

Т.Ю. ГАЙНУТДИНОВА,

канд. техн. наук
(КФУ, Казань),

А.В. ГАЙНУТДИНОВА,

М.В. ТРУСФУС,

аспирант,

В.Г. ГАЙНУТДИНОВ,

д-р техн. наук
(КНИТУ-КАИ, Казань)

tgainut@mail.ru

Модель формирования стаи

для автономных летательных аппаратов

Рассматривается модель коллективного движения автономных летательных аппаратов, самостоятельно выполняющих управляющие вычисления на бортовом компьютере, не имеющих управления из единого центра, но использующих информацию о местоположении соседних летательных аппаратов. Для численного моделирования полета каждого отдельного аппарата используются уравнения движения для квадрокоптера.

Модель коллективного движения, децентрализованное управление

Идея создания и управления роем летающих роботов возникла при наблюдении за стаями птиц. Движение объектов в стае имеет одну и ту же универсальную особенность: скорости соседних объектов становятся параллельными друг другу. Разработчики беспилотных аппаратов учли потенциальную полезность математических моделей, воспроизводящих групповые схемы полета, в управлении искусственными системами, например группой автономных летающих роботов. В таком полете каждый объект использует встроенные датчики для оценки своего пространственного положения и самостоятельно выполняет все управляющие вычисления с помощью бортового компьютера, т.е. система управления стаей является децентрализованной. Коллективное движение различных типов объектов определяется как следствие трех простых принципов [1]: 1) отталкивание на коротких дистанциях с целью избежать столкновений; 2) локальное взаимодействие (правило выравнивания) для выравнивания скорости соседних объектов; 3) предпочтительное глобальное позиционное ограничение с целью держать объекты вместе. Эти правила представляются в математической форме дискретной или непрерывной динамической системами, которые определяют эволюцию во времени скоростей каждого объекта в отдельности.

Простейшие модели стаи представляют правило выравнивания как явную математическую аксиому: каждый объект выравнивает свою скорость по отношению к вектору средней скорости объектов в окрестности [2]. К этому правилу добавляется связь ускорений [3], предпочтительных направлений [4] и адаптивных схем принятия решений для увеличения устойчивости при высоких скоростях [5]. В других моделях правило выравнивания является следствием сил взаимодействия [6] или скоростей, основанных на затухающей динамике [7].

При исследовании плавного коллективного движения стаи также анализируется устойчивость системы по времени реакции и возможная задержка в общении (передачи информации), наличие или отсутствие шумов сенсорных сигналов или непредсказуемые нарушения окружающей среды, например порывы ветра. Известно, например, что при наличии задержки по времени при обмене данными между объектами может возникнуть неустойчивость системы [8].

Для использования в расчетах бортового процессора принципов формирования стаи математическая модель должна быть не слишком сложной, но способной учесть различные особенности информационного взаимодействия объектов, например потерю информации о местоположении удалившегося объекта стаи, усиление или ослабление отталкивания-притяжения, выравнивания и т.п. Принципы ограничения предельных параметров и летных характеристик летательных аппаратов также могут быть применены при построении модели движения [9, 10].

Приведенные принципы полета стаи [1] могут быть определены следующими уравнениями:

$$\mathbf{v}_i = \mathbf{v}_i + W_{\text{att}} \left(\mathbf{x}_i - \sum_{S_{\text{sat}}} \mathbf{x}_j / n_{\text{att}} \right) W_{\text{rep}} \sum_{S_{\text{rep}}} (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j) / |\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j| + W_{\text{ali}} \left(\mathbf{v}_i - \sum_{S_{\text{ali}}} \mathbf{v}_j / n_{\text{ali}} \right); \quad (1)$$

$$\mathbf{x}_i(t + \Delta t) = \mathbf{x}_i(t) + \mathbf{v}_i \Delta t, \quad (2)$$

где $\mathbf{x}_i$ – вектор пространственных координат объекта; Δt – шаг по времени; W_{att} , W_{rep} , W_{ali} – коэффициенты усиления: $W_{\text{att}} \left(\mathbf{x}_i - \sum_{S_{\text{sat}}} \mathbf{x}_j / n_{\text{att}} \right)$ определяет условие глобального позиционного ограничения,

$W_{\text{rep}} \sum_{S_{\text{rep}}} (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j) / |\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j|$ – условие отталкивания на коротких расстояниях, $W_{\text{ali}} \left(\mathbf{v}_i - \sum_{S_{\text{ali}}} \mathbf{v}_j / n_{\text{ali}} \right)$ – условие выравнивания скорости по отношению к вектору средней скорости объектов в окрестности.

Простейшая модель (1), (2) не имеет механизма оценки изменения скорости i -го объекта под влиянием сближения или удаления соседних объектов, в ней не заложен механизм разделения-слияния стай.

Рассмотрим следующую модель, определяющую поведение объектов и подчиняющуюся основным принципам полета стаи

$$\mathbf{v}_i = \mathbf{v}_i + W_{\text{att}} \left(\mathbf{x}_i - \sum_N \mathbf{x}_j w_{ij}^{\text{att}} \right) W_{\text{rep}} \sum_N (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j) w_{ij}^{\text{rep}} + W_{\text{ali}} \left(\mathbf{v}_i - \sum_N \mathbf{v}_j w_{ij}^{\text{ali}} \right); \quad (3)$$

$$\mathbf{x}_i(t + \Delta t) = \mathbf{x}_i(t) + \mathbf{v}_i \Delta t, \quad (4)$$

где w_{ij}^{att} , w_{ij}^{rep} , w_{ij}^{ali} – переменные весовые коэффициенты, зависящие от функции величины r_{i-j} – расстояния между объектами j и i ; N – число объектов в стае. Для вычисления весовых коэффициентов используются соотношения вида $w_{ij} = (r_{i-j})^a$, где величина a может быть задана больше или меньше нуля ($a > 0$ или $a < 0$). При превышении расстояния между объектами i и j выше некоторого предельного значения $r_{i-j} \geq r_{\text{max}}$ можно принять $w_{ij} = 0$, исключив их влияние друг на друга.

Полет летающих роботов управляется с помощью алгоритмов низкого уровня, основанных на ПИД-регуляторах скорости, т.е. этот низкоуровневый алгоритм управления отдельного объекта применительно к данному случаю имеет на входе некоторое желаемое значение вектора скорости $\mathbf{v}_{i_req}$.

В программируемом полете величина $\mathbf{v}_{i_req}$ обычно определяется полетным заданием. Движение объектов в стае с использованием модели (3), (4) будет отличаться от движения по заданной программе тем, что каждый объект будет ориентироваться на достижение скорости $\mathbf{v}_{i_req}$, которая будет зависеть от начальных и изменяющихся в процессе полета скоростей ближайших объектов в стае. Общее движение будет развиваться в соответствии с основными принципами, определенными соотношениями (3), а не управлением из какого-то единого центра. Это подразумевает запрет на центральную обработку групповой динамики внешним компьютером, но позволяет использовать бортовые устройства, например GPS, для внешнего определения местоположения.

В качестве единичного объекта стаи примем мультикоптер (квадрокоптер), уравнения движения которого просты, а сам он способен двигаться в произвольных направлениях независимо от его ориентации в пределах разумного диапазона скоростей (включая зависание с нулевой скоростью).

Уравнения поступательного движения мультикоптера представим в нормальных земных координатах:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{Xg} &= X_g / m - \frac{V_{Zg}^2}{R} \operatorname{tg} \varphi - \frac{V_{Xg} V_{Yg}}{R} - 2\Omega V_{Zg} \sin \varphi; \\ \dot{V}_{Yg} &= Y_g / m + \frac{V_{Zg}^2}{R} + \frac{V_{Xg}^2}{R} + 2\Omega V_{Zg} \cos \varphi - g; \\ \dot{V}_{Zg} &= Z_g / m - \frac{V_{Zg} V_{Yg}}{R} + \frac{V_{Xg} V_{Zg}}{R} \operatorname{tg} \varphi - 2(V_{Yg} \Omega \cos \varphi - V_{Xg} \Omega \sin \varphi), \end{aligned} \quad (5)$$

где $\dot{V}_{Xg}$, $\dot{V}_{Yg}$, $\dot{V}_{Zg}$ – ускорения относительного движения; Ω , R – угловая скорость вращения и радиус Земли; φ – географическая широта; V_{Xg} , V_{Yg} , V_{Zg} – компоненты скорости относительного движения;

g – ускорение силы тяжести; m – масса мультикоптера. Компоненты сил в земной системе координат X_g, Y_g, Z_g определяются произведением суммарной тяги всех воздушных винтов T на соответствующие элементы матрицы косинусов: $(X_g, Y_g, Z_g) = T(C_{21}, C_{22}, C_{23})$ (матрица косинусов $[C_{ij}]$ определяет связь между нормальной земной и связанной системами координат).

Уравнения вращательного движения представлены в связанных осях

$$\begin{aligned}\dot{\omega}_1 &= [-J_{12}(\omega_2 - \omega_1\omega_3) - (J_3 - J_2)\omega_2\omega_3 + M_1]/J_{11}; \\ \dot{\omega}_2 &= [-J_{12}(\omega_1^2 - \omega_1\omega_3) - (J_1 - J_3)\omega_1\omega_3 + M_2]/J_{22}; \\ \dot{\omega}_3 &= [-J_{12}(\omega_1^2 - \omega_2\omega_3) - (J_2 - J_1)\omega_1\omega_2 + M_3]/J_{33},\end{aligned}\quad (6)$$

где M_i – моменты, создаваемые подъемными воздушными винтами; J_{ij} – моменты инерции мультикоптера; ω_i – компоненты угловой скорости вращения.

Моменты M_i определяются следующими соотношениями:

$$M_1 = -\sum_{i=1}^4 T_i(z_i - z_{\text{цм}}), \quad M_2 = \mu \sum_{i=1}^4 T_i(-1)^{i-1}, \quad M_3 = \sum_{i=1}^4 T_i(x_i - x_{\text{цм}}), \quad (7)$$

где T_i – тяга i -го винта; x_i, z_i – координаты осей винтов в плоскости $X-Z$; $x_{\text{цм}}, z_{\text{цм}}$ – координаты центра масс квадрокоптера; μ – коэффициент осевого момента воздушного винта.

Составляющие относительной скорости движения аппарата определяются интегрированием ускорений относительного движения:

$$V_{Xg} = V_{Xg}(t_0) + \int_{t_0}^t \dot{V}_{Xg} dt; \quad V_{Yg} = V_{Yg}(t_0) + \int_{t_0}^t \dot{V}_{Yg} dt; \quad V_{Zg} = V_{Zg}(t_0) + \int_{t_0}^t \dot{V}_{Zg} dt. \quad (8)$$

Местоположение объекта определяется с помощью вторичного интегрирования:

$$\varphi(t) = \varphi(t_0) + \int_{t_0}^t \frac{V_{Xg}}{R} dt; \quad \lambda(t) = \lambda(t_0) + \int_{t_0}^t \frac{V_{Zg}}{R \cos \varphi} dt; \quad h(t) = h(t_0) + \int_{t_0}^t V_{Yg} dt. \quad (9)$$

Для приближения к реальности при численном моделировании эволюции стаи динамическая модель (5) – (7) для управления отдельным объектом используется как источник данных, фиксируемых сенсорами на реальном аппарате (акселерометрами, датчиками угловых скоростей, магнитометрами, датчиками высоты (лазерный дальномер или барометрический датчик), воздушной скорости и т.д.). К расчетным данным можно добавить шумы, используя генератор случайных чисел. Счисление пути и пространственное угловое положение объекта вычисляется так же, как и с помощью программы бортового процессора с коррекцией расчетов по данным GPS.

Для проведения расчетных исследований была создана программа расчета движения определенного количества квадрокоптеров ($N \leq 125$) с одинаковыми характеристиками. Были проведены расчеты по подбору показателя степени α , отвечающего за притяжение-отталкивание при вычислении весовых коэффициентов $w_{ij} = (r_{i-j})^\alpha$ для каждой из трех групп w_{ij}^{att} , w_{ij}^{rep} , w_{ij}^{ali} и соответствующих коэффициентов усиления W_{att} , W_{rep} , W_{ali} .

Расчетные исследования показали, что модель формирования стаи (3) с переменными весовыми коэффициентами w_{ij} , зависящими от расстояния окружающих объектов до произвольного i -го объекта $w_{ij} = (r_{i-j})^\alpha$, можно настроить на получение разных форм коллективного движения независимых летательных аппаратов вплоть до направленного. При вычислении весовых коэффициентов w_{ij} возможно моделировать ситуации потери информации о местоположении удалившихся на значительное расстояние

объектов или случайной ее потери. Возможно провести анализ влияния коэффициентов усиления W_{att} , W_{rep} , W_{ali} на продолжительность эволюции от начального (хаотичного) в конечную форму коллективного движения.

На рис. 1, 2 показаны две характерные формы коллективного движения при введении определенных ограничений на максимальную и минимальную скорость движения автономных объектов. Рис. 1, *а* демонстрирует стартовую (хаотичную) форму, рис. 1, *б* – конечную (коллективную) форму. На рис. 1, *в* показаны изменения пространственных координат «центра масс» стаи в процессе эволюции. Данная форма коллективного движения была получена введением ограничения на минимальную и максимальную скорость движения объектов $0,5V \leq \|v_i\| \leq V$.

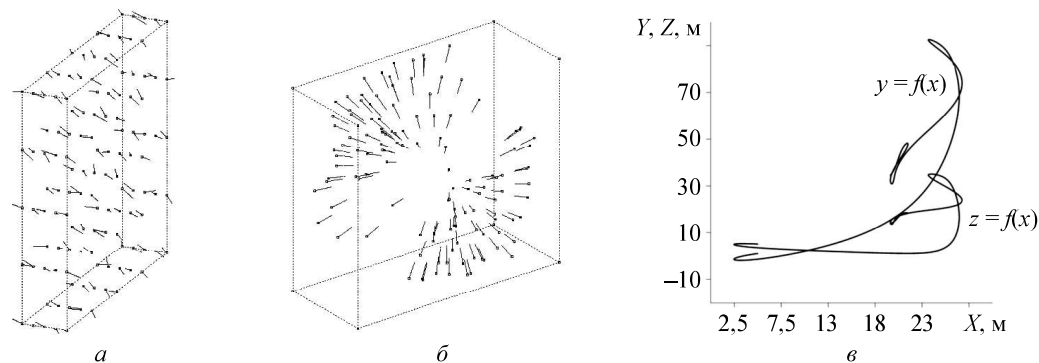


Рис. 1

Ослаблением ограничений по скорости можно «организовать» коллективное направленное движение стаи. На рис. 2, *а* показаны стартовая (хаотичная) форма стаи, на рис. 2, *б* – конечная (коллективная). Изменение пространственных координат «центра масс» стаи в процессе эволюции иллюстрирует рис. 2, *в*.

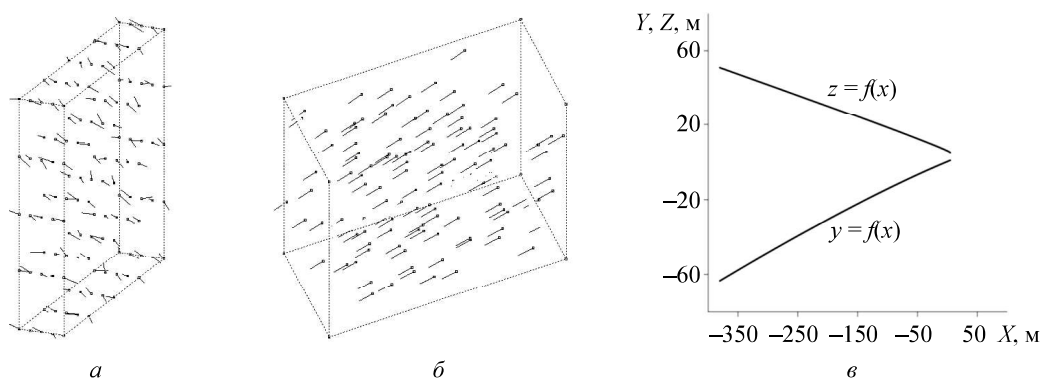


Рис. 2

Таким образом, модель формирования стаи (3) с использованием весовых коэффициентов, представленных функцией $w_{ij} = (r_{i-j})^a$ величин r_{i-j} – расстояния между объектами стаи, – позволяет проводить настройку параметров модели на получение разных форм коллективного движения автономных летательных аппаратов в стае. С помощью модели возможен учет выборочной (или случайной) временной потери связи при превышении некоторого предельного расстояния между объектами и проведение расчетных исследований влияния этой потери связи на характер эволюции движения объектов в стае.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Reynolds C.W. Flocks, Herds and Schools: A Distributed Behavioral Model // ACM SIGGRAPH Computer Graphics. 1987. Vol. 21. Iss. 4. P. 25–34.
2. Vicsek T. et al. Novel Type of Phase Transition in a System of Self-Driven Particles // Physical Review Letters. 1995. Vol. 75. Iss. 6. P. 1226–1229.
3. Szabo P., Nagy M., Vicsek T. Transitions in a Self-Propelled-Particles Model with Coupling of Accelerations // Physical Review E. 2009. Vol. 79. Iss. 2. Article № 021908.

4. Couzin I.D. et al. Effective Leadership and Decision-Making in Animal Groups on the Move // Nature. 2005. Vol. 433. P. 513–516.
5. Dong H., Zhao Y., Gao S. A Fuzzy-Rule-Based Couzin Model // Journal of Control Theory and Applications. 2013. Vol. 11. Iss. 2. P. 311–315.
6. Grossman D., Aranson I.S., Jacob E.B. Emergence of Agent Swarm Migration and Vortex Formation through Inelastic Collisions // New Journal of Physics. 2008. Vol. 10. Iss. 2. Article № 023036.
7. Szabo B. et al. Phase Transition in the Collective Migration of Tissue Cells: Experiment and Model // Physical Review E. 2006. Vol. 74. Iss. 6. Article № 061908.
8. Forgoston E., Schwartz I.B. Delay-Induced Instabilities in Self-Propelling Swarms // Physical Review E. 2008. Vol. 77. Iss. 3. Article № 035203.
9. Ефремов А.В., Кошелев А.В., Тяглик М.С. Совершенствование методики и средств полунатурного моделирования при исследовании задач ручного управления летательными аппаратами // Изв. вузов. Авиационная техника. 2015. № 4. С. 31–37.
10. Петунин В.И., Неугодникова Л.М. Принципы построения систем ограничения предельных параметров летательных аппаратов // Изв. вузов. Авиационная техника. 2019. № 1. С. 31–38.

Поступила в редакцию 10.06.19

После доработки 23.01.20

Принята к публикации 23.01.20

Flocking Model for Autonomous Aircraft

T.YU. GAINUTDINOVA¹, A.V. GAINUTDINOVA², M.V. TRUSFUS²,
AND V.G. GAINUTDINOV²

¹ Kazan (Volga region) Federal University, Kazan

² Tupolev Kazan Nation Research Technical University, Kazan

A model is considered of collective motion of autonomous aircraft, which independently perform on-board control calculations, have no control from a single center, but use the information about the neighbor aircraft location. For the numerical simulation of flight for each autonomous aircraft, the equations of motion for a quadcopter are used.

Model of collective motion, decentralized control