

УДК 004.89

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРОЯ БПЛА С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОННОЙ СЕТИ И СИСТЕМЫ ПРАВИЛ

М.В. Хачумов (*khmike@inbox.ru*)

Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, Москва

Аннотация. Дана постановка задачи безопасного формирования заданного строя для группы беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) типа квадрокоптеров, в возмущенной воздушной среде. Для построения опорного плана решения предлагается применить вычислительную схему на основе искусственной нейронной сети Кохонена. Безопасность группового полета обеспечивается путем применения специальных правил управления. Выполнены экспериментальные исследования по моделированию решения задачи формирования строя с учетом ветровых возмущений в среде MATLAB Simulink.¹

Ключевые слова: БПЛА, строй, нейронная сеть Кохонена, правила управления.

Введение

Строем (образованием или формацией) будем называть требуемое расположение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) на плоскости или в пространстве. В зависимости от того, каким образом задан целевой строй, строевая задача может иметь различную постановку. В простейшем случае целевой строй может быть задан в виде координат целевых положений БПЛА. Методы построения плоских и пространственных формаций в группах квадрокоптеров рассмотрены в ряде современных отечественных и зарубежных работ [Дьяченко, 2012], [Иванов, 2016], [Guzey, 2016], [Xue et al., 2016]. В случае БПЛА самолетного типа, позиции строя должны быть заняты всеми летательными аппаратами одновременно с определенной скоростью. Решение такой задачи рассмотрено автором в работе [Khachumov et al., 2018] и разбивается на два этапа. На первом оно сводится к решению задачи о назначениях, т.е. распределению БПЛА

¹ Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проекты № 17-29-07003, 18-07-00025).

группы по целевым положениям и связано с выбором критерия или матрицы стоимости (штрафов). На втором этапе решается задача безопасного движения БПЛА к своим назначенным целевым положениям. В этом случае полезной информацией может служить матрица расстояний между центрами летательных аппаратов [Иванов, 2016], рассчитываемая через определенные интервалы времени, на основе которой осуществляется прогнозирование времени и места возможного столкновения БПЛА при простейших прямолинейных движениях. При обнаружении мест возможного столкновения решается задача устранения конфликтной ситуации. Различные аспекты разрешения коллизий путем перепланирования и введения задержек подробно рассмотрены в работе [Андрейчук и др., 2016].

В настоящей работе расчет траекторий движения БПЛА типа квадрокоптеров к своим целевым позициям осуществляется с применением искусственной нейронной сети (ИНС) Кохонена [Хачумов, 2013]. В процессе движения БПЛА по рассчитанным траекториям под воздействием ветровых нагрузок возможно возникновение коллизий, средством разрешения которых служат специальные правила управления, направленные на изменение скоростей и направлений сближения.

1 Постановка задачи формирования строя

Рассмотрим следующую постановку задачи формирования строя. Пусть n идентичных БПЛА $B = \{b_1, \dots, b_n\}$ располагаются произвольным образом в некоторой ограниченной области. Состояние БПЛА b_i в момент времени t определяется его координатами $(x_i(t), y_i(t), z_i(t))$, скоростью движения $v_i(t)$ и углами тангажа $\theta_i(t)$ и рыскания $\psi_i(t)$. Предполагается, что известны целевые положения $s_1(x_1^s, y_1^s, z_1^s), \dots, s_n(x_n^s, y_n^s, z_n^s)$ аппаратов в строю S . Необходимо перевести динамическую систему из заданного состояния $x_i(0), y_i(0), z_i(0), v_i(0), \theta_i(0), \psi_i(0)$, определяющего исходное расположение БПЛА, в целевое состояние $x_i(T), y_i(T), z_i(T), v_i(T), \theta_i(T), \psi_i(T)$ за время T , при этом $\forall i, j = \overline{1, n}$, $(x_i(T), y_i(T), z_i(T)) \in S$, $(x_i(T), y_i(T), z_i(T)) \neq (x_j(T), y_j(T), z_j(T))$. Причем движение группы БПЛА к целевым позициям должно быть безопасным. Упрощенная модель движения БПЛА при отсутствии возмущений принимает вид $\dot{x}_i = v_i \cos \theta_i \cos \psi_i$; $\dot{y}_i = v_i \sin \theta_i$; $\dot{z}_i = v_i \cos \theta_i \sin \psi_i$.

Введем геометрическую модель БПЛА как сферу радиуса R (с некоторым запасом, учитывающим геометрию аппарата). Тогда безопасное расстояние $d_{ij}(t)$ между двумя летательными аппаратами будет

определяться величиной $d_{ij}(t) \geq 2R$. Для решения задачи образования заданного строя из случайно расположенного множества летательных аппаратов предлагается применить вычислительную схему на основе модифицированной ИНС Кохонена с набором метрик [Хачумов, 2013]. В результате работы нейронной сети для каждого БПЛА в группе строится свой безопасный маршрут движения, который он должен отработать с применением группы специальных правил.

2 Формирование опорного плана решения

Предложенная нейронная сеть [Хачумов, 2013] служит для решения задачи рационального перемещения БПЛА из заданного случайного размещения в целевое. Структура такой сети показана на Рис. 1.

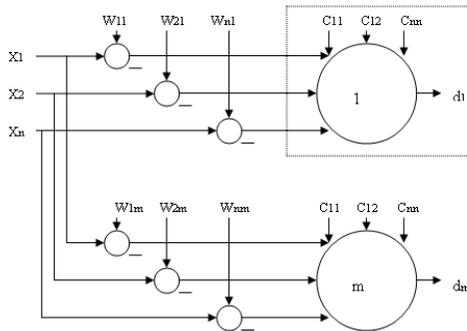


Рис. 1. Нейронная сеть Кохонена с универсальной метрикой

Структура универсальной сети Кохонена характеризуется наличием у каждого нейрона дополнительной памяти для хранения коэффициентов матрицы ковариаций c_{ij} , что необходимо при использовании альтернативных метрик измерения расстояния: Махаланобиса и Евклида-Махаланобиса [Хачумов, 2013].

Первый слой сети имеет три входа, что соответствует числу координат. Второй слой имеет n нейронов, что соответствует числу БПЛА. Начальные весовые коэффициенты сети устанавливаются следующим образом $(w_{1j}, w_{2j}, w_{3j}) = (x_j(0), y_j(0), z_j(0))$. Весовые коэффициенты настройки $(w_{1j}(t), w_{2j}(t), w_{3j}(t))$ определяют топологию сети в момент времени t и интерпретируются в сети Кохонена как значения координат БПЛА $(x_j(t), y_j(t), z_j(t))$. Затем осуществляется подача на вход сети в случайном порядке координат точек формации S . Эти координаты интерпретируются как входной вектор (x^s, y^s, z^s) . Для дальнейшего решения задачи

используется типовой алгоритм работы сети Кохонена, но с включением проверки на каждом шаге величины сближения БПЛА.

Алгоритм настройки сетевой модели

1. На вход сетевой модели подается очередной вектор. Для каждого нейрона j вычисляется расстояние Евклида между его вектором весов и входным вектором
2. Определяется нейрон-победитель с минимальным расстоянием d_j ;
3. Для нейрона-победителя производится модификация его весовых коэффициентов по правилу $w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \eta(t)(e_i(t) - w_{ij}(t))$, где: $w_{ij}(t)$ – значение весового коэффициента, связывающего вход i сети с нейроном j , $\eta(t)$ – норма обучения, $0 < \eta(t) \leq 1$, $e_i(t)$ – значение входа в момент времени t .
4. Осуществляется проверка безопасности. Если условие $d_{ij}(t) \geq 2R$, $\forall i, j$ выполнено, то происходит обновление весовых коэффициентов нейрона-победителя, что определяет его перемещение; иначе на данной итерации нейрон-победитель не рассматривается, перейти к п.2.
5. Перейти к п.1

При условии существования опорного плана его получение гарантируется. На каждой итерации происходит «подтягивание» выбранных БПЛА к целевым позициям, при этом шаг работы ИНС привязан к модельному (или реальному) времени. Все моменты времени, связанные с перемещениями БПЛА являются известными, что позволяет на каждом шаге определять местоположение всех объектов и расстояния между ними с учетом введенной геометрической модели. После того как траектории движения всех БПЛА получены, необходимо обеспечить их обработку с учетом ветровых возмущений и возможных коллизий.

3 Отработка траекторного движения в сложных условиях

Пусть эталонная траектория каждого летательного аппарата $b_i \in B$, $i = 1, \dots, N$ задана движением объекта $c_i \in C$, $C = \{c_1, \dots, c_N\}$, называемого далее «псевдоцель», и представлена последовательностью из M_i опорных точек (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}) , $j = 1, \dots, M_i$. Псевдоцель c_i осуществляет движение между соседними опорными точками траектории с эталонной скоростью $v_i^{(c)}$ и углами $\theta_{ij}^{(c)}$, $\psi_{ij}^{(c)}$, а БПЛА преследует ее, руководствуясь выбранной стратегией. На основе предыдущего этапа решения задачи известно желаемое время прохождения опорных точек

$t_{ij}^{(c)}$, $i = 1, \dots, N$, $j = 1, \dots, M$ и всего маршрута в целом $T_i^{(c)}$. В результате ветровой нагрузки возможно отклонение каждого летательного аппарата от своего маршрута, причем существенное, что может вызывать столкновение. Скорость v_i , углы тангажа θ_i и рыскания ψ_i БПЛА b_i устанавливаются системой управления в допустимых пределах.

Рассмотрим постановку задачи следования группы БПЛА по заданному маршруту. Пусть $B_i(t)$ и $C_i(t)$ – координаты БПЛА b_i и соответствующей цели c_i , а $d(B_i(t), C_i(t))$ – расстояние между ними в момент времени t . Задача заключается в построении такого управления для каждого БПЛА в группе $U_i(t) = (v_i(t), \theta_i(t), \psi_i(t))$ на временном отрезке $[0, T_i]$, что

$$\int_{t=0}^{T_i} d(B_i(t), C_i(t)) dt \rightarrow \min \quad \text{при ограничении: } d(B_i(t), B_j(t)) \geq 2R,$$

$\forall i, j, i \neq j$. Предлагается решение, основанное на действиях, имитирующих поведение пилота и заключающееся в выборе стратегий, реализуемых наборами правил в условиях установленных ограничений на управление и действующих возмущений [Abramov et al., 2015]. Рассмотрим некоторые стратегии управления БПЛА в группе.

Стратегия 1 (движение по точкам) для каждого БПЛА b_i заключается в коррекции движения по текущему отклонению от заданной траектории следования псевдоцели. При этом должны быть пройдены все точки с минимальным отклонением по времени $\Delta_i^{(T)} = |T_i - T_i^{(c)}| \rightarrow \min$.

Стратегия 2 (сближение с псевдоцелью) осуществляет «параллельное сближение» [Abramov et al., 2015] БПЛА с псевдоцелью и предполагает вычисление углов тангажа и рыскания для прогнозирования их места встречи. Точное прохождение БПЛА через опорные точки не требуется.

Приведем применяемые продукционные правила в порядке приоритета их исполнения:

Правило 1 (устранение опасного сближения): если расстояние $d(B_i(t), B_j(t)) < 2R$, то для b_i и b_j применить Стратегию 2.

Правило 2 (режим следования): если отклонение и время отработки отклонения для b_i и соответствующей псевдоцели c_i не превышает наперед заданных пороговых значений, то применить Стратегию 1.

Правило 3 (режим упреждения): если отклонение или время отработки отклонения для b_i и соответствующей цели c_i превышают пороговые значения, то применить Стратегию 2.

Ветровые нагрузки могут существенно влиять на траектории движения БПЛА, вызывая ситуации опасного сближения. Дополнительным путем их разрешения, кроме указанных выше правил, является применение

эвристических правил расхождения, аналогичных принятым в авиации и судоходстве. Правила более детально изложены в работе автора [Khachumov, 2018].

4 Экспериментальные исследования

Выполнено моделирование решения задачи формирования строя в группе БПЛА с учетом математических моделей летательных аппаратов, принятой стратегии решения задачи безопасного движения и ветровой нагрузки [Abramov et al., 2015]. На Рис 2. показаны траектории движения пяти БПЛА формирующих заданный строй в возмущенной воздушной среде.

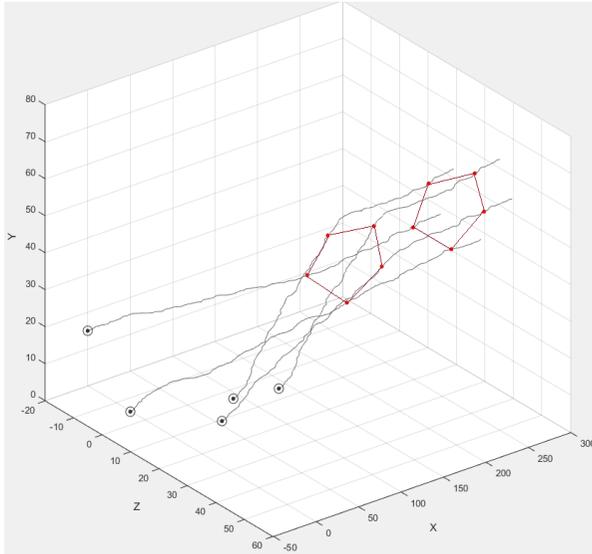


Рис.2. Формирование группой из пяти БПЛА заданного строя

Из рисунка видно, как БПЛА перемещаются в заданные позиции и формируют необходимый строй. Разработанная имитационная модель в системе MATLAB Simulink содержит специальный модуль интеллектуального управления, реализующий стратегии и правила управления для оперативного реагирования на изменения внешней среды.

Заключение

Рассмотрен подход к решению задачи безопасного формирования строя для группы беспилотных летательных аппаратов. На первом этапе

формируются эталонные траектории движения БПЛА, что подразумевает определение опорного плана перемещения для достижения назначенных позиций с применением ИНС Кохонена. На основе сетевой модели можно решать задачи формирования строя БПЛА и его реконфигурации, решать другие актуальные прикладные задачи. Для безопасного движения группы БПЛА по установленным траекториям предлагается подход, основанный на преследовании «псевдоцелей», с применением правил, направленных на снижение риска столкновений. Ожидается, что бортовые алгоритмы управления на основе предложенных стратегий и правил обеспечат приемлемую точность решения задачи безопасного формирования строя для небольших БПЛА при ветровых нагрузках.

Список литературы

- [**Андрейчук и др., 2016**] Андрейчук А.А., Яковлев К.С. Метод разрешения конфликтов при планировании пространственных траекторий для группы беспилотных летательных аппаратов // Третий Всероссийский научно-практический семинар «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта» (БТС-ИИ-2016, 22-23 сентября 2016 г., г. Иннополис, Республика Татарстан, Россия): Труды семинара. – М: Изд-во «Перо». 2016.
- [**Дьяченко, 2012**] Дьяченко А. А. Задача формирования строя в группе БПЛА // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2012. № 3(128).
- [**Иванов, 2016**] Иванов Д. Я. Методы построения пространственных формаций в группах беспилотных летательных аппаратов типа квадрокоптеров. – Дисс. канд. техн. наук, Таганрог: Южный федеральный университет. 2016.
- [**Хачумов, 2013**] Хачумов М.В. Сетевая модель кластерного анализа // Прикладная физика и математика. 2013. № 10.
- [**Abramov et al., 2015**] Abramov N. S., Makarov D. A., Khachumov M. V. Controlling flight vehicle spatial motion along a given route // Automation and Remote Control. 2015. № 6(76).
- [**Guzey, 2016**] Guzey H.M. Adaptive consensus based formation control of unmanned vehicles. – Doctoral dissertation, Missouri University of Science and Technology, 2016.
- [**Khachumov, 2018**] Khachumov M. V, Khachumov V.M. On the Safe Achieving the Required Formation Shape by Multiple UAVs (Planar Case) // Материалы Всероссийской конференции с международным участием “Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем” (16–20 апреля 2018, Москва, РУДН). 2018.
- [**Khachumov et al., 2018**] Khachumov M.V., Khachumov V.M. The model of UAV formation based on the uniform allocation of points on the sphere // MATEC Web Conf. 13th International Scientific-Technical Conference on Electromechanics and Robotics “Zavalishin’s Readings”, St. Petersburg, Russia. 2018.
- [**Xue et al., 2016**] Xue R. and Cai G. Formation flight control of multi-UAV system with communication constraints // Journal of aerospace technology and management. 2016. № 2(8).