

# Достижение консенсуса автономной группой беспилотных самолетов<sup>1</sup>

Н. О. Амелина<sup>2</sup>

Санкт-Петербургский государственный университет

natalia\_amelina@mail.ru

---

Рассматривается задача достижения консенсуса для автономной группы беспилотных летательных аппаратов с помощью формирования стратегии управления на основе виртуальной структуры.

*Ключевые слова:* достижение консенсуса, виртуальная структура, мультиагентные системы, стратегии управления, беспилотные летательные аппараты.

## 1. Введение

В последнее десятилетие среди различных направлений в развитии интеллектуальных систем навигации и управления на одно из ведущих мест выдвигаются исследования, объединяемые общим названием “мультиагентные системы” (или “многоагентные системы” — МАС), имеющие уже почти сорокалетнюю историю. Главными причинами такого интереса к мультиагентным системам являются современные достижения в области информационных технологий, распределенных информационных систем, компьютерных сетей и искусственного интеллекта. Мультиагентные системы интегрируют в себе самые передовые достижения перечисленных областей, демонстрируя принципиально новые качества. Одной из важных современных особенностей развития интеллектуальных систем является переход от классической логики и традиционных подходов инженерии знаний к новым адаптивным и самоорганизующимся системам.

Появлению мультиагентных адаптивных подходов предсказывают ведущую роль в ближайшие десятилетия в широком круге приложений среди интеллектуальных систем управления. МАС сейчас применяются в транспорте, логистике, графике, системах беспилотных летательных аппаратов и многих других [1].

За последние несколько лет появилось много работ на тему совместного управления распределенными сетевыми системами (на-

---

<sup>1</sup>Работа выполнена при частичной финансовой поддержке ФЦП “Кадры” (госконтракт №16.740.11.0042 от 01.09.2010).

<sup>2</sup>©Н. О. Амелина, 2010

пример, [2, 3]), где каждый агент работает автономно, используя информацию от других агентов, получаемую с помощью коммуникационной сети.

В статье будет рассмотрен алгоритм группового управления легкими беспилотными летательными аппаратами с целью достижения консенсуса с помощью формирования стратегии управления на основе виртуальной структуры, определение которой вводится по аналогии с [4].

## 2. Постановка задачи

Рассмотрим систему, состоящую из  $N$  взаимодействующих агентов  $s_1, s_2, \dots, s_N$ , между которыми существует информационная сеть, позволяющая агентам обмениваться информацией. Пусть агенты — легкие беспилотные летательные аппараты (БПЛА), точнее, легкие беспилотные самолеты.

**Предположение 1:** между каждым связанным  $i$ -м и  $j$ -м агентом ( $i \neq j$ ) существует информационная сеть, позволяющая им обмениваться информацией о состоянии агентов. Агенты взаимодействуют между собой в соответствии с графом потенциальных сетевых взаимодействий  $L$ .

Изначально агенты располагаются произвольно в пространстве. Цель — подавая на самолеты некоторое управление, сделать так, чтобы они образовали в пространстве заданную формацию (например, встали равносторонним треугольником, если система из трех самолетов, ромбом, если система из четырех самолетов и т. п.) и после этого двигались синхронно.

## 3. Модель движения самолета

Кинематическая модель движения  $i$ -го самолета выглядит следующим образом [5]:

$$\begin{cases} \dot{v}_i = a_i, & \dot{\theta}_i = \alpha_i/v_i, & \dot{\psi}_i = \beta_i/v_i, \\ \dot{x}_i = v_i \cos \theta_i \cos \psi_i \\ \dot{y}_i = v_i \sin \theta_i \\ \dot{z}_i = v_i \cos \theta_i \sin \psi_i \\ a_{\min} \leq a_i(t) \leq a_{\max}, & |\alpha_i(t)| \leq \alpha_{\max}, & |\beta_i(t)| \leq \beta_{\max}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $x$ ,  $z$  и  $y$  — геометрические координаты положения самолета в горизонтальной плоскости  $XOZ$  и по высоте, соответственно;  $v_i$  — модуль пространственной скорости  $i$ -го самолета;  $\psi_i$  — скоростной угол (между вектором скорости и горизонтальной плоскостью);  $\theta_i$  — путевой угол (направление проекции вектора скорости  $v$  на горизонтальную плоскость);  $a_i(t)$  — продольное ускорение  $i$ -го самолета (управление по скорости);  $\alpha_i(t)$  — вертикальное ускорение  $i$ -го самолета (управление движения по высоте);  $\beta_i(t)$  — боковое ускорение  $i$ -го самолета (управление по боковому каналу);  $a_{\min}$  и  $a_{\max}$ ,  $\alpha_{\max}$  и  $\beta_{\max}$  — геометрические ограничения на допустимые значения текущих управлений и их изменений во времени.

#### 4. Виртуальная структура

По аналогии с [4] для решения поставленной цели для каждого самолета можно ввести свой виртуальный самолет. Кинематическая модель  $i$ -го виртуального самолета описывается следующим образом:

$$\begin{cases} x_{ri} = x_i + x_{di} \cos \psi_i \cos \theta_i - y_{di} \cos \theta_i - z_{di} \sin \psi_i \cos \theta_i, \\ y_{ri} = y_i + x_{di} \cos \psi_i \sin \theta_i - y_{di} \sin \theta_i - z_{di} \sin \psi_i \sin \theta_i, \\ z_{ri} = z_i + x_{di} \sin \psi_i + z_{di} \cos \psi_i, \\ \theta_{ri} = \theta_i, \\ \psi_{ri} = \psi_i, \end{cases} \quad (2)$$

где  $x_{ri}, y_{ri}, z_{ri}$  — координаты центра масс  $i$ -го виртуального самолета,  $\psi_i$  — угол между вектором скорости и горизонтальной плоскостью,  $\theta_i$  — направляющий угол  $i$ -го виртуального самолета, а  $x_{di}, y_{di}, z_{di}$  — расстояния между  $i$ -ым виртуальным самолетом и  $i$ -ым реальным самолетом.

Производная (2) равна

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_{ri} \\ \dot{y}_{ri} \\ \dot{z}_{ri} \\ \dot{\theta}_{ri} \\ \dot{\psi}_{ri} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_i \\ B_\theta \\ B_\psi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_i \\ \alpha_i/v_i \\ \beta_i/v_i \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где

$$B_i = \begin{pmatrix} \cos \theta_i \cos \psi_i & -x_{di} \sin \psi_i \cos \theta_i - x_{di} \cos \psi_i \sin \theta_i + y_{di} \sin \theta_i & \\ & -z_{di} \cos \psi_i \cos \theta_i + z_{di} \sin \psi_i \sin \theta_i & \\ \sin \theta_i & -x_{di} \sin \psi_i \sin \theta_i + x_{di} \cos \psi_i \cos \theta_i - y_{di} \cos \theta_i & \\ & -z_{di} \cos \psi_i \sin \theta_i - z_{di} \sin \psi_i \cos \theta_i & \\ \cos \theta_i \sin \psi_i & x_{di} \cos \psi_i - z_{di} \cos \psi_i & \end{pmatrix},$$

$$B_\theta = (0 \ 1 \ 0),$$

$$B_\psi = (0 \ 0 \ 1).$$

Рассмотрим задачу формирования стратегии управления для систем с такой виртуальной структурой.

## 5. Задача достижения консенсуса

В сетевых системах консенсус означает достижение согласия относительно определенного количества интереса, который зависит от состояния динамических подсистем (агентов). Алгоритм достижения консенсуса, использующий теорию графов, рассматривался в [4, 6–8].

Для достижения цели нужно, чтобы все виртуальные самолеты сходились к общей позиции, то есть, необходимо гарантировать консенсус для позиций центра масс, скоростного и путевого угла виртуальных самолетов:

$$x_{ri} \rightarrow x_{rj}, y_{ri} \rightarrow y_{rj}, z_{ri} \rightarrow z_{rj}, \theta_{ri} \rightarrow \theta_{rj}, \psi_{ri} \rightarrow \psi_{rj} \quad (t \rightarrow \infty) \quad (4)$$

Такой консенсус принято называть *виртуальным консенсусом*.

**Лемма 1** [8]: *Рассмотрим Лапласиан  $L$  — сильно связанный ориграф размера  $N \times N$ . Если систему можно представить как:*

$$\dot{x} = -L_m x, \quad (5)$$

где  $x = (x_1^T x_2^T \dots x_N^T)^T \in \mathbb{R}^{Nm}$  — состояние всех систем и  $L_m = L \otimes I_m$ , **тогда** состояние  $x$  сходится к:

$$x \rightarrow (x_{r1} x_{l1}^T \otimes I_m) x(0) = \mathbf{1} \otimes \alpha \quad (t \rightarrow \infty), \quad (6)$$

где  $x_{r1}$ ,  $x_{l1}$  — правый и левый собственные векторы нулевого собственного значения  $L$  при  $x_{r1}^T x_{r1} = 1$  и  $x_{l1}^T \mathbf{1} = 1$ ,  $\otimes$  — Кронекерово произведение,  $\alpha \in \mathbb{R}^m$  — значение консенсуса и  $\mathbf{1} = (1 \ 1 \ \dots \ 1)^T$ .

Доказательство леммы приведено в статье [8].

По лемме 1 получается, что все состояния сходятся к общему значению  $\alpha$ :

$$x_1 = x_2 = \dots = x_N = \alpha. \quad (7)$$

## 6. Закон управления

Для достижения *виртуального консенсуса* в задачах 2D в [4] было предложено использовать следующий закон управления для  $i$ -го агента:

$$u_i = B_i^{-1}(-k \sum_{j \in N_i} (r_i - r_j) + r_d) \quad (8)$$

где  $u_i = [v_i \alpha_i/v_i \beta_i/v_i]^T$ ,  $r_i = [x_{ri} \ y_{ri} \ z_{ri}]^T$ ,  $N_i$  — множество соседей  $i$ -го самолета,  $r_d \in \mathbb{R}^3$  — постоянная относительная скорость, с которой самолеты двигаются после достижения консенсуса,  $k > 0$  — регулятор роста. В рассматриваемой в этой статье задаче в случае 3D также можно использовать этот же алгоритм.

## 7. Ближайшие планы

В [4] приведено несколько примеров моделирования рассмотренной стратегии управления для роботов-тележек на плоскости. По аналогии в ближайшее время будет составлен пакет программ для моделирования управления полетом группы легких самолетов. После получения положительных результатов планируется проведение полетных испытаний для апробации на практике возможностей группового взаимодействия с целью эффективного использовании энергии восходящих термических потоков [9].

## Список литературы

- [1] *Shoham Y., Leyton-Brown K.* Multiagent systems: Algorithmic, Game-Theoretic, and Logical Foundations. — Cambridge University Press. 2009
- [2] *Matveev A.S., Teimoori H., Savkin A.V.* The problem of target following based on range-only measurements for car-like robots // Joint 48th IEEE Conf. on Decision and Control and 28th Chinese Control Conf. December. 2009. P. 8537–8542.

- [3] *Ren W., Beard R. W., Atkins E.M.* A Survey of consensus problems in multi-agent coordination // Proc. Of American Control Conference. 2005. P. 1859–1864.
- [4] *Yoshioka C., Namerikawa T.* Formation control of nonholonomic multi-vehicle systems based on virtual structure // Proc. of the 17th World Congress IFAC. Seoul. Korea. July 6-11. 2008.
- [5] *Kumkov S.I.* Method of Informational Sets in Problems of Filtration, Identification and Control. — Tampere: Tampere international center for signal processing. Finland. March 2001.
- [6] *Yoshioka C., Namerikawa T.* Observer-based consensus control strategy for multi-agent system with communication time delay // Proc. of the 17th IEEE International Conference on Control Applications, Part of 2008 IEEE Multi-conference on systems and control. San-Antonio. Texas. USA. September 3-5. 2008.
- [7] *Olfati-Saber R., Fax A., Murray R.* Consensus and cooperation in networked multi-agent systems // in Proc. IEEE. Vol. 95. No. 1. 2007.
- [8] *Olfati-Saber R., Murray R.* Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays // IEEE Trans. Automatic Control. Vol. 49. No. 9. 2004. P. 1520–1532.
- [9] *Antal C., Granichin O., Levi S.* Adaptive autonomous soaring of multiple UAVs using SPSA // In Proc. of the 49th IEEE Conference on Decision and Control. December 15-17, 2010, Atlanta, GA. USA.