Два подхода к моделированию группового полета беспилотных аппаратов как системы с сосредоточенными и распределенными параметрами

Д.А. Миляков[1], В.С. Верба[1], В.И. Меркулов[1], А.С. Пляшечник[1]

[1]Концерн радиостроения «Вега», Кутузовский проспект 34, Москва, Россия, 121170

Аннотация. При использовании групп БЛА для решения различных задач необходимо формировать управление, обеспечивающее сбор группы с построением требуемой топологии, а также управление каждым БЛА в рамках решения общей задачи и предотвращения столкновений в группе. В работе рассмотрены теоретические и практические особенности моделирования задачи управления большой плотной группой БЛА при выводе ее на различные варианты требуемой топологии с использованием двух возможных подходов. Первый – традиционный – основан на рассмотрении группы БЛА как совокупности отдельных участников (системы с сосредоточенными параметрами), для каждого из которых формируется управление, обеспечивающее как решение общей задачи, так и предотвращение столкновений внутри группы. Второй – предлагаемый – основан на рассмотрении группы БЛА как системы с распределенными параметрами, являющимися функциями времени и пространственных координат. Основой этого может служить рассмотрение задач кинематики и динамики для систем невзаимодействующих близко расположенных частиц. Исследования показали возможность использования предлагаемого подхода. Отмечены его достоинства и недостатки.

1. Введение

Массовое применение беспилотных летательных аппаратов (БЛА) различного назначения обеспечивает получение целого ряда преимуществ при решении различных задач [1]. При этом появляется возможность реализовать целый комплекс новых приемов, среди которых можно выделить, например, использование в качестве временных активных фазированных антенных решеток больших размеров на базе мультикоптеров для реализации больших дальностей действия РЛС [2]. Новые возможности больших групп БЛА [3] определяются не только количеством участников, но и топологией группы и поведением участников внутри нее. В связи с этим эффективность применения больших групп БЛА определяется способностью систем управления обеспечить построение требуемой топологии группы, ее перемещение в пространстве и поведение участников внутри группы.

Общим для всех видов больших групп является необходимость решения следующих задач:

- сбора группы с формированием требуемой топологии;
- обеспечения управления пространственным положением как всей группы, так и отдельными участниками внутри нее при незначительных расстояниях между ними;
- информационного обеспечения алгоритмов управления отдельными участниками.

Наибольшую сложность представляет формирование требуемых законов управления и их информационного обеспечения для плотных групп БЛА, расстояние между которыми сравнимо с разрешающей способностью средств их обнаружения. Законы управления такими группами должны обеспечивать не только реализацию целевого назначения группы, но и предотвращение столкновений участников между собой.

Задача согласованного управления плотной группой может быть решена в рамках двух подходов.

Первый подход является классическим и заключается в рассмотрении группы как совокупности отдельных объектов, для каждого из которых как объекта управления формируются свои модель состояния и сигналы управления. Однако в приложении к большим и плотным группам объектов возникает проблема обеспечения их управляемости в реальном масштабе времени. Ее решение достигается за счет различных упрощений, например, разбиений больших групп на подгруппы, численность которых не превышает граничного значения, при котором выполняется условие их управляемости. Такие группы принято называть кластерами. После проведения кластеризации задача управления действиями большой группы БЛА может выполняться в каждом отдельном кластере с учетом некоторых координирующих условий.

Второй подход связан с рассмотрением группы объектов как системы с распределенными во времени и пространстве параметрами.

В работе рассмотрены преимущества и недостатки обоих подходов при управлении многочисленной плотной группой БЛА.

2. Групповое управление БЛА как совокупностью отдельных объектов

Особенность управления группой БЛА при решении различных задач заключается в ее рассмотрении как системы, состоящей из отдельных объектов с сосредоточенными параметрами, в общем случае являющимися функциями времени. Такой подход наиболее очевиден и достаточно хорошо проработан, что подтверждается представительным количеством публикаций на данную тему, представленными в [4,5].

Независимо от выбранного способа управления приходится решать ряд теоретических задач, к которым прежде всего относятся:

- сложность формализации описания большой группы как объекта коллективного и индивидуального управления с формулировкой коллективного функционала качества;
- высокая размерность решаемых задач управления и информационного обеспечения, делающая практически невозможным применение классического аппарата оптимального управления и оценивания;
- сложности адаптации общих решений к конкретным задачам (мониторинг, приманка, ложные цели, ударные задачи);
- трудности управления информационными потоками внутри группы.

Примером решения этих задач являются законы управления, полученные в [6], обеспечивающие групповое управление с предотвращением столкновений внутри группы на основе локальной оптимизации с использованием индивидуальных моделей состояния.

Устойчивая тенденция увеличения числа БЛА в группе предопределяет дальнейшее возрастание сложности формирования управления.

3. Групповое управления БЛА как системой с распределенными параметрами

Новым подходом к управлению большими и плотными группами БЛА является использование математического аппарата управления системами с распределенными параметрами (СРП) [7,8], являющимися функциями времени и пространственных координат. В основе подхода лежит рассмотрение системы невзаимодействующих близко расположенных частиц [9]. В связи с этим предлагается рассмотреть многочисленную группу плотно расположенных БЛА как систему элементов, которую можно назвать средой БЛА. Состояние этой среды характеризуется функцией состояния, параметрами которой являются координаты и время.

Такая постановка задачи предопределяет необходимость использования положений математической и статической физики для получения уравнений, характеризующих соотношения между характеристиками среды БЛА. В рамках такого подхода для среды БЛА в [4] были введены специальные функции времени и координат (внутреннего потенциала среды для определения взаимодействия БЛА между собой, плотности среды, давления в среде как функцию ее плотности для определения связности элементов среды и их взаимодействия в отсутствие внешнего воздействия). Соотношения, описывающие закон изменения импульса среды, получаются при рассмотрении всех найденных сил, действующих на элемент среды, ограниченный элементарным объемом. Использование элементов теории управления СРП позволяет получить для такой системы решение задачи управления всей средой БЛА.

В отличие от классического индивидуального управления оператором каждым БЛА, предполагающего наличие каналов связи (линии передачи команд управления) «оператор-БЛА», при таком подходе реализуется унифицированное управление всей средой БЛА целиком. При этом каждый БЛА самостоятельно формирует свой сигнал управления, чем исключается необходимость организации дополнительного канала связи для управления. В [5] обозначены причины, обусловливающие сложность формирования управления такой системой.

В работе в качестве иллюстрации возможности моделирования управления группой БЛА как СРП рассмотрены варианты построения топологий, заданных неподвижным и подвижным отрезками, кольцом и сферой.

4. Пример

В [5] для малого (расчетного) объема ΔV элемента среды линейными размерами Δx, Δy, Δz, плотностью ρ и массой Δm=const, на который действует внешняя сила с потенциальной составляющей (представленной градиентом ∇U внутреннего потенциала и обусловленной взаимодействием с соседними элементами среды) и управляющей составляющей (обусловленной реализацией искомого вектора управления **u** при решении поставленной задачи) его движение в пространстве со скоростью $\mathbf{v}(t)$ получено в виде

$$\mathbf{a} = \nabla U - \frac{1}{\rho}\nabla P + \mathbf{u}, \tag{1}$$

где **a** – вектор полного ускорения элемента среды БЛА, ∇P – градиент давления $P(\rho)$ на элемент среды, а его масса Δm и плотность ρ определяются соотношениями

$$\Delta m = m_{\text{БЛА}} \cdot \Delta N, \;\; \rho = \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{m_{\text{БЛА}} \cdot \Delta N}{\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z},$$

где $m_{\text{БЛА}}$ – условная масса единичного БЛА, ΔN – их количество в элементе среды с центром в точке с координатами (x,y,z).

Таким образом, для среды БЛА в момент времени t в точке с координатами (x,y,z), состояние которой характеризуется функциями плотности $\rho(t,x,y,z)$, внутреннего потенциала $U(x,y,z)$, давления $P(\rho)$, закон движения малого элемента среды определяется (1), или в виде системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{p}} = \mathbf{v}; \\ \dot{\mathbf{v}} = \nabla U - \dfrac{1}{\rho}\nabla P + \mathbf{u}, \end{cases} \tag{2}$$

где $\mathbf{p}=[x\ y\ z]^{\mathrm{T}}$ - вектор координат , $\mathbf{v}=[v_x\ v_y\ v_z]^{\mathrm{T}}$ - вектор скорости их изменения;

$$\nabla U = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial U}{\partial x} & \dfrac{\partial U}{\partial y} & \dfrac{\partial U}{\partial z} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}, \nabla P = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial P}{\partial x} & \dfrac{\partial P}{\partial y} & \dfrac{\partial P}{\partial z} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}, \mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_1 & u_2 & u_3 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}. \tag{3}$$

Тогда для декартовой системы координат с ортами (**i**,**j**,**k**) с учетом (3) система (2) может быть представлена в виде:

$$
\begin{cases}
\dfrac{d\mathbf{p}}{dt} = \mathbf{v}, \\
\dfrac{d\mathbf{v}}{dt} = \left(\dfrac{\partial U}{\partial x} - \dfrac{1}{\rho}\dfrac{\partial P}{\partial x} + u_x \right)\mathbf{i} + \left(\dfrac{\partial U}{\partial y} - \dfrac{1}{\rho}\dfrac{\partial P}{\partial y} + u_y \right)\mathbf{j} + \left(\dfrac{\partial U}{\partial x} - \dfrac{1}{\rho}\dfrac{\partial P}{\partial z} + u_z \right)\mathbf{k}.
\end{cases} \tag{4}
$$

Таким образом, задача управления группой БЛА может быть сформулирована в следующем виде: для группы БЛА, состояние которой задается системой (4), необходимо найти закон управления, обеспечивающий построение требуемой топологии и ее целенаправленное перемещение в пространстве без столкновений при условии, что выполняются заданные ограничения на сигналы управления и расстояния между БЛА. При этом формируется закон описания требуемой топологии аналитическими уравнениями (системой уравнений), позволяющими разрешить их относительно координат.

Внутренний потенциал U в (4) может быть выбран эмпирически, исходя из желаемого типа внутреннего взаимодействия в среде. Пример - многочастичный потенциал [9], представляющий взаимодействие частиц в различных средах. Первый тип такого потенциала, используемый в расчетах и компьютерном моделировании различных многосоставных систем, является парным (двухчастичным) потенциалом Леннард-Джонса (потенциал «6-12») [10,11] и в простейшем случае имеет вид

$$
U_j(r) = \sum_{\substack{i=1 \\ j \neq i}}^{N} \left(\frac{A}{r_{ji}^{12}} - \frac{B}{r_{ji}^{6}} \right), \tag{5}
$$

где r_{ji} – расстояние между центрами j-й частицы и каждой «соседней» i-й частицы; A – коэффициент, характеризующий отталкивание частиц на малых расстояниях; B – коэффициент, характеризующий притяжение частиц на больших расстояниях; N – обще число частиц, и имитирует взаимодействие в режиме «притяжение-отталкивание» несталкивающихся молекул идеального газа без учета влияния остальных молекул.

Следует отметить, что в случае идеального газа зависимости $P(\rho)$ и, соответственно, $\nabla P(\rho)$ являются линейными:

$$
P(p)*\rho, \nabla P * \nabla \rho
$$

что является удобным при вычислении ∇P для (6).

Второй тип внутреннего потенциала для (4) может быть задан законом

$$
U_j(r) = \sum_{\substack{i=1 \\ j \neq i}}^{N} C_j \exp\left(-\frac{r_{ji}}{r_0} \right) \frac{\mathbf{r}_{ji}}{r_{ji}^2}, \tag{6}
$$

где C_j - константа; $\mathbf{r}_{ji}$ – вектор, соответствующий расстоянию r_{ji} аналогично (5), r_0 – условное расстояние, обусловленное расталкиванием соседних частиц. При этом r_0 может быть выбрано с использованием соотношения

$$
r_0 \sim \frac{L}{\sqrt{N}}, \left(r_0 = \frac{L}{\sqrt{N}} \frac{1}{p}, \; p \in \mathbb{N} \right),
$$

где L – длина некоторой окружности, на которой равномерно с некоторой плотностью ρ распределены N частиц. Здесь для определения плотности ρ в точке, являющейся центром расположения j-й частицы, в может быть использовано выражение

$$
\bar{\rho}_j(r) = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^{N} F(r - r_k),
$$

где функция $F(r)$ может быть определена по формуле

$$
F(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi r_0}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right),
$$

и обладает следующим свойством нормировки:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} F(r)\,\mathrm{d}r = 1.$$

С использованием введенных функций $\bar{\rho}_j(r)$ и $F(r)$ можно записать следующие выражения для их использования в (4):

$$\nabla\rho = \frac{\bar{\rho}_+ - \bar{\rho}_-}{2r_0},\ \bar{\rho}_- = \bar{\rho}(r - r_0),\ \bar{\rho}_+ = \bar{\rho}(r + r_0).$$

При исследовании управления средой БЛА в рамках решения задачи вывода исходной конфигурации группы БЛА в топологию типа «отрезок», «круг» и «сфера» было проведено моделирование исходной задачи в два этапа. При этом задавалась некоторая ε-окрестность топологии, определяющая качество решения задачи. Нахождение всех БЛА в пределах этой ε-окрестности свидетельствует о том, что задача решена.

Первый этап моделирования был посвящен исследованию соотношений (3)-(5). В качестве примера управлением **u** каждым элементом среды был выбран градиентный закон

$$\mathbf{u}(r) = \nabla\left\|\mathbf{p} - \mathbf{r}_{\text{топ}}\right\|, \tag{7}$$

оптимальный по критерию минимума времени выхода среды на требуемую топологию, заданную радиус-вектором $\mathbf{r}_{\text{топ}}$.

Некоторые результаты исследований первого этапа, представленные в [4,5] для топологий «статический отрезок», «подвижный отрезок», «кольцо», «сфера», свидетельствуют об успешном решении задачи, демонстрируя при этом проявление детерминированного хаоса [12] динамической системы (4). В процессе полета БЛА внутри группы не сталкиваются между собой и не разлетаются за счет учета в (5) взаимодействие каждого БЛА со своими «соседями».

На втором этапе моделирования внутренний потенциал имел вид (6), а при управлении средой БЛА использовался принцип динамического торможения за счет «трения», суть которого заключается в том, что полный вектор $\mathbf{a}_j$ ускорения каждого j-го БЛА среды формируется по-разному на двух участках (см. (8)). Первый участок связан с торможением среды с ускорением $\mathbf{a}_{1j}$ при ее приближении к требуемой топологии, а на некотором заранее заданном расстоянии от каждого j-го БЛА до требуемой топологии начинает преобладать второй участок, связанный с распределением среды вдоль требуемой топологии по закону $\mathbf{a}_{2j}$:

$$\dot{\mathbf{a}}_{1j} = -\alpha\left(\mathbf{v}_j - \left(\mathbf{v}_j, \mathbf{r}_0\right)\mathbf{r}_0\right),\ \dot{\mathbf{a}}_{2j} = -\left(\mathbf{r}_0, \mathbf{v}_j\right)\mathbf{r}_0 \frac{a_{\max}}{v_{\max}}(1 - \beta). \tag{8}$$

Здесь коэффициент α торможения выбирается эвристическим образом; $\mathbf{v}_j$ – вектор скорости j-го БЛА; $a_{\max}$ и $v_{\max}$ – максимально допустимые ускорения и скорости соответственно для каждого j-го БЛА; β – коэффициент близости текущего распределения среды на требуемой топологии к требуемому, вычисляемый по правилу:

$$\beta = \operatorname{sign}\left(\bar{\rho}_+ - \bar{\rho}_-\right)\frac{\min\left(\left|\bar{\rho}_+ - \bar{\rho}_-\right|, \rho_{\text{т}}\right)}{\rho_{\text{т}}},$$

где $\rho_{\text{т}}$ – требуемая плотность распределения среды БЛА по требуемой топологии.

Рисунки 1-5 иллюстрируют решение задачи вывода группы БЛА на окружность, отрезок и сферу группы из 30 (121) БЛА при начальном разбросе по скоростям и направлениям полета внутри группы относительно «генерального» направления полета.

Результаты данного этапа исследований представлены рисунками 1-5.

Результаты второго этапа исследований иллюстрируют по-прежнему успешное решение задачи вывода на требуемую топологию группы БЛА. При этом применение динамического торможения позволяет удовлетворить требованиям быстродействия решения задачи.

5. Заключение

Полученные новые результаты исследований свидетельствуют о широкой применимости вариаций предлагаемого способа моделирования управления большими плотными группами БЛА, основанного на их рассмотрении как системы с распределенными параметрами (среды

БЛА). При этом продолжение исследований может быть реализовано, в том числе, в рамках других подходов, по-прежнему основанных на уподоблении группы БЛА сплошной среде и составлении уравнений на основе системы частиц в гидро- и газодинамике. Среди таких подходов следует отметить те, которые будут проработаны в дальнейшем: составление аналогов уравнения Власова с определением радиуса Дебая; применение метода прямого численного моделирования Монте-Карло (DSMC) для течений разреженного газа – метода К. Берда.

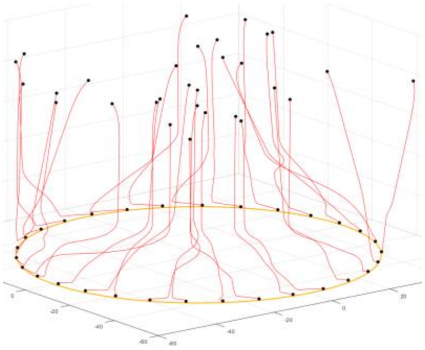

Рисунок 1. Вывод группы из 30 БЛА на круг без применения динамического торможения.

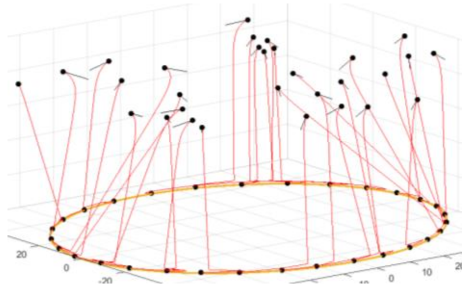

Рисунок 2. Вывод группы из 30 БЛА на круг с применением динамического торможения.

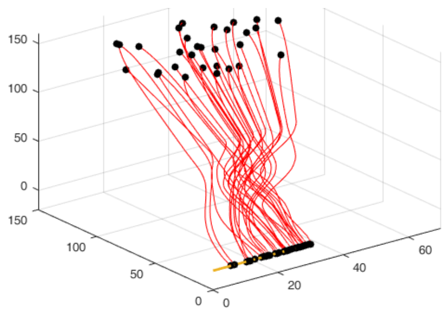

Рисунок 3. Вывод группы из 30 БЛА на фиксированный отрезок.

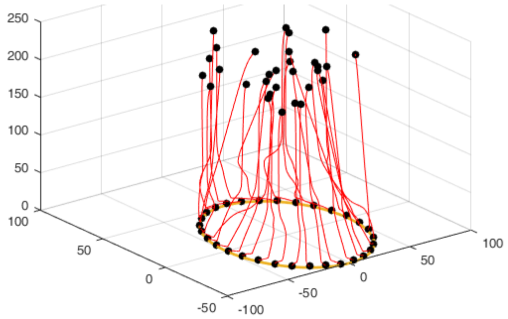

Рисунок 4. Вывод группы из 30 БЛА на круг с применением динамического торможения.

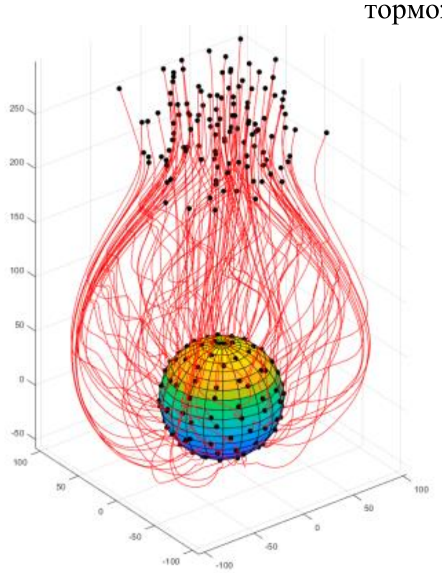

Рисунок 5. Вывод группы из 121 БЛА на сферу.

6. Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №18-38-00967-мол_а, №19-08-01226-а).

7. Литература

[1] Федосов, Е.А. Современное состояние и перспективы развития беспилотных авиационных систем XXI века. Аналитический обзор по материалам зарубежных информационных источников – М., 2012.
[2] Верба, В.С. Комплексы с беспилотными летательными аппаратами. Книга 1. Принципы построения и особенности применения комплексов с БЛА / В.С. Верба, Б.Г. Татарский – М.: Радиотехника, 2016. – 512 с.
[3] Верба, В.С. Беспилотные летательные аппараты. Рой: за и против / В.С. Верба, В.И. Меркулов // Радиоэлектронные технологии. – 2017. – Т. 5. – С. 42-45.
[4] Миляков, Д.А. Об управлении большой группой беспилотных летательных аппаратов как системой с распределенными параметрами // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XX международной конференции – Самара: ООО «Офорт», 2018. – С. 176-181.
[5] Миляков, Д.А. Особенности управления большой плотной группой БЛА как системой с распределенными параметрами // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XXI Международной конференции – Самара: ООО «Офорт», 2019. – Т. 2. – С. 86-91.
[6] Меркулов, В.И. Оптимизация алгоритма группового управления беспилотными летательными аппаратами в составе локальной сети / В.И. Меркулов, Д.А. Миляков, И.О. Самодов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – Т. 12, № 161. – С. 157-166.
[7] Зельдович, Я.Б. Элементы математической физики среды из невзаимодействующих частиц / Я.Б. Зельдович, А.Д. Мышкис – М.: Изд-во «Наука», 1973. – 351 с.
[8] Рапопорт, Э.Я. Оптимальное управление системами с распределенными параметрами – М.: Высш. шк., 2009. – 677 с.
[9] Сарры, А.М. О многочастичном взаимодействии / А.М. Сарры, М.Ф. Сарры // Журнал технической физики. – 2014. – Т. 84, № 4. – С. 8-14.
[10] Jones, J.E. On the Determination of Molecular Fields. – I. From the Variation of the Viscosity of a Gas with Temperature // Proceedings of the Royal Society. – 1924 – Vol. 106(738). – P. 441-462. DOI: 10.1098/rspa.1924.0081.
[11] Jones, J.E. On the determination of molecular fields. – II. From the equation of state of a gas // Proceedings of the Royal Society – 1924 – Vol. 106(738). – P. 463-477. DOI: 10.1098/rspa.
[12] Малинецкий, Г.Г. Нелинейная динамика: подходы, результаты, надежды / Г.Г. Малинецкий, А.Б. Потапов, А.В. Подлазов – М.: УРСС, 2006.

Two approaches to simulating a group flight of unmanned aerial vehicles as system with lumped and distributed parameters

D.A. Milyakov[1], V.S. Verba[1], V.I. Merkulov[1], A.S. Plyashechnik[1]

[1]Joint-Stock Company "Radio Engineering Corporation "Vega", Kutuzov avenue 34, Moscow, Russia, 121170

Abstract. When using UAV groups to solve various problems, it is necessary to form a management that ensures the collection of the group with the construction of the required topology, as well as the management of each UAV within the framework of solving the general problem and preventing collisions in the group. The paper considers the theoretical and practical features of modeling the problem of controlling a large dense UAV group when it is brought out to various variants of the required topology using two possible approaches. The first - traditional - is based on the consideration of the UAV group as a set of individual participants (a system with lumped parameters), for each of which a control is formed that provides both a solution to the general problem and collision avoidance within the group. The second - proposed - is based on the consideration of the UAV group as a system with distributed parameters that are functions of time and spatial coordinates. The basis of this can serve as a consideration of the problems of kinematics and dynamics for systems of non-interacting closely spaced particles. Studies have shown the possibility of using the proposed approach.