

УДК 519.71

# СИНХРОНИЗАЦИЯ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ «ПЕРЬЕВ» НА ПОВЕРХНОСТИ КРЫЛА В ТУРБУЛЕНТНОМ ВОЗДУШНОМ ПОТОКЕ

**К.С. Амелин**

*Санкт-Петербургский государственный университет*  
Россия, 198504, Санкт-Петербург, Университетский пр., 28  
E-mail: [konstantinamelin@gmail.com](mailto:konstantinamelin@gmail.com)

**Н.О. Амелина**

*Санкт-Петербургский государственный университет*  
*Институт Проблем Машиноведения РАН*  
Россия, 198504, Санкт-Петербург, Университетский пр., 28  
Россия, 199178, Санкт-Петербург, В.О., Большой проспект, 61  
E-mail: [natalia\\_amelina@gmail.com](mailto:natalia_amelina@gmail.com)

**О.Н. Граничин**

*Санкт-Петербургский государственный университет*  
*Институт Проблем Машиноведения РАН*  
Россия, 198504, Санкт-Петербург, Университетский пр., 28  
Россия, 199178, Санкт-Петербург, В.О., Большой проспект, 61  
E-mail: [oleg\\_granichin@mail.ru](mailto:oleg_granichin@mail.ru)

**Ю.В. Иванский**

*Санкт-Петербургский государственный университет*  
*Институт Проблем Машиноведения РАН*  
Россия, 198504, Санкт-Петербург, Университетский пр., 28  
Россия, 199178, Санкт-Петербург, В.О., Большой проспект, 61  
E-mail: [ivanskiy.yuriy@gmail.com](mailto:ivanskiy.yuriy@gmail.com)

**Ключевые слова:** мультиагентные системы, сенсорные сети, децентрализованное управление, турбулентность, самолет с «перьями», достижение консенсуса.

**Аннотация:** Миниатюризация и увеличение производительности вычислительных и исполнительных устройств и сенсоров открывают новые возможности интеллектуального управления сложными мехатронными системами при переходных процессах и в изменяющейся окружающей среде. В статье показано как самоорганизация сложной системы может быть использована для адаптации к изменениям структуры пространства состояний. В качестве примера рассматривается самолет с массивом «перьев» с сенсорами и исполнительными устройствами на поверхности крыла. Цель этой системы состоит в выравнивании возмущающих сил в условиях турбулентности при помощи мультиагентного протокола.

# 1. Введение

Технологический прорыв привел к ситуации, когда фундаментальные проблемы окружающего мира рассматриваются с точки зрения практических приложений. С уменьшением размера устройств, микро- и макро- среда стали доступны для исследования. Для широкого круга задач имеет смысл рассматривать модели с изменяющейся во времени структурой пространства состояний, вызывающей самоорганизацию внутренней структуры системы за счет коммуникации между структурными элементами в системе.

В последнее десятилетие проблемы взаимодействия в распределенных динамических сетях привлекают все больше внимания исследователей, поскольку оно находит все больше применений в распределенных системах управления электрическими сетями, в многопроцессорных системах, беспроводных, транспортных, производственных сетях, сетях датчиков, координации БПЛА и мобильных роботов и т. д. [1–4].

В [5] мультиагентная система использовалась для выравнивания турбулентного давления на поверхности самолета. Было предложено разместить массив мехатронных пластин («перьев») на поверхности крыла для контроля давления воздуха. В этой статье дается более подробная математическая модель крыла (в то время как [5] в большей степени фокусируется на физической модели выравнивания давления). Описан новый испытательный стенд с пластинами, соединенными по углам.

Статья имеет следующую структуру. Раздел 2. формализует постановку задачи. Алгоритм синхронизации «перьев» самолета предложен в разделе 3. Тестовый стенд рассматривается в разделе 4. Вывод приведен в разделе 5.

## 2. Стабилизация полета в зоне турбулентности

Предположим, что самолет с полной массой  $M$  летит со скоростью  $\mathbf{V}(t)$  из-за суммы действующих на него сил  $M \frac{d\mathbf{V}(t)}{dt} = \mathbf{F}_e - \mathbf{F}_d - \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_l$  где силы  $\mathbf{F}_e, \mathbf{F}_d, \mathbf{F}_g, \mathbf{F}_l$  — тяга двигателя, сопротивление воздуха сила, сила тяжести и подъемная сила соответственно. Если режим полета является стационарным, все силы уравновешены  $\mathbf{F}_e - \mathbf{F}_d - \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_l = 0$ , самолет движется по прямой с постоянной скоростью  $\mathbf{V}_0 = \text{col}(V_0, 0, 0)$ . Поток ветра над самолетом считается ламинарным и известен для заданной формы корпуса. Это означает, что распределение сил по поверхности корпуса также известно. Когда самолет попадает в турбулентный поток ветра, распределение сил меняется, баланс сил нарушается, полет становится нестационарным и возникает тряска  $\mathbf{V} = \mathbf{V}_0 + \mathbf{V}_1$ ,  $m \frac{d\mathbf{V}_1}{dt} = \mathbf{F}_1(t)$ . Помимо отклонений от заданной траектории из-за силы  $\mathbf{F}_1$ , приложенной к результирующей силовой точке  $\mathbf{r}^1(t)$ , момент силы  $\mathbf{M}_1(t) = [\mathbf{r}^1(t) \times \mathbf{F}_1(t)]$  вызывает нерегулярное вращение самолета вокруг центра масс, изменяя момент импульса  $\mathbf{L}_1(t) = [\mathbf{r}^1(t) \times m\mathbf{V}_1(t)]$  согласно закону  $\frac{d\mathbf{L}_1(t)}{dt} = \mathbf{M}_1(t)$ . Здесь и далее  $[\cdot \times \cdot]$  обозначает векторное произведение.

Для уменьшения тряски могут использоваться специальные элементы на поверхности корпуса, подобные перьям птиц. Предположим, что поверхность крыла самолета состоит из  $N$  подобных элементов («перьев»)  $a_1, \dots, a_N$ . Обозначим  $\mathbf{r}_i$  вектор из центра масс самолета в центр «пера»  $a^i$ . Каждый элемент оснащен датчиком давления (чувствительным к силе резистором), позволяющим измерять силу давления  $y_i$ , и привод  $u_i$  с двумя сервомеханизмами, позволяющими поворачивать пластину

в двух плоскостях, на *угол наклона*  $\alpha_i \in [\alpha^-, \alpha^+]$  в вертикальной плоскости и *угол поворота*  $\beta_i \in [\beta^-, \beta^+]$  в горизонтальной плоскости.

Интегральная воздушная сила, действующая на  $i$ -ый элемент с площадью  $S$ ,  $\mathbf{d}_i(t) = \mathbf{n}_i(t)C_d(\alpha_i(t), \beta_i(t))S\rho(v_i(t))^2/2$  имеет три компонента, которыми можно управлять с помощью перьев, имеющих три степени свободы (реакция пластины по нормали, два угла  $\alpha_i$  и  $\beta_i$ ), где  $\mathbf{n}_i(t)$  — вектор нормали к  $i$ -ой пластине,  $C_d(\alpha_i(t), \beta_i(t))$  — аэродинамический коэффициент  $i$ -й пластины, определяемый двумя углами  $\alpha_i(t), \beta_i(t)$ ;  $v_i(t)$  — величина скорости потока над  $i$ -ой пластиной на поверхности самолета в момент  $t$ . Сила  $\mathbf{d}_i(t)$  имеет три проекции: компонента вдоль оси  $x$  определяет сопротивление воздуха, вертикальная компонента определяет подъемную силу, третья — боковая компонента рыскания. Для поворота агента  $i$  можно использовать действие микроуправления  $u_i(t)$ .  $\dot{\alpha}_i(t) = u_i^{(1)}(t)$ ,  $\dot{\beta}_i(t) = u_i^{(2)}(t)$ . Действие макроуправления  $U_i(t)$  для агента  $i$  определяется мощностью двигателя самолета.

Предположим, что самолет движется в ламинарном воздушном потоке и в течение некоторого периода времени  $[t_0, t_1]$  интегральная воздушная сила, действующая на  $i$ -ый элемент («перо») является константой  $\mathbf{d}_i^0$  и все «перья» лежат на поверхности:  $\alpha^i = 0$  и  $\beta^i = 0$ .

Пусть  $x_i(t)$  — вектор состояния агента («пера»)  $i$ . Он состоит из 11 компонентов  $x_i^{(j)}(t)$ ,  $j = 1, 2, \dots, 11$ : 3 координаты, 3 скорости, 3 поворота и два угла. Предположим, что  $y_i(t) = \|\mathbf{d}_i(t)\|$  без ограничения общности. Пусть  $z_i(t) = \mathbf{d}_i(t) - \mathbf{d}_i^0$  отклонение интегральной воздушной силы от начального вектора  $\mathbf{d}_i^0$  в ламинарном потоке ветра, действующего на  $i$ -ый элемент. Для сил  $\mathbf{F}_e, \mathbf{F}_d, \mathbf{F}_g, \mathbf{F}_l$ , в ламинарном потоке ветра  $\mathbf{F}_e = \sum_{i \in \mathbb{N}} \theta_i^{(e,0)} U_i^{(1)} + m_{N+1} U_{N+1}^{(1)}$ ,  $\mathbf{F}_d = \sum_{i \in \mathbb{N}} \theta_i^{(d,0)} \mathbf{d}_i^0$ ,  $\mathbf{F}_g = \sum_{i \in \mathbb{N}} \theta_i^{(g,0)} g + m_{N+1} g$ ,  $\mathbf{F}_l = \sum_{i \in \mathbb{N}} \theta_i^{(l,0)} \mathbf{d}_i^0$ , где вводится дополнительный агент  $N+1$ , расположенный в центре масс с  $\mathbf{r}_{N+1} = 0$  and  $m_{N+1} = M - \sum_{i \in \mathbb{N}} \theta_i^{(g)}$  и  $\theta_i^{(e,0)} = \theta_i^{(g,0)} = m_i$  — масса агента,  $U_i^{(1)} = const$  — постоянная мощность двигателя, Коэффициенты  $\theta_i^{(d,0)}$  и  $\theta_i^{(l,0)}$  зависят от положения и ориентации агента на поверхности,  $g$  — гравитационная постоянная. В ламинарном потоке ветра, когда самолет движется вдоль прямой с постоянной скоростью  $V_0$ , динамика агента  $i$  описывается дифференциальными уравнениями  $\dot{x}_i^{(1)}(t) = V_0$ ,  $t \in [t_0, t_1]$ ,  $\dot{x}_i^{(j)}(t) = 0$ ,  $j = 2, 3, 6, \dots, 11$ ,  $\dot{x}_i^{(4)}(t) = \theta_i^{(e,0)} U_i^{(1)} - \theta_i^{(d,0)} \mathbf{d}_i^0 = 0$ ,  $\dot{x}_i^{(5)}(t) = \theta_i^{(d,0)} \mathbf{d}_i^0 - \theta_i^{(g,0)} g = 0$ ,  $y_i(t) = \|\mathbf{d}_i^0\|$ ,  $u_i(t) = 0$ ,  $U_i^{(1)}(t) = e$ ,  $U_i^{(j)}(t) = 0$ ,  $j = 2, 3$ , где постоянная  $e$  определяется мощностью двигателя.

В турбулентном потоке «перья» начинают подниматься и поворачиваться. Отклонения сил  $z_i(t)$  вызваны небольшими возмущениями ламинарного потока при поворотах пластин и турбулентным потоком вокруг них. Обозначим  $\mathbb{N}^i$  множество соседей пера  $i$  и предположим, что каждое перо  $i$  получает информацию о  $\mathbf{d}_j(t)$  и углах  $\alpha_j(t), \beta_j(t)$  for  $j \in \{i\} \cup \mathbb{N}^i$ . В результате синхронизации сил агенты получают примерно равные отклонения сил и образуют кластеры на поверхности самолета.

Предположим, что относительно оси движения самолета крылья имеют значительный размер в направлении, перпендикулярном движению и малый в продольном направлении, при этом размер корпуса самолета в перпендикулярном направлении тоже мал. При этих предположениях среди возмущающих сил  $z_i(t)$  действующих на всю поверхность самолета, только вертикальные и боковые проекции отклонений сил важны для задачи уменьшения тряски. Для возмущающей силы  $\mathbf{F}_1(t)$  имеем  $\mathbf{F}_1(t) = \sum_{i \in \mathbb{N}} z_i(t)$ . Для выравнивания отклоняющихся сил  $z_i(t)$  можно использовать действия микроуправления  $u_i(t)$ , если изменение турбулентного потока ветра происходит до-

статочно медленно, и до момента  $t_2$  он существенно не изменяется. Предположим, коррекция возможна в течение небольшого временного интервала  $\tau$ :  $t_1 + \tau < t_2$ . Получаем, что  $\mathbf{F}_1(t) = N\mathbf{z}^1 = \text{const}$  в течение временного интервала  $[t_1 + \tau, t_2]$ . Следовательно, для момента вращения имеем  $\mathbf{M}_1(t) = \sum_{i \in \mathbb{N}} [\mathbf{r}_i \times z_i(t)] = N[\sum_{i \in \mathbb{N}} \mathbf{r}_i \times \mathbf{z}^1]$ . Для однородного распределения перьев на симметричной корпусе  $\sum_{i=1}^n \mathbf{r}^i = 0$ , и  $\mathbf{M}_1 = 0$ . Таким образом, основной фактор, связанный с тряской, скомпенсирован выравниванием сил, действующих на разные перья. После выравнивания отклонений сил, вызванных турбулентным потоком ветра,  $\mathbf{F}_1 = \text{const}$ , поток над корпусом становится почти ламинарным, пока не изменится ветер. Из-за малой и постоянной силы  $\mathbf{F}_1$  траектория плоскости медленно изменяется в одном направлении и может быть скомпенсирована с помощью макроуправления  $U_i$ . Точнее, на временном интервале  $[t_1 + \tau, t_2]$  можно использовать следующую модель динамики агента  $\dot{x}_i(t) = f_i(x_i(t), \theta_i(t), u_i(t), U_i(t))$ ,  $y_i(t) = \|\mathbf{d}_i(t)\|$ . где параметры модели  $\theta_i(t)$  определяются силой  $\mathbf{F}_1$ , массой, положением, ориентацией и начальными параметрами движения в ламинарном потоке ветра.

### 3. Консенсусный алгоритм

Требуется синхронизировать агентов по выходам  $z_i(t)$ . При возможности напрямую управлять скоростями  $\dot{z}_i$ , можно было бы использовать протокол  $\dot{z}_i(t) = \gamma \sum_{j \in \mathbb{N}_i} b_{ij}(z_j - z_i)$ . Здесь  $B = (b_{ij})$  — неотрицательная взвешенная матрица смежности графа связи,  $\mathbb{N}_i = \{j : b_{ij} \neq 0\}$  — множество соседних узлов для узла  $i$ , а  $\gamma > 0$  — коэффициент усиления. Будем считать, что коммуникация является двунаправленной ( $b_{ij} = b_{ji}$ ) и граф связи является связным, что гарантирует экспоненциальную сходимость к консенсусу [7, 8]. В случае неориентированного графа протокол является алгоритмом градиентного спуска, примененным к функции «энергии»  $Q(\mathbf{Z}) = \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^N b_{ij} |z_j - z_i|^2$ . Однако протокол не может быть напрямую использован, поскольку фактическими входами управления являются скорости  $\dot{\alpha}_i$  и  $\dot{\beta}_i$ . Заметим, что  $\frac{\partial z_i^{(1)}}{\partial \alpha_i} = -y_i \sin(\alpha_i)$ ,  $\frac{\partial z_i^{(2)}}{\partial \alpha_i} = y_i \cos(\alpha_i) \cos(\beta_i)$ ,  $\frac{\partial z_i^{(1)}}{\partial \beta_i} = 0$ ,  $\frac{\partial z_i^{(2)}}{\partial \beta_i} = -y_i \sin(\alpha_i) \sin(\beta_i)$ ,  $\frac{\partial z_i^{(1)}}{\partial y_i} = \cos(\alpha_i)$ ,  $\frac{\partial z_i^{(2)}}{\partial y_i} = \sin(\alpha_i) \cos(\beta_i)$ . Рассмотрим алгоритм управления, эквивалентный упомянутому выше, и следовательно, экспоненциально сходящийся к консенсусу:

$$\begin{aligned} \dot{\alpha}_i &= - \left( \gamma \frac{\partial Q}{\partial z_i^{(1)}} + \frac{\partial z_i^{(1)}}{\partial y_i} \dot{y}_i \right) \left( \frac{\partial z_i^{(1)}}{\partial \alpha_i} \right)^{-1} = - \frac{\gamma}{y_i \sin(\alpha_i)} \sum_{j \in \mathbb{N}_i} b_{i,j} (z_j^{(1)} - z_i^{(1)}) + \frac{\dot{y}_i}{y_i} \cot(\alpha_i), \\ \dot{\beta}_i &= - \left( \gamma \frac{\partial Q}{\partial z_i^{(2)}} + \frac{\partial z_i^{(2)}}{\partial \alpha_i} \dot{\alpha}_i + \frac{\partial z_i^{(2)}}{\partial y_i} \dot{y}_i \right) \left( \frac{\partial z_i^{(2)}}{\partial \beta_i} \right)^{-1} = \frac{\dot{y}_i}{y_i} \frac{\cot \beta_i}{(\sin \alpha_i)^2} - \frac{\gamma}{y_i \sin(\alpha_i) \sin(\beta_i)} \sum_{j \in \mathbb{N}_i} b_{i,j} \times \\ &\times \left( (z_j^{(2)} - z_i^{(2)}) - \cot \alpha_i \cos \beta_i (z_j^{(1)} - z_i^{(1)}) \right), \text{ также } \dot{\alpha}_i = \dot{\beta}_i = 0, \text{ если } y_i = 0. \end{aligned}$$

Кроме того, можно оценить время, необходимое для достижения приближенного консенсуса  $|Q(\mathbf{Z}(t))| \leq \varepsilon$ . Оценка зависит от  $\varepsilon$ ,  $\gamma$ , значения  $\mathbf{Z}(t_1+)$  и характеристик графа. Точная формулировка приведена в [6],

### 4. Тестовый стенд

Для имитационных экспериментов используется летательный аппарат (планер), крылья которого оснащены  $N = 100$  мехатронными пластинами («перьями») для

выравнивания отклонений воздушных сил на разных участках крыла. Каждое «перо» оснащено датчиком давления (чувствительным к силе резистором). Пластины имеют квадратную форму и соединены с соседними пластинами в углах. Приводы (линейные сервомеханизмы) устанавливаются в точках соединения пластин так, что каждое «перо» соединяется с двумя приводами в противоположных углах (за исключением пластин, расположенных на краю крыла), и каждый привод соединяется с четырьмя углами пластин. Наклон и поворот каждого пера осуществляется путем изменения хода соответствующих сервомеханизмов.

Управление углами наклона и поворота перьев и сбор данных обеспечивается микроконтроллерами Arduino Mega 2560 R3. Временной шаг системы составляет  $h = 0.03$  с. Максимальное запаздывание исполнительного механизма составляет 0.006 с, частота датчиков — 100 Гц. Все данные с микроконтроллеров Arduino хранятся на главном компьютере для профилирования и визуализации. В экспериментах каждое «перо» выступает в роли агента и взаимодействует с четырьмя смежными агентами.

## 5. Заключение

В работе рассматривается задача выравнивания давления ветра, действующего на различные элементы поверхности самолета в турбулентном воздушном потоке. Предлагаемое решение заключается в использовании большого числа «перьев» на крыле самолета, которые можно поворачивать, изменяя углы наклона и поворота для выравнивания отклонений сил, действующих на них при изменившемся ветре от сил, действующих на соответствующие участки крыла в ламинарном потоке. Для этой цели применяется мультиагентный алгоритм управления массивом исполнительных механизмов на основе обратной связи, который использует только данные об отклонении давления воздушного потока на перо и об отклонениях на соседних перьях. Как показано в разделе 3., можно оценить время синхронизации, исходя из ряда предположений, что являются темой нашего будущего исследования.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (16-09-00057).

## Список литературы

1. Olfati-Saber R., Murray R. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays // IEEE Transactions on Automatic Control. 2004. Vol. 49, No. 9. P. 1520-1533.
2. Ren W., Beard R., Atkins E. Information consensus in multivehicle cooperative control // Control Systems. IEEE. 2007. Vol. 27, No. 2. P. 71-82.
3. Cooperative Control of Multi-Agent Systems: Optimal and Adaptive Design Approaches / Ed. by Lewis F., Zhang H., Hengster-Movric K., Das A. New York: Springer, 2014. 307 p.
4. Shen H., Li N., Griffiths H., Rojas S. Tracking control of a small unmanned air vehicle with airflow awareness // American Control Conference (ACC). 2017. P. 4153-4158.
5. Granichin O., Khantuleva T., Granichina O. Local voting protocol for the adaptation of airplane's "feathers" in a turbulence flow // American Control Conference (ACC). 2017. P. 5684-5689.
6. Граничин О.Н., Хантулева Т.А. Адаптация элементов крыла («перьев») самолета в турбулентном потоке с помощью мультиагентного протокола // Автоматика и телемеханика. 2017. № 10. С. 168-188.
7. Ren W., Beard R. Distributed consensus in multi-vehicle cooperative control: theory and applications. London: Springer, 2008. 319 p.
8. Agaev R., Chebotarev P. On the spectra of nonsymmetric laplacian matrices // Linear Algebra and its Applications. 2005. Vol. 399. P. 157-168.