

## СЕКЦИЯ 9

### УПРАВЛЕНИЕ РАЗВИТИЕМ АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКИХ И ДРУГИХ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

---

DOI: 10.25728/mlsd.2023.3283

#### СОЗДАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННОГО ХАОСА РОЕМ БЕСПИЛОТНЫХ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

**Абросимов В.К.**

*Главный научно-исследовательский испытательный межвидовой центр перспективного  
вооружения Министерства обороны РФ, Москва, Россия  
avk787@yandex.ru*

*Аннотация. Разработаны методы создания хаотических для внешнего наблюдателя, но целенаправленно создаваемых пространственно-временных роевых формаций беспилотных летательных аппаратов малых размеров. Установлено, что реализация методов существенно затрудняет как сопровождение и идентификацию таких формаций, так и принятие решений по противодействию их целевому предназначению.*

*Ключевые слова: летательный аппарат, группа, рой, стая, хаос, противодействие, малоразмерность.*

#### **Введение**

В последние годы в задачах управления развитием авиационно-космических крупномасштабных организационно-технических комплексов все чаще рассматриваются практические приложения так называемых процессов «роения», как довольно уникальной разновидности группового движения и взаимодействия объектов управления. Концепции роев объектов варьируются от использования больших групп сравнительно недорогих устройств, например предназначенных для подавления систем защиты объектов, до небольших групп беспилотных систем, совместно обеспечивающих атаки объектов интереса, огневую поддержку, создающих навигационные и коммуникационные сети, обеспечивающих совместное патрулирование пространства и др. [1].

Достижения технологий электроники инициировали тренд миниатюризации. В сфере объектов управления воздушного базирования указанное наиболее ярко проявилось в создании малоразмерных беспилотных летательных аппаратов (МБЛА). Классификацию МБЛА определили такие признаки, как дальность действия (до 30-40 км), продолжительность полета (до 60 минут), размеры (до первых десятков сантиметров) и вес (не более 50 кг). В разработанных линейках таких аппаратов существуют нано БЛА, микро БЛА и мини БЛА. Для целей настоящей работы важно, что МБЛА при высоте действий от 100 до 1000 м обладают очень малой радиолокационной заметностью (эффективная площадь рассеяния (ЭПР) МБЛА находится в пределах  $\sim 0,01-0,001 \text{ м}^2$ , визуальная заметность менее  $\sim 100 \text{ м}$ , слышимость  $\sim 15-50 \text{ м}$ , малая ИК-сигнатура ( $\sim 0,5 \text{ Вт/стер.}$ ) В силу этого традиционные методы радиолокации и радиотехнической разведки, реализованные в современных зенитных системах вооружения, не в состоянии обеспечить эффективное, надежное своевременное обнаружение, распознавание и, тем более воздействие на малоразмерные малоскоростные воздушные цели типа БЛА даже в беспомеховой обстановке [2,3].

Однако рой является уникальным скоплением; суммарная ЭПР которого, например при составе роя более 100-150 малоразмерных БЛА, уже сравнима с такими объектами как крылатая ракета (ЭПР  $\sim 0,01 - 0,03 \text{ м}^2$ ), современный истребитель (ЭПР  $\sim 1 \text{ м}^2$ ) и др.

Возникает интересная практическая задача: сформировать такой рой, который выполнял бы разведывательные и ударные задачи, состоял бы из боевых и ложных МБЛА и обладал бы постоянно изменяющейся (от значительной до несущественной) радиолокационной заметностью.

#### **1. Стая и рой**

Вопросам построения соответствующих пространственно-временных роевых формаций уделяется пока недостаточное внимание; среди отечественных работ можно выделить, как позитивные примеры, работы [4-6]. Указанное, на наш взгляд, связано еще и с тем, что существует значительная

путаница в термине «рой»; при этом в англоязычной литературе также не дается соответствующих определений; так в работах, где встречается термин «Swarm», описываются методы не только роевого, но также и стайного, и группового управления.

За рубежом над вопросами роевого интеллекта работают очень активно [7], хотя проблема определения роя также не решена, прежде всего в силу разногласий различных подразделений ВС. Военные основывают определения на режимах удаленной работы, использовании средств командования и управления, уровень автономности роя. Разработчики закладывают в определения технические реализации, адекватное выполнение роевого поведения, использования искусственного интеллекта, высоких уровней автономности и адаптивности, которые, однако, не требуют контролировать отдельные сущности роя. Вообще, проблема определения того, можно ли считать большую группу объектов роем, возрастает по мере усложнения отображаемого поведения процессов роев [8].

Обращаясь к природным аналогам, можно дать такие определения.

Стаей объектов управления называется сравнительно небольшая группа объектов, в которой каждый объект самостоятельно определяет и управляет своим положением относительно остальных объектов стаи, а роли объектов сформированы по иерархически различным группам, выполняющим сходные действия по управлению и решению задач стаей, причем расстояния между объектами существенно превышают их размеры [9]. Конфигурация стаи в пространстве не обязательно имеет строгую геометрическую форму («клин», «квадрат», «цепочка» и др.). Однако это не главное, потому что объекты стаи принципиально различимы. Управление, столь упорно называемое в литературе роевым, на самом деле является стайным [10].

Роем объектов управления называется значительная по количеству группа объектов, в которой роли объектов не определены, не закреплены, а расстояния между объектами сравнимы с их размерами [9]. Реальных работ по роевому управлению в контексте указанного выше определения, довольно мало. Плотный рой объектов довольно легко обнаруживать, сопровождать, уничтожать. Когда рой разлетается, он перестает быть роем, а становится своего рода скоплением объектов, которое может приобретать совершенно различные формы. Указанное существенно затрудняет все процессы, связанные с распознаванием намерений роя и противодействием замыслу создателя роя.

Как следует из указанных определений, в основу закладывается принцип формирования роя, его пространственно-временная организация и, в конечном итоге, скоординированные маневры роя и действия, которые можно наблюдать.

## 2. Модифицированная модель роевого пространственно-временного движения

Основоположником роевого управления считается Крейг Рейнольдс, который в классической работе [11] разработал формулы для моделирования движения роя, заложив в них три основных принципа: частицы роя стремятся не сталкиваться друг с другом, каждая частица с учетом предыстории своего движения отыскивает собственное лучшее положение в рое и всегда стремится к лучшему положению всего роя. Таким образом, в формуле оказалось три элемента. Для описания роевых возможностей, К. Рейнольдс ввел в формулы эмпирически подбираемые постоянные коэффициенты. Существенно, что имеющиеся в литературе примеры не позволяют найти какую-то закономерность в подборе этих данных.

Модифицируем модель К. Рейнольдса вводя допущение о том, что указанные эмпирические коэффициенты не постоянные, а переменные. Тогда формулы для описания роевого движения примут следующий вид:

$$v_{ik} = \alpha_k v_{i-1,x} + \beta_k f(k_{i-best} - k_i) + \gamma_k f(k_{superbest} - k_i)$$

$$k: = \{x, y, z\}.$$

В формуле  $\alpha_k, \beta_k, \gamma_k \forall k$  – варьируемые переменные,  $k_{i-best}$  – лучшая точка пространства, куда необходимо перемещаться объектам управления,  $k_{superbest}$  – лучшие точки пространства из пройденных всеми объектами управления,  $f$  – случайное число в интервале (0, 1]. Алгоритм имеет итерационный характер. На каждой  $i$ -той итерации уточняется величина и направление вектора скорости  $v_{ik}$  и положение  $k_i$  каждой из частиц с учетом найденных оптимальных значений на предыдущих итерациях.

Сформулируем и проверим справедливость следующей гипотезы: за счет варьирования количеством объектов, плотностью роя и скоростью его перемещения возможно сформировать различные вариации геометрических форм роевого скопления и потенциально создать ситуации, при которых рой будет восприниматься внешним Наблюдателем как единый, отличающийся от исходного крупный объект с критическим ЭПР, что заставит внешнего Наблюдателя принимать ошибочные решения по обнаружению, сопровождению и распознаванию цели создания роя, а также противодействию ему.

### 3. Исследование возможностей создания пространственно-временных хаотических структур

Для проведения исследований были разработаны три метода.

**Метод целенаправленного построения формаций.** Метод заключается в формировании изменяющихся пространственно-временных скоплений за счет варьирования в определенных пределах коэффициентами  $\alpha_k, \beta_k, \gamma_k \forall k$ . Как показали результаты экспериментов, за счет этого можно изменять как скорость образования формаций, так и образовывать разнообразные формы скоплений объектов, в том числе близкие к геометрическим. В первых слагаемых модифицированной формулы К Рейнольдса коэффициенты  $\alpha_k \forall k$  определяют изменение скорости: знак  $\alpha_k$  определяет ускорение или замедление, величина  $\alpha_k$  – степень ускорения или замедления. Вторые слагаемые влияют на значимость для данного объекта стремления к собственной наилучшей точке пространства в предыдущей итерации по соответствующим осям координат. Следовательно, изменяя коэффициент  $\beta_k$ , можно усиливать или ослаблять соответствующий фактор формирования роя; указанная составляющая является как бы «личной» оценкой стремления объекта управления к наилучшему решению. И, наконец, коэффициент  $\gamma_k$  учитывает степень стремления каждого объекта к точке, которая является лучшей для всего скопления, что в наибольшей степени влияет на пространственный объем скопления.

**Метод оперативного построения формаций.** Метод заключается в том, что выбранные (один или все) коэффициенты  $\alpha_k$  в течение процесса итераций меняются по линейному закону с заданным параметром линеаризации  $\pm q$  в пределах заданных допустимых значений от максимально заданного до минимально заданного значения, кроме нуля  $\alpha_k(t) = \alpha_k \pm q \cdot t, 0 < \alpha_k \leq \alpha_k^* \forall k$ . При моделировании задавалось не более 600 итераций итерационного процесса, так как практически во всех реализациях после 400-450-й итерации процесс стабилизировался и требуемая формация практически не менялась. Время выполнения процесса фиксировалось стандартным компьютерным таймером. Анализ результатов моделирования на более чем 200-х экспериментах показал, что при изменении параметра  $\alpha_k$  с параметром линеаризации  $\pm q$  различные виды скоплений из исходного состояния случайного разброса объектов в пространстве скопления образуются по времени до 40-50% быстрее/ медленнее (в зависимости от значения "q"). Вывод оказывается справедливым относительно скорости прихода объектов в заданную область либо скорости разлета объектов скопления и в условиях формирования пространственно-временной структуры в одной плоскости. Таким образом, метод позволяет варьировать временем прихода скопления в заданную область, что важно при синхронизации происходящих в пространстве процессов с учетом целей и задач других групп.

**Метод реконфигурации формаций.** В этом методе в процессе выполнения задач роевым скоплением его геометрия меняется многократно. Особенность реализации состоит в том, что на заданной  $i$ -той итерации коэффициенты  $\alpha_k, \beta_k, \gamma_k \forall k$  изменяются на другие, а через некоторое время (условно измеряемое количеством итераций) возвращаются к исходным. Такой вариант создает максимальную неопределенность для внешнего наблюдателя, так как первоначальное наблюдаемое скопление может «разраиваться» и «собираться» вновь, менять геометрию и объем, «сжимаясь» в пространстве и снова «разлетаясь» в нем.

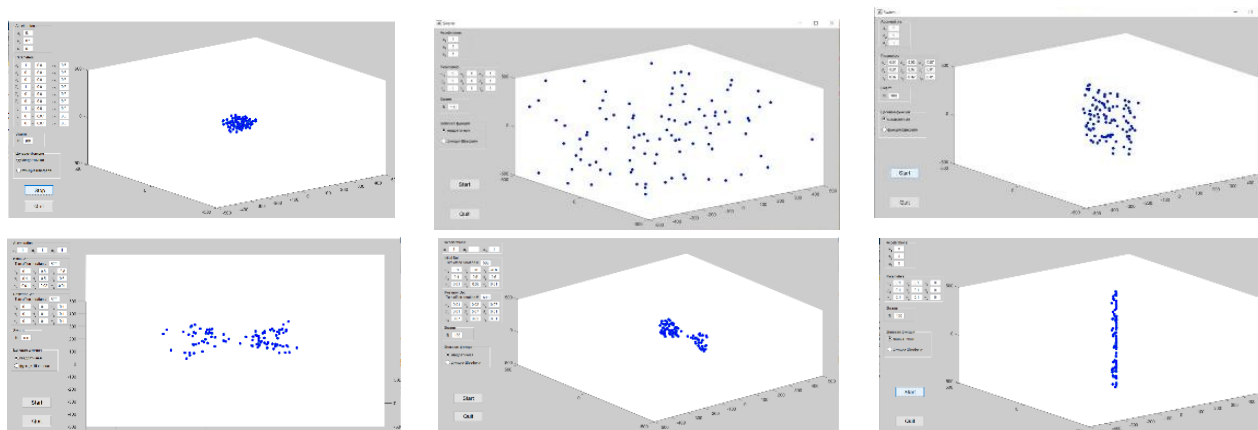


Рис. 1. Варианты образования целенаправленных внешне хаотических структур

Рис. 1 демонстрирует образование различных формаций из исходного случайно распределенного в пространстве роя объектов управления, включающего 100 объектов. Численные эксперименты проводились также и с большим количеством объектов (до 300), однако, за исключением большей плотности точек, имитирующих объекты, геометрия скоплений существенно не изменялась.

В процессе моделирования проводились виртуальные "атаки" противника на роевые скопления, реализуемые в виде условных зон поражения различных размеров. На рис 2 показан один из вариантов атаки скопления, сформированного в виде хаотической структуры из роя, включающего как боевые, так и ложные объекты и имеющего задачу проникновения на охраняемый объект. В зависимости от суммарной ЭПР хаотически организованного скопления, времени принятия решения на атаку, процентного соотношения боевых и ложных элементов, размеров зон поражения эффективность выполнения задачи различна, но в среднем составила не менее 0.7-0.75.

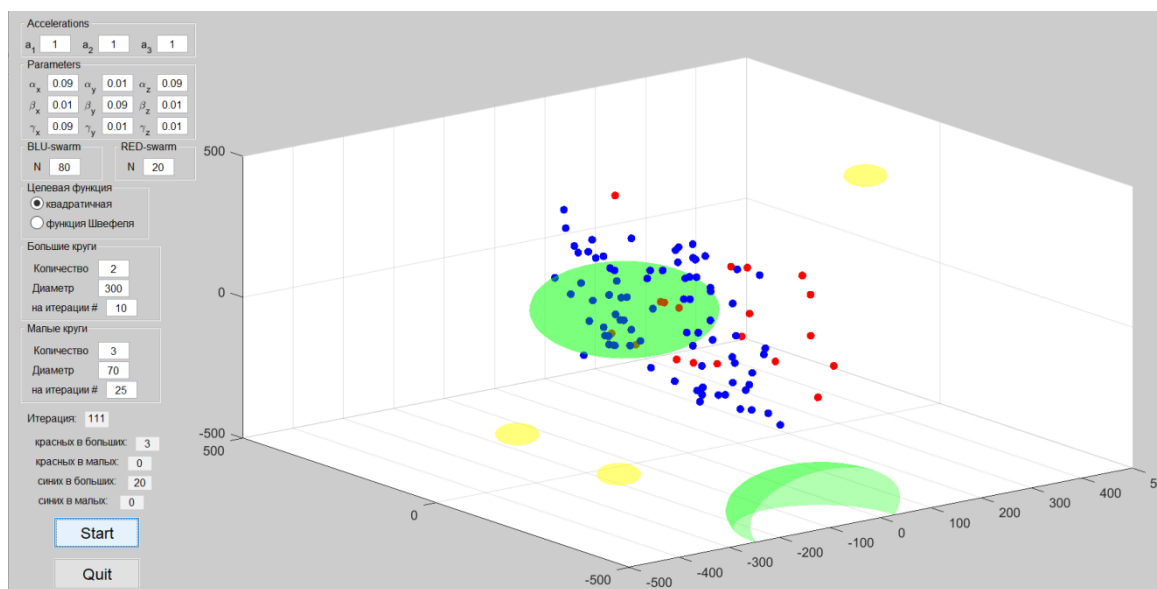


Рис. 2. Атака на хаотическое скопления, полученного из роевой группы

В результате исследований с использованием трех представленных выше методов установлено следующее.

1. Варьированием коэффициентов в модифицированной модели роевого движения К.Рейнольдса возможно создавать различные пространственно-временные формации, близкие к таким геометрическим и пространственным фигурам, как "ограниченная линия", "протяженная линия", "прямоугольник", "шар", "параллелепипед", "диск", "цилиндр", "эллипс" и др. К сожалению, геометрия создаваемых скоплений выражена не очень четко. Не менее 15-20 % объектов выходят за пределы обличья формируемых геометрических фигур.

2. Существуют возможности варьировать временем выхода скопления в заданную точку пространства- ускорять или замедлять его.

3. Потенциально возможно существенно изменять суммарную ЭПР вновь образуемых скоплений, как увеличивать ее значение, так и уменьшать, так что внешний наблюдатель, фиксирующий ЭПР, например, радиолокационной станцией, может воспринимать скопление сначала как хаотическое, а затем как угрожающий объект, а потом снова как распределенное в пространстве скопление непонятной формы, что может являться специальной задачей, которая и ставится перед создателем роя.

4. Основная проблема формирования целенаправленных хаотически организованных роев заключается в том, что найти статистические закономерности образования скоплений заданной геометрии на данном этапе исследований не удалось. Реализация всех трех методов осуществлялась в основном случайным подбором параметров для получения разнообразных геометрических фигур скоплений, что потребовало значительных трудозатрат. Такое решение не является уникальным; так, почти все природные алгоритмы включают эмпирические, так называемые "настроечные" коэффициенты для учета особенностей их реализации.

5. Подтверждена гипотеза о принципиальной возможности создания своего рода хаотических скоплений с имитацией нецеленаправленной деятельности для внешнего Наблюдателя.

## 5. Заключение

В последнее время возрастает значимость применения групп объектов управления в виде роев. Несмотря на неоднозначность термина, по смыслу рой, как группа объектов управления, отличается от стаи и всегда состоит из значительного количества малоразмерных объектов управления, расстояния между которыми сравнимы с размерами самих объектов. Определяющим в практических приложениях является форма и маневры, совершаемые роем. Однако в силу его компактности рой легко обнаружить и идентифицировать.

В работе подтверждена гипотеза о том, что используя модифицированную модель роевого движения К.Рейнольдса можно преобразовывать рой объектов управления в пространстве и во времени в скопления различной близкой к геометрической и произвольной формы, управляя временем их появления в заданном пространстве. При этом рассчитываемые интегральные значения ЭПР таких скоплений при маневрах могут существенно изменяться, что призвано вводить противника в заблуждение относительно истинной цели и назначения роя. В случае же активного воздействия противника на рой при включении в его состав как боевых, так и ложных элементов, пространственно-временные маневры могут повысить эффективность выполнения роевых задач.

## Литература

1. *Гарбук С.В., Губинский А.М.* Искусственный интеллект в ведущих странах мира: стратегии развития и военное применение.-М.: Знание, 2020.—590с.
2. *Лузан А.Г.*, Перспективы развития мини-БЛА и способы борьбы с ними. Часть I // Воздушно-космическая сфера. 2020. № 4. – С. 58-65.
3. *Еремин Г.Б., Гаврилов А.Д., Назарчук И.И.* Малоразмерные бемпилотники-новая проблема для ПВО. Электронный ресурс Режим доступа <http://otvaga2004.ru/armiya-i-vpk/armiya-i-vpk-vzglyad/malozmernye-bepilotniki/>, свободный
4. *Монахова У.В., Иванов Д.С.* Формирование роя наноспутников с помощью децентрализованного аэродинамического управления с учетом коммуникационных ограничений // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2018. № 151. 32 с. doi:10.20948/prepr-2018-151
5. *Иванов Д.Я.* Использование принципов роевого интеллекта для управления целенаправленным поведением массово применяемых микророботов в экстремальных условиях // Известия высших учебных заведений машиностроение. 2011.№9. – С. 70 – 78
6. *Соколов Н.А.* К проблеме противодействия беспилотным летательным аппаратам в условиях ограниченных ресурсов. Опыт Карабаха/ Н.А. Соколов, Д.А. Рябухин Д.А. // Известия ЮФУ. Технические науки. 2022.№1 (225). – С. 17-22.
7. *Фраквич М.* Роевой интеллект и управление формированием на основе CubeSat, 29.04.2023.[Электронный ресурс] Режим доступа: URL:<https://ts2.space.ru/роевой-интеллект-и-управление-формир/>
8. *A. Haider, A. Schmidt.* Defining the Swarm Across All Domains Joint Air Power Competence Centre Warfare Domains //Air Operations, July 2022. – URL: <https://www.japcc.org/articles/defining-the-swarm/>.
9. *Абросимов В.К.*, Коллективы интеллектуальных летательных аппаратов. М.: Издательский дом Наука, 2017. – 304 с.
10. *Мустаев А.Ф.* Стратегии управления роем беспилотных летательных аппаратов // Вестник науки. 2019. №3 (12) том 5. – С. 96 - 99.
11. *Reynolds, C.* Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model / C.Reynolds // Computer Graphics. – 1987. – V.21(4) – P. 25-34.