

УДК 519.876.2

## ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГРУППОЙ БЕСПИЛОТНЫХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИИ АГРЕГАТНЫХ СОСТОЯНИЙ ВЕЩЕСТВА

Р.Т. Сиразетдинов (*Rif-kat@inbox.ru*)

С.В. Тихонов (*gilgul\_ha-n@mail.ru*)

Казанский национальный исследовательский технический  
университет им. А.Н. Туполева–КАИ, Казань

**Аннотация.** В докладе рассматривается проблема организации автономного движения децентрализованной группы (стаи) беспилотных аппаратов, как множества материальных точек. Предлагаются алгоритмы распределенного управления, основанные на имитации группой беспилотных аппаратов различных агрегатных состояний вещества. Рассмотрены три «агрегатных состояния» группы: твердое, жидкое и газообразное. Исследованы вопросы устойчивости системы при различных вариантах алгоритмов имитации агрегатного состояния вещества. Затронуты вопросы оптимизации одномерного и плоского движения группы.<sup>1</sup>

**Ключевые слова:** группа беспилотных аппаратов, двухуровневое управление, децентрализованное управление, агрегатные состояния вещества.

### Введение

В настоящее время появилась возможность создавать конструкции достаточно малых размеров, например, квадрокоптеры, которые могут автономно перемещаться в пространстве, выполнять поставленные перед ними интеллектуальные задачи и, при этом, иметь небольшую стоимость. Это позволяет вместо одного большого беспилотного аппарата (БА) использовать несколько малоразмерных и недорогих БА, которые совместно могли бы выполнить те же задачи, и, при этом, имели бы ряд преимуществ, таких как малая стоимость и меньшая уязвимость группы БА как системы, малая заметность для людей, для радаров, способность более оперативно принимать решения и передавать информацию, а также

---

<sup>1</sup> Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета.

большой радиус действия. Кроме того возникают новые свойства группы БА как системы, позволяющие выполнять и другие виды задач, невыполнимые одним БА. Так, на базе группы малых интеллектуальных БА можно организовать пространственно распределенную интеллектуальную вычислительную систему, способную производить параллельную обработку информации. Суммарная вычислительная мощность такой системы будет складываться из мощностей составляющих ее БА. При этом, при потере одного БА будет происходить его замещение другим, что обеспечит надежность вычислительной системы.

Централизованное управление группой БА с увеличением количества БА встречает все больше трудностей. Наличие центрального управляющего БА, во-первых, делает систему более уязвимой и менее надежной, так как достаточно какого-либо сбоя в работе центрального аппарата, и вся группа теряет управляемость. Кроме того, возрастают требования к процессору, памяти, быстродействию центрального управляющего БА, возрастают требования к надежности и мощности системы связи, обеспечивающей информационный трафик центрального БА. Отсюда следует актуальность проблемы разработки децентрализованного управления большой группой беспилотных аппаратов, когда подается единая команда стае, и каждый БА отрабатывает эту команду самостоятельно [Каляев и др., 2010].

Чаще всего, проектируя систему, представляющую из себя группу БА с децентрализованным управлением, вдохновляются творениями живой природы. Так, например, группа БА может имитировать движение стаи животных или роя насекомых. При этом для обмена информацией можно использовать аналоги чувства кворума, как у бактерий [Bassler, 1999], трофаллаксиса, как у пчел, муравьев или термитов [Schmickl, 2008], а также гормонов [Stamatis, 2009]. Каждый БА, в соответствии с общим заданием и информацией, полученной выбранным способом, реализует, так называемое, ситуационное поведение [Поспелов, 1986]. На аппаратном уровне связь между БА может реализовываться на основе радиосигналов, Wifi и Bluetooth, световых, звуковых и даже химических сигналов.

В КНИТУ-КАИ на кафедре Динамики процессов и управления в течение многих лет ведутся исследования, связанные с проблемой оптимизации и устойчивости систем с распределенными параметрами, математического моделирования и управления сложными, трансформирующимися системами. Данная статья является продолжением этих исследований и связана с математическим моделированием такой сложной, пространственно распределенной, трансформирующейся системы, как большая группа БА.

## 1 Постановка задачи

Рассматривается управляемое движение некоторой группы БА, состоящей из большого числа аппаратов. Предполагается, что все БА идентичные.

На каждый БА со стороны среды накладываются ограничения, например, препятствия, которые БА должен облететь. Также для каждого конкретного БА накладываются ограничения все соседние БА. Это и минимально допустимое расстояние между БА, необходимое для предотвращения столкновений, и «видимость» БА хотя бы одним другим БА, для возможности передачи информации и предотвращения потери БА группой, и т.д. Дополнительные ограничения могут быть переданы группе в задании.

Требуется разработать интеллектуальные методы управления группой БА и взаимодействия между БА. Это значит, что необходимо организовать своевременный обмен актуальной информацией между БА и разработать алгоритмы, которые на основе полученной информации будут переводить систему в требуемое по общему заданию состояние.

## 2 Групповое движение беспилотных аппаратов

В данной статье описывается двухуровневый принцип организации управления группой БА. Верхний уровень предполагает централизованное командование оператором, либо формирование целеуказаний автоматизированной системой, в целом для группы БА. На нижнем уровне каждый БА самостоятельно обрабатывает свои алгоритмы движения на основе заданной общегрупповой цели и взаимного положения относительно ближайших БА.

Основной идеей управления группой БА, предлагаемой нами, является имитация группой БА агрегатного состояния вещества. На нижнем уровне управления алгоритмы управления каждого БА составлены так, чтобы группа в целом для оператора представлялась, либо как твердое тело, либо как жидкость, либо как газ. Тогда команды высокого уровня становятся оператору интуитивно понятными. Он имеет конечный набор высокоуровневых команд для управления группой как «веществом», т.е. некоторым физическим телом, а группа БА самостоятельно обрабатывает эти команды на основе заложенных в них типовых алгоритмов нижнего уровня.

Высокоуровневые команды управления группой БА в виде вещества можно разделить на следующие группы:

- Команды перехода в новое агрегатное состояние (АС) с заданными параметрами.
- Команды перемещения группы БА в заданном направлении в

текущем АС.

- Команды, связанные с непосредственным выполнением целевой задачи, например, аэрофотосъемка местности и т.п.

При реализации группового управления БА целью ставится не моделирование реальных свойств вещества в соответствующем АС, а имитация тех ключевых свойств АС вещества, которые могут быть полезными при управлении группой БА. Рассмотрим эти ключевые свойства.

При «твердом» АС группа БА имеет неизменную структуру, удобно в этом случае использовать «кристаллическую» структуру. Все БА жестко располагаются в заданных узлах относительно друг друга. Каждый БА может немного отклоняться от заданного положения по аналогии с движением атомов в кристаллической решетке. Структура «кристаллической решетки» и степень допустимых отклонений задается на высшем уровне управления. Система управления каждого БА самостоятельно обрабатывает свое заданное положение.

Возможен второй способ построения модели «твердого» АС с помощью не рекурсивной уникальной схемы, заданной некоторым массивом узлов, в которых должны расположиться БА. Данный способ предполагает, что есть некоторая конечная схема расположений БА относительно друг друга.

Группа БА в «жидком» АС имеет следующие ключевые свойства:

- Поддержание постоянной плотности, т.е. концентрации БА в пространстве. Следствием этого свойства является постоянный объем пространства, занимаемый группой БА.
- Стремление группы БА занять структуру с минимальной площадью оболочки, покрывающей группу БА. Это требование воспроизводит такое свойство жидкости как поверхностное натяжение.

Группа БА в виде «жидкости» движется компактно, при этом БА не имеют фиксированных позиций в группе и свободно меняются между собой. Группа БА, обтекая или просачиваясь, обходит препятствия. Одним из ограничивающих условий для состояния «жидкости» является минимальное допустимое расстояние между БА. Оно необходимо, чтобы не было соударений БА.

Группа БА в «газообразном» АС имеет такое ключевое свойство, как стремление равномерно занять максимальную область. Предполагается, что на верхнем уровне управления задается конфигурация области, т.е. оболочки, которую должен занять «газ». Если же группа БА в состоянии «газа» не ограничена оболочкой, то вся группа занимает максимально возможную область, при которой она остается управляемой. Одним из ограничивающих условий на максимальный объем является радиус

видимости БА друг друга — БА не могут удаляться на большее расстояние.

### **3 Относительное движение беспилотных аппаратов**

Рассмотрим относительное движение аппаратов под действием алгоритмов нижнего уровня. Группа БА имитирует движение молекул вещества под действием внутренних сил. Результирующая этих сил и будет требуемой тягой каждого БА. При этом БА рассчитывает силы, которые действовали бы на него, если бы он был частицей вещества, находит их результирующую и отрабатывает ее действие собственной тягой. Величины действующих сил вычисляются в соответствии с заданным законом движения.

В каждом из представленных нами АС любой БА имитирует действие на него сил со стороны остальных БА, которые можно разделить на силы отталкивания и притяжения. Силы отталкивания необходимы для предотвращения столкновения БА. А силы притяжения для предотвращения потери связи между БА.

Задавать взаимодействие между БА мы можем сами, тем самым меняя свойства группы БА. Для простоты допустим, что в движение одномерное и недемпфированное. Представим БА материальными точками.

Сравним действие различных законов движения. Их можно разделить на 2 класса: линейные (такие как закон Гука) и не линейные (такие как закон Кулона, гиперболический и квадратичный законы и др.).

Основное достоинство нелинейных законов в отличие от линейных: при убывании расстояния между аппаратами, сила, действующая между ними, резко возрастает вплоть до бесконечности. Тем самым мы гарантируем, что БА никогда не столкнутся. Но это возможно только в идеальной системе. В реальности мы не можем приложить к аппарату бесконечную тягу, и отработка заданной программы идет не мгновенно, что накладывает ограничения на начальные условия системы.

Рассмотрим двумерное плоское движение БА. Для этого представим ограниченную внешнюю среду в виде квадрата, внутри которой движутся БА. АС выберем газообразное. На рисунке 1 представлено мгновенное расположение БА внутри ограниченной площади.

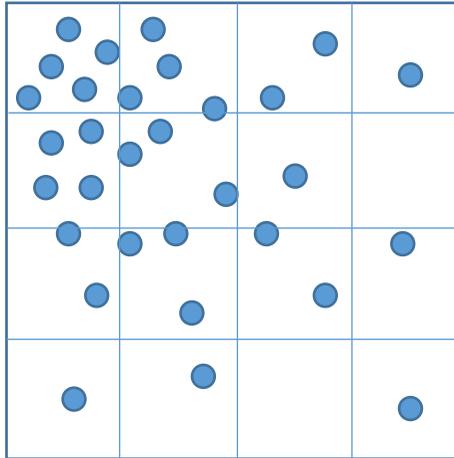


Рис. 1. Мгновенное расположение БА в пределах заданной области.

Оценим плотность распределенной системы. Для этого поделим допустимую область на более мелкие области. Построив двумерную гистограмму, получим мгновенную оценку плотности БА в подобластях. На ней видим, что у нас имеются области с повышенной мгновенной плотностью БА и области с пониженной мгновенной плотностью БА.

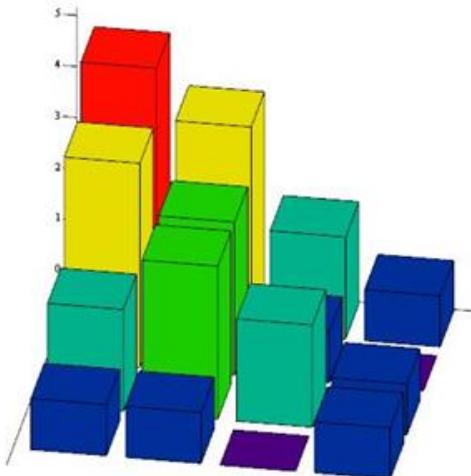


Рис. 2. Гистограмма оценки мгновенной плотности БА в подобластях.

В ходе движения в «газообразном» АС БА должны заполнять допустимую область равномерно, то есть плотность БА в каждой подобласти должна быть примерно равна средней плотности всей группы. Тогда в процессе движения БА должны постепенно рассредоточиться по всей допустимой площади, так чтобы значение плотности в каждой подобласти лежало в допустимых пределах. Пределы задаются разработчиком. Время, за которое значение плотностей в подобластях достигнет допустимых пределов и больше не выйдет за них, и будем считать критерием оптимальности данной системы.

## 4 Заключение

В данной работе предложен подход к организации интеллектуального управления большими группами БА. Он основан на децентрализованном управлении и имитации группой БА агрегатных состояний вещества. Это позволяет управлять большой группой БА с помощью интуитивно понятных оператору высокоуровневых команд. При этом алгоритмы поведения, т.е. управления, каждого БА достаточно автономны и просты. Управление осуществляется на основе информации об относительном положении ближайших БА в соответствии с заданными законами взаимодействия и текущего выполняемого задания. Выбор тех или иных законов взаимодействия БА находится в руках проектировщика. В ходе выполнения работы был разработан программный модуль, позволяющий моделировать управление группой БА в виде трех агрегатных состояний. А также была исследована устойчивость группы как системы материальных точек при различных законах их взаимодействия.

## Список литературы

- [Дегтярев и др., 2007] Дегтярев Г.Л., Маликов А.И., Сиразетдинов Т.К. Сиразетдинов Р.Т. Исследования по устойчивости и управлению в КГТУ им. А.Н. Туполева-КАИ. Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева, 2007. №3, с.90-97.
- [Каляев и др., 2010] Каляев И. А., Капустян С. Г., Гайдук А. Р. Самоорганизующиеся распределенные системы управления группами интеллектуальных роботов, построенные на основе сетевой модели / Управление большими системами. Специальный выпуск 30.1 "Сетевые модели в управлении". М.: ИПУ РАН, 2010, с.605-639.
- [Миронов, 2013] Миронов А.Б. Управление большими группами беспилотных аппаратов на основе имитации агрегатного состояния вещества. Науч. рук. Сиразетдинов Р.Т. // «XXI Туполевские чтения (школа молодых ученых)»: Международная молодежная научная конференция, 19-21 ноября 2013 г.: материалы конференции. – Т. I. – Казань: Изд-во Казан. Гос. Техн. Ун-та, 2013. с. 341-343.
- [Поспелов, 2008] Поспелов Д.А. Ситуационное управление: теория и практика. –

- М.: Наука, 1986.
- [**Сиразетдинов, 1994**] Сиразетдинов Р.Т. Математическое моделирование развития системы однотипных объектов с учетом интенсивности их эксплуатации (На примере самолетно-вертолетного парка). Изв. ВУЗов. Сер. "Авиационная техника". Казань, 1994, №1, с.63-68.
- [**Сиразетдинов, 1998**] Сиразетдинов Р.Т. Математическое моделирование мощности инфраструктуры сложных систем. Известия академии наук. Теория и системы управления, 1998. №3, с.96-104.
- [**Сиразетдинов, 1997**] Сиразетдинов Т.К. Оптимизация систем с распределенными параметрами. М.: Наука. 1977, 480 с.
- [**Сиразетдинов, 1987**] Сиразетдинов Т.К. Устойчивость систем с распределенными параметрами. Новосибирск: Наука, 1987, 232 с.
- [**Тарасов, 2002**] Тарасов В.Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям. М.: Эдиториал УРСС, 2002, 352 с.
- [**Bassler, 1999**] Bassler, V. L. (1999). How bacteria talk to each other: regulation of gene expression by quorum sensing. *Current Opinion in Microbiology*, 2(6):582–587.
- [**Duarte, 2014**] Duarte, M., Oliveira, S. M., and Christensen, A. L. (2014b). Hybrid control for large swarm of aquatic drones. In 14th International Conference on the Synthesis & Simulation of Living Systems (ALIFE), pages 785–792. MIT Press, Cambridge, MA.
- [**Duarte, 2011**] Duarte, M., Oliveira, S., and Christensen, A. L. (2011). Towards artificial evolution of complex behavior observed in insect colonies. In 15th Portuguese Conference on Artificial Intelligence (EPIA), pages 153–167. Springer, Berlin, Germany.
- [**Rodrigues, 2008**] Rodrigues, T., Duarte, M., Oliveira, S. M., and Christensen, A. L. (2015). Beyond onboard sensors in robotic swarms: Local collective sensing through situated communication. In 7th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART). SciTePress, Lisbon, Portugal. In press.
- [**Schmickl, 2008**] Schmickl, T. and Crailsheim, K. (2008). Trophallaxis within a robotic swarm: bio-inspired communication among robots in a swarm. *Autonomous Robots*, 25(1-2):171–188.
- [**Stamatis, 2008**] Stamatis, P. N., Zaharakis, I. D., and Kameas, A. D. (2009). A study of bio-inspired communication scheme in swarm robotics. In 7th International Conference on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems (PAAMS), pages 383–391. Springer, Berlin, Germany.