления в зависимости от ситуации. В дальнейшем ограничимся наличием у цели – одной скорости $v^{(e)}$, а у БПЛА двух скоростей $v_1^{(p)} = v^{(e)}$, и $v_2^{(p)} > v^{(e)}$. Угол тангажа $\theta^{(p)}$ устанавливается рычагами управления БПЛА в допустимых пределах $[\theta_{\min}^{(p)}, \theta_{\max}^{(p)}]$. Во время преследования догоняющий «видит» цель, т.е. знает координаты свои и цели в каждый текущий момент времени.

Приведем общую постановку задачи следования БПЛА по заданному маршруту как задачи преследования цели. Пусть $X(t)$ и $Y(t)$ – координаты БПЛА и цели, а $d(X(t), Y(t))$ – расстояние между ними в момент времени t . Задача заключается в построении такого управления $U(t) = (v^{(p)}(t), \theta^{(p)}(t))$ на временном отрезке $[0, T^{(p)}]$ при наличии возмущений и ограничений на управление, что

$$\int_{t=0}^{T^{(p)}} d(X(t), Y(t)) dt \rightarrow \min .$$

Предлагается решение этой задачи, основанное на действиях, имитирующих поведение легчика (человека-оператора) и заключающееся в выборе стратегий, реализуемых наборами правил в условиях установленных ограничений на управление и действующих возмущений.

2. Решение задачи коммивояжера на основе ИНС

Применительно к задаче коммивояжера нейронная сеть Кохонена использует принцип отображения двумерного распределения n опорных точек (нейронов-кластеров) на одномерный кольцевой маршрут, предварительно заполненный равномерно распределенными вспомогательными точками. После завершения процесса обучения нейронной сети, положение кластера в маршруте определится положением его образа в кольцевом выходном слое. Ее использование, как и в случае использования других лучших приближенных методов оптимизации, требует вычислительных затрат, оцениваемых как n^2 . Задача решается в следующем порядке. Сначала в сети фиксируется начальное размещение всех n опорных точек-кластеров с нормированными географическими координатами $(x_i, y_i), i = 1, \dots, n$. Эти значения интерпретируются в сети Кохонена как весовые коэффициенты настройки $(w_{1i}(t), w_{2i}(t)), i = 1, \dots, n$ и определяют размещение точек-кластеров на плоскости в момент времени t . Затем на вход сети в случайном порядке подается m точек с координатами, полученными на основе первоначального равномерного размещения точек на окружности, причем $m \gg n$. Эти координаты интерпретируются как входной вектор $(x_j^{(s)}, y_j^{(s)}), j = 1, \dots, m$, где индекс s подчеркивает расположение точек на окружности. Все точки окружности для удобства работы должны быть организованы в виде списка. Центр и радиус круга подбираются экспериментально. В простейшем случае – это минимальный радиус описанной вокруг точек окружности. Для решения задачи используется типовой алгоритм [Хачумов, 2013] настройки сетевой модели, который приводит к «вытягиванию» точек на окружность. Могут быть также использованы некоторые модификации настройки сети Кохонена, заключающиеся во введении функции окрестности для случайно выбранной точки круга, с тем, чтобы одновременно корректировать положение n точек-кластеров, в зависимости от их расстояния от искомой точки.

Цикл обучения продолжается для всех элементов входного множества точек круга до достижения системой целевого состояния. Пример

нескольких последовательных этапов работы ИНС Кохонена показан на рис. 1.

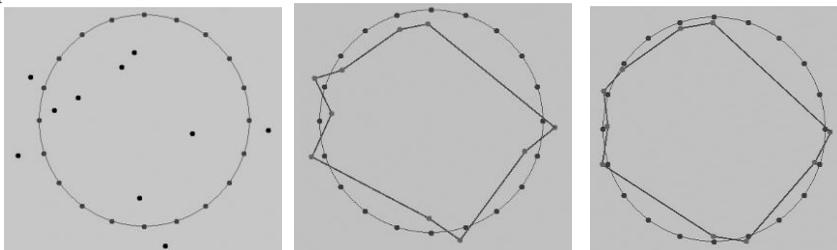


Рис. 1 – Начальный, промежуточный и конечный этапы работы ИНС Кохонена

Одной из подзадач при решении задачи коммивояжера с использованием самоорганизующейся карты Кохонена является извлечение маршрута облета, после того, как все точки-кластеры лягут на окружность. В идеальном случае после работы ИНС каждая точка-кластер располагается точно на окружности. Но чаще возникает ситуация, что веса не равны координатам. Тогда применяется следующий алгоритм:

Алгоритм. Процедура восстановления маршрута

1. Для всех точек окружности выполнить:
найти ближайшую точку-кластер
если кластер не привязан к какой-либо точке окружности,
то привязать
иначе удалить точку окружности
2. Для всех точек-кластеров выполнить:
если кластер не привязан к какой-либо точке окружности
создать новую точку и привязать к ней точку-кластер
найти ближайшую к кластеру точку на окружности
вставить новую точку до или после ближайшей, в зависимости от того, какой путь короче

После применения данного алгоритма можно получить некоторый путь, который принимается за основу построения траектории полета.

3. Управление, основанное на правилах

Схема системы управления, основанной на продукционных правилах, была рассмотрена автором в работе [Абрамов и др., 2013]. Существенную роль здесь играет выбор стратегии управления на основе текущих данных о состояниях БПЛА и цели. Рассмотрим некоторые стратегии управления БПЛА.

Стратегия 1 (стратегия движения по точкам) для БПЛА заключается в коррекции движения по текущему отклонению от эталонной траектории следования цели. При этом должны быть пройдены все точки с минимальным отклонением по времени $\Delta^{(T)} = |T^{(p)} - T^{(e)}| \rightarrow \min$.

Стратегия 2 (стратегия сближения с целью) заключается в преследовании эталонной цели. Стратегия осуществляет параллельное сближение [Петросян, 1997] БПЛА с эталонной целью и предполагает вычисление угла тангажа для прогнозирования места встречи с целью [Абрамов и др., 2013]. Здесь точное прохождение летательного аппарата через опорные точки не требуется.

Приведем применяемые производственные правила:

Правило 1 (режим следования): если отклонение и время отработки отклонения для БПЛА и цели не превышает наперед заданных пороговых значений, то применить стратегию 1;

Правило 2 (режим упреждения): если отклонение или время отработки отклонения для БПЛА и цели превышают пороговые значения, то применить стратегию 2;

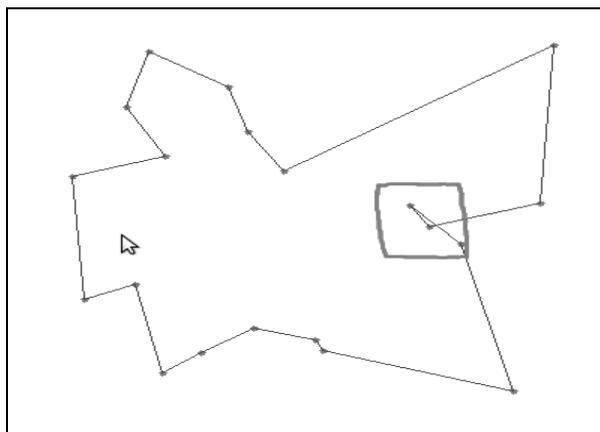
Значения порогов для смены режима устанавливаются заранее с учетом ветровых нагрузок в данной местности.

4. Моделирование движения БПЛА по заданному маршруту в неспокойной среде

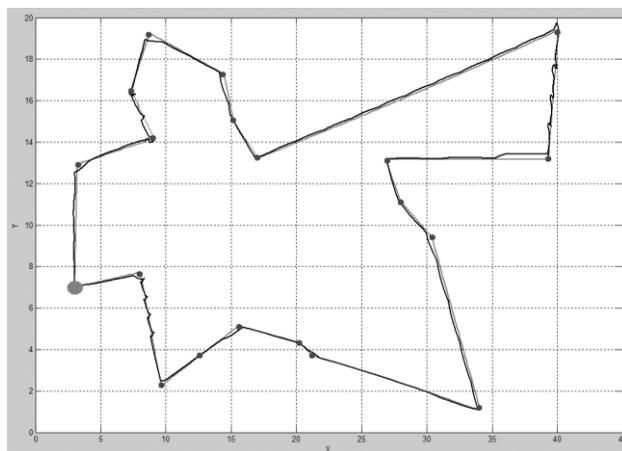
Проведем моделирование полета БПЛА по маршруту, построенному нейронной сетью Кохонена, в условиях ветровой нагрузки с помощью программного обеспечения MATLAB и системы Simulink.

Примем скорость цели $v^{(e)}=30$ м/с, воздушную скорость БПЛА в режиме следования $v_1^{(p)}=30$ м/с, в режиме упреждения (параллельного сближения) $v_2^{(p)}=45$ м/с. Ветровая нагрузка состоит в общем случае из двух составляющих. Первая учитывает распределение скорости ветра по высоте, и ее закон устанавливается в зависимости от местности. Вторая составляющая носит случайный характер и непосредственно влияет на изменение угла тангажа. В зависимости от фазы полета направление ветра может быть как встречным, так и попутным. Среднеквадратичные значения продольной составляющей ветра $\sigma_\tau = 3$ м/с. На рис. 2а представлен результат работы ИНС по формированию маршрута облета 20 опорных точек. Видно, что на небольшом участке маршрута имеет место проблема с выбором порядка облета близких по расположению точек, которая может быть решена локальным перебором. На рис. 2б

представлены траектории движения эталонной цели (светлая кривая) и БПЛА (темная кривая). Пройденное расстояние измеряется в километрах.



а)



б)

Рис. 2 – Результаты моделирования задачи облета территории

Из рис. 2б видно, что БПЛА осуществляет логичные («разумные») действия, имитируя действия пилота по преследованию цели, не сильно отклоняется от заданной траектории и завершает полет в первоначальной точке (выделена утолщением). Общее время моделирования составило 400 секунд.

Заключение

В настоящей работе планирование траектории движения БПЛА рассматривается как решение задачи коммивояжера. Использование ИНС Кохонена позволяет получать приемлемое решение выбора маршрута для задач большой размерности в условиях дефицита времени и необходимости оперативных действий. В основу решения задачи следования БПЛА по заданному маршруту в возмущенной среде в работе положено применение трех принципов:

- принцип преследования цели, совершающей идеальное движение по маршруту в соответствии с полетным заданием, в условиях воздействий ветровых нагрузок на БПЛА;
- принцип приближенного определения точки встречи БПЛА с целью, необходимого для вычисления угла тангажа и реализации стратегии параллельного сближения;
- принцип имитации действия человека-оператора, управляющего БПЛА, на основе выбора стратегии, реализуемой простыми производственными правилами.

Проведено моделирование полета БПЛА по заданному маршруту при наличии ветровой нагрузки в соответствии с выбранной стратегией, направленной на минимизацию рассогласования БПЛА и идеальной цели, которое показало, что система управления, основанная на производственных правилах, достаточно уверенно обрабатывает полетное задание. Система управления быстро реагирует на отклонения от цели и вырабатывает команды по сближению с идеальной траекторией.

Список литературы

- [Хачумов, 2010] Хачумов В.М. Планирование траектории движения летательного аппарата // Искусственный интеллект и принятие решений, №4, 2010, с.70-76.
- [Кудрявцев, 1984] Кудрявцев Е.М. Исследование операций в задачах, алгоритмах и программах. – М.: Радио и связь, 1984.
- [Абрамов и др., 2013] Абрамов Н.С., Хачумов М.В. Моделирование проводки по маршруту беспилотного летательного аппарата как задачи преследования цели // Авиакосмическое приборостроение, № 9, 2013, с.9-22.
- [Кузин, 1973] Кузин Л.Т. Основы кибернетики. Т.1. Математические основы кибернетики – М.: Энергия, 1973. – 504 с.
- [Ежов и др., 1998] Ежов А.А., Шумский С.А. Нейрокомпьютеринг и его применения в экономике и бизнесе. Нейросетевая оптимизация. – <http://www.intuit.ru/studies/courses/2255/139/lecture/20567>
- [Хачумов, 2013] Хачумов М.В. Сетевая модель кластерного анализа // Прикладная физика и математика, №5, 2013, с.85-91.
- [Петросян, 1997] Петросян Л.А. Дифференциальные игры преследования. – Л.:Изд-во Ленингр. ун-та. 1997