

УДК 629.7.058

# ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПЛОТНОЙ МОГОЧИСЛЕННОЙ ГРУППОЙ БЛА КАК СИСТЕМОЙ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

**Д.А. Миляков**

*АО «Концерн «Вега»*

Россия, 121170, Москва, Кутузовский проспект, д. 34

E-mail: [from\\_fn@mail.ru](mailto:from_fn@mail.ru)

**В.А. Михеев**

*АО «Концерн «Вега»*

Россия, 121170, Москва, Кутузовский проспект, д. 34

E-mail: [mail@vega.su](mailto:mail@vega.su)

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, группа БЛА, система с распределенными параметрами, траекторное управление, топология системы.

**Аннотация:** Рассмотрены проблемы управления плотной многочисленной группой беспилотных летательных аппаратов (БЛА) на основе представлений двух типов: в виде совокупности отдельных участников и в виде системы с распределенными параметрами. Обозначены основные сложности теоретического решения этих альтернатив. При этом группы БЛА рассматривались как система с распределенными параметрами. Представлены результаты моделирования задачи вывода плотной многочисленной группы БЛА на требуемую топологию типа «статический отрезок» и «подвижный отрезок», иллюстрирующие принципиальную возможность управления группой БЛА как системой с распределенными параметрами.

## 1. Введение

Принятие в передовых странах стратегии бесконтактных сетецентрических войн предопределило качественное усиление роли беспилотных летательных аппаратов (БЛА) различного назначения. Их массовое, особенно групповое, применение позволяет получить целый ряд преимуществ при решении тактических и оперативных задач с реализацией целого комплекса новых тактических приемов, к которым можно отнести:

- использования в качестве целей-приманок для ускоренного расхода средств поражения противника;
- преодоления практически любой системы ПВО при условии, что число БЛА превышает ее пропускную способность (эффект роя);
- создания группового оружия для подавления информационно-управляющих систем (ИУС) противника в результате совместных усилий всех участников;
- использования в качестве временных фазированных антенных решеток больших размеров для реализации больших дальностей действия РЛС.

Новые тактические преимущества группового применения БЛА обусловлены:

- сложностью раздельного наблюдения участников группы и, соответственно, слож-

ностями сопровождения и целераспределения;

- невозможностью обслуживать всю большую группу, когда число участников превышает пропускную способность ИУС противника;
- возрастанием поведенческой сложности БЛА при решении различных задач за счет использования элементов искусственного интеллекта;
- случайной сменой пространственного положения отдельных БЛА внутри группы, препятствующей их обнаружению и селекции практически всеми видами информационных систем.

Новые возможности больших групп БЛА определяются не только количеством участников, но и конфигурацией группы и поведением участников внутри нее. В связи с этим эффективность применения плотной многочисленной группы БЛА определяется способностью ее системы управления обеспечить построение требуемой топологии такой группы, ее перемещение в пространстве и поведение участников внутри группы.

Общим для всех видов больших групп при групповом управлении ими является необходимость решения следующих задач:

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

Наибольшую сложность представляет формирование требуемых законов управления и его информационного обеспечения для плотной группы БЛА, расстояние между которыми сравнимо с разрешающей способностью средств обнаружения противника. Законы управления такой группой должны обеспечивать не только реализацию ее целевого назначения, но и предотвращение столкновений участников между собой. Согласованное управление плотной группой может достигаться в рамках двух подходов.

Первый подход является классическим и заключается в рассмотрении группы как совокупности отдельных объектов, для каждого из которых формируются модель состояния и управление. Однако в приложении к большим и плотным группам объектов возникает проблема обеспечения их управляемости, которая может быть решена за счет различных упрощений, например, разбиений и обобщений, или различными вариантами кластеризации.

Второй подход предполагает рассмотрение группы объектов как системы с распределенными во времени и пространстве параметрами. Далее применительно к задачам управления плотными группами БЛА будет рассмотрен второй подход.

## **2. Групповое управление БЛА как системой с распределенными параметрами**

Новым подходом к управлению большими группами БЛА является использование математического аппарата управления системами с распределенными параметрами, являющимися функциями времени и пространственных координат применительно к системе физически невзаимодействующих близко расположенных частиц. Возможность такого подхода базируется на эквивалентности аналоговых и дискретных процессов при выполнении условий, аналогичных условиям теоремы Котельникова. В связи с этим предлагается рассмотреть многочисленную группу плотно расположенных БЛА как систему, состоящую из совокупности элементов, которую можно назвать средой БЛА. Состояние этой среды охарактеризуем некоторым соотношением, исходя из закона сохранения импульса, параметрами которого являются координаты и время. Такая

неклассическая постановка задачи позволяет использовать положения теоретической и, в частности, статической физики для получения соотношений между макроскопическими и микроскопическими характеристиками среды, по аналогии с различными типами сплошных сред, состояние которых описывается известными дифференциальными (интегро-дифференциальными) уравнениями в частных производных. В рамках такой постановки для среды БЛА введем следующие функции координат и времени: внутренний потенциал среды, определяющий взаимодействие БЛА между собой; плотность среды; давление в среде как функцию ее плотности, определяющее связность элементов среды и их взаимодействие в отсутствие внешнего воздействия. «Уравнение состояния» получается при рассмотрении всех найденных сил, действующих на элемент среды, ограниченный элементарным объемом.

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. Несмотря на это, сложность формирования управления такой системой обусловлена следующими причинами:

- сложностью решения нелинейных уравнений в частных производных для выполнения прогноза состояния;
- сложностью задания оптимизируемого функционала качества;
- невозможностью получения аналитического выражения для сигналов управления, предопределяющей невозможность их анализа;
- невозможностью использования хорошо отработанных методов классической оптимизации;
- необходимостью определения максимально допустимых расстояний между БЛА, при которых дискретная система еще адекватна аналоговой.

Ниже предложен алгоритм использования введенных выше функций среды БЛА и получения ее «уравнения состояния» при формировании закона управления средой.

### 3. Пример

Для среды БЛА в момент времени  $t$  в точке  $(x, y, z)$ , состояние которой характеризуется функциями плотности  $\rho(t, x, y, z)$ , внутреннего потенциала  $U(x, y, z)$ , давления  $P(\rho)$ , уравнение движения малого элемента среды можно получить в следующей форме:

$$(1) \quad \mathbf{a} = \frac{\nabla U}{\Delta m} + \frac{\nabla P}{\rho} + \mathbf{u}; \Delta m = m_{\text{БЛА}} \cdot \Delta N; \rho = \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{m_{\text{БЛА}} \cdot \Delta N}{\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z},$$

где  $\mathbf{a}$  – вектор полного ускорения элемента среды,  $\Delta m$  – его масса,  $m_{\text{БЛА}}$  – условная масса единичного БЛА,  $\Delta N$  – их количество в элементе среды с центром в точке  $(x, y, z)$ ,  $\nabla U$  – вектор градиента внутреннего потенциала,  $\nabla P$  – вектор градиента давления в элементе среды,  $\rho$  – плотность элемента среды,  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$  – линейные размеры элемента среды с центром в точке  $(x, y, z)$ ,  $\mathbf{u}$  – вектор управления элементом среды при решении поставленной задачи.

Для декартовой системы координат с ортами  $(\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k})$  первое уравнение (1) может

быть представлено системой дифференциальных уравнений:

$$(2) \quad \begin{cases} \frac{d\mathbf{p}}{dt} = \mathbf{v}, \\ \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \left( \frac{1}{dm} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + u_x \right) \mathbf{i} + \left( \frac{1}{dm} \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + u_y \right) \mathbf{j} + \left( \frac{1}{dm} \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + u_z \right) \mathbf{k}. \end{cases}$$

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

$$(3) \quad \nabla U = \left[ \frac{\partial U}{\partial x} \ \frac{\partial U}{\partial y} \ \frac{\partial U}{\partial z} \right]^T, \nabla P = \left[ \frac{\partial P}{\partial x} \ \frac{\partial P}{\partial y} \ \frac{\partial P}{\partial z} \right]^T, \mathbf{u} = [u_x \ u_y \ u_z]^T.$$

Закон описания требуемой топологии задается аналитически уравнением (системой уравнений), позволяющим разрешить его относительно координат.

Таким образом, задачу управления группой БЛА формулируем в следующем виде: для группы БЛА, состояние которой задается системой (2), необходимо найти закон управления, обеспечивающий построение требуемой топологии и ее целенаправленное перемещение в пространстве без столкновений с заданными ограничениями на сигналы управления и расстояния между БЛА.

Внутренний потенциал  $U$  в (3) может быть выбран эмпирически, исходя из желаемого типа внутреннего взаимодействия в среде. В качестве таких потенциалов могут выступать как одночастичные, так и многочастичные потенциалы, применяемые для представления взаимодействия частиц в различных средах. В работе использован парный потенциал Леннард-Джонса (потенциал «6-12»), в простейшем виде имеющей вид

$$(4) \quad U(r) = \frac{A}{r^{12}} - \frac{B}{r^6},$$

где  $r$  – расстояние между центрами частиц;  $A$  – коэффициент, характеризующий отталкивание частиц на малых расстояниях;  $B$  – коэффициент, характеризующий притяжение частиц на больших расстояниях.

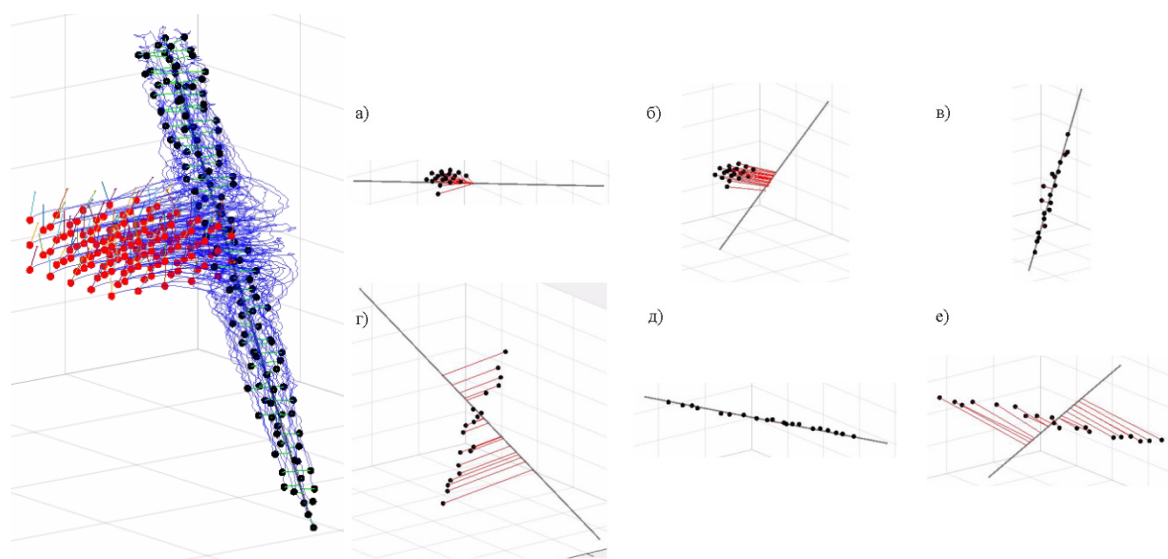
Потенциал вида (4), имитирующий парное взаимодействие в режиме «притяжение-отталкивание» несталкивающихся молекул идеального газа без учета влияния остальных молекул, широко используется в расчетах и компьютерном моделировании различных многосоставных систем и является адекватным при решении рассматриваемой задачи. В связи с этим ниже будет рассмотрена техника молекулярной динамики (МД), позволяющей для указанного выше класса задач получать достоверные результаты за приемлемое время. При этом МД применима для моделирования систем и процессов с характерным временем порядка пикосекунды ( $10^{-12}$  с) и более.

Техника МД при отслеживании эволюции системы взаимосвязанных частиц в классическом случае заключается в численной реализации решения системы уравнений движения (2) для множества частиц. При этом известны координаты центров всех частиц и суммарная сила, действующая на каждую частицу, а между собой они взаимодействуют по известному закону согласно потенциалу взаимодействия (4). Вследствие этого программная реализация соответствующего алгоритма управления с формированием сигнала управления каждым БЛА унифицирована в рамках всей среды.

В работе при исследовании управления средой БЛА решалась задача вывода ее исходной конфигурации в топологию типа «статический отрезок», «подвижный отрезок», «кольцо», «сфера» при одинаковых начальных условиях в процессе моделирования соотношений (1)-(4). При этом задавалась некоторая  $\varepsilon$ -окрестность топологии, определяющая качество решения задачи. Нахождение всех БЛА в пределах этой  $\varepsilon$ -окрестности свидетельствует о том, что задача решена.

Некоторые результаты исследований по формированию средой БЛА требуемых то-

пологий представлены на рис. 1.



**Рис. 1.** Вывод группы БЛА на статический отрезок и на вращающийся отрезок.

Рис. 1 иллюстрирует решение задачи вывода группы БЛА на статический отрезок группы из 125 БЛА при начальном разбросе по скоростям и направлениям полета внутри группы относительно «генерального» направления полета; результаты исследования влияния переходных процессов в группе БЛА на решение задачи, при этом требуемая топология подвергалась вращению и перемещению по заданному закону. На рис. 1 отрезками обозначены текущие расстояния от каждого БЛА группы до требуемой топологии.

Результаты моделирования свидетельствуют об успешном решении задачи, демонстрируя при этом детерминированный хаос динамической системы (2). В процессе полета БЛА внутри группы не сталкиваются между собой и не разлетаются за счет учета в (4) взаимодействием каждого БЛА со своими «соседями».

## 4. Заключение

Проведенные исследования позволяют заключить, что проблема использования плотных многочисленных групп БЛА для решения различных задач приобретает все большую значимость. В связи с этим все возрастающее значение приобретает задача формирования сигналов управления для всей группы и отдельных ее участников, решение которой может быть получено на основе двух подходов.

Первый основан на рассмотрении группы БЛА как совокупности отдельных участников, для каждого из которых формируется управление, обеспечивающее как решение общей задачи, так и предотвращение столкновений внутри группы.

Второй основан на рассмотрении группы БЛА как системы с распределенными во времени и пространстве параметрами. Подтверждена работоспособность этого подхода. Для определения всех его возможностей требуется проведение дополнительных теоретических и прикладных исследований.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (18-38-00967мол\_а).