

УДК 658.051.012

О.К. Погодина

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков*

## РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ СОВМЕСТНОГО ПОЛЕТА

*Проанализированы теоретические и практические результаты моделирования полета группы беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Различные варианты организации полета связаны с целью использования множества БПЛА. Рассмотрена модель, сформированная по принципу приоритетности автономной цели полета. Задачей такой модели является соревнование БПЛА. Альтернативной моделью является взаимосвязь систем для достижения общей стратегической цели, где существует необходимость комбинировать задачи полета группы и отдельного БПЛА. Для дальнейшего изучения выбрана модель использования БПЛА в форме самоорганизующихся групп. Рассмотрены принципы модели К.Рейнольдса и элементы библиотеки базовых стереотипов адаптивного поведения. Разработана имитационная модель организации группового полета БПЛА для мониторинга территории, основанная на стереотипе «охрана территории».*

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, групповой полет, принципы самоорганизации движения, стереотипы адаптивного поведения.

### Введение

Успешное развитие программного обеспечения (ПО) для различных роботизированных систем привело к массовому внедрению таких технологий в разработку летательных аппаратов. Для беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) достижения в области разработки программного и аппаратного обеспечения дают возможность осуществлять полет в автоматическом режиме, проводить «обучение» управления полетом с использованием систем дистанционного управления. Одним из направлений исследований является разработка ПО планирования и обеспечения взаимодействия БПЛА.

### Обоснование необходимости имитационного моделирования взаимодействия БПЛА

Существует ряд известных систем моделирования взаимодействия БПЛА [1 – 3]. Организация KMeI Robotics использует 20 БПЛА для формирования различного вида фигур высшего пилотажа [1], при этом исключается возможность столкновения с возможными препятствиями. Следовательно, такая система позволяет комбинировать решение последовательности задач, связанных с автономными и централизованными целями полета. В [1] отсутствуют принципы и формальные модели реализации данной системы планирования взаимодействия БПЛА.

В работе [2] разрабатывается система моделирования полета группы БПЛА в условиях проведения соревнований. При этом формализуются автономные цели полета БПЛА, как агента. Отдельно

создается модель среды полета, в которой размещаются агенты. Таким образом, стратегическая цель для группы БПЛА отсутствует.

В работе [3] были рассмотрены принципы взаимодействия двух БПЛА при патрулировании территории и разработана нейросетевая система планирования полета. В данной работе управление групповым полетом представляется как иерархический процесс, который можно разбить на три уровня [3]:

- стратегический уровень (уровень планирования текущей цели);
- тактический уровень (уровень формирования траектории полета);
- исполнительный уровень.

Стратегический уровень, или уровень принятия решения о выборе поведения, состоит в оперативном планировании в реальном времени групповых действий летательных аппаратов с организацией их взаимопомощи и разрешением возникающих конфликтов в выборе направления полета во избежание столкновений БПЛА друг с другом. На этом уровне решается задача определения текущей цели для каждого из летательных аппаратов. Задачей тактического уровня является формирование траектории полета по заданным координатам цели. Третий, исполнительный уровень – это уровень системы управления самим БЛА, в задачи которого входит поддержание или отработка с помощью управляющих органов задающих воздействий по таким сигналам, как желаемое направление, скорость, высота полета к цели. На основании рассмотренных моделей был сделан вывод о разработке имитационной модели взаимодействия БПЛА для стратегического

уровня планирования полета с использованием принципов агентного моделирования. Задачей планирования полета является «стайное поведение» полувавтономных или автономных БПЛА. В качестве инструментальной среды моделирования выбрана Anylogic [4].

### Разработка параметрической зависимости агентной модели полета группы БПЛА

В основу описания агентной модели полета группы БПЛА были положены принципы самоорганизации движения модели К. Рейнольдса [5]:

– каждый  $i$ -й БПЛА должен придерживаться средней скорости  $V_{cp}$  соседних БПЛА в группе, облетающих локальную окрестность  $\Omega(b_i)$  в момент времени  $t$ ,

$$\Omega(b_i) \subset \Omega, b_i \notin \Omega(b_i),$$

$$\Omega(b_i) = \{b_1, \dots, b_{N(\Omega(b_i))}\},$$

$\Omega(b_i)$  – эллипсоид с осью  $d_x$ , где  $d_x = f(V_i)$ :

$$V_i \rightarrow V_{cp};$$

– каждый БПЛА должен стремиться занять положение в пространстве, близкое к центру  $P^*$  окрестности  $\Omega(b_i)$ ,  $P = (x_g, y_g, z_g)$  – текущие координаты:

$$P_i \rightarrow P^*;$$

–  $|P_i - P_j| \geq \delta_{min}$  и  $|P_i - P_{\otimes}| \geq \delta_{min}$ : каждый БПЛА должен соблюдать безопасную дистанцию, где  $i, j = 1, \dots, N(\Omega(b_i))$ ,  $i \neq j$ ,  $\delta_{min}$  – минимально допустимое расстояние от  $i$ -го БПЛА  $b_i$  до соседнего БПЛА  $b_j$  и препятствий  $\otimes$ .

Для реализации данных принципов сформирована графическая модель БПЛА (рис. 1), согласно которой каждый ЛА имеет свою локальную окрестность – эллипсоид, вытянутый вдоль вектора скорости.

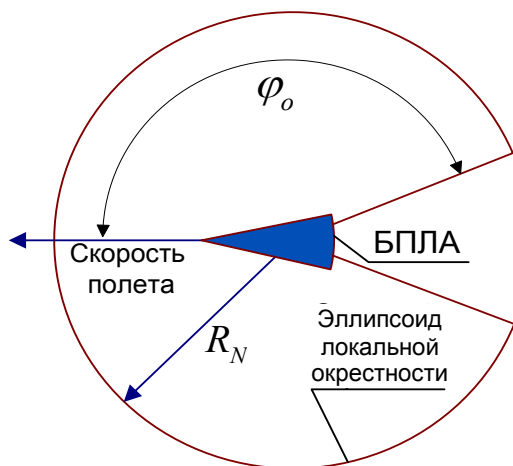


Рис. 1. Графическая модель БПЛА

Местный радиус эллипсоида  $R_N$  зависит от скорости полета и определяется сенсорными возможностями БПЛА. Также в модели задается максимальный телесный угол обзора  $\varphi_0$ , который является дополнительным ограничением локальной окрестности БПЛА. Другие объекты за пределами локальной окрестности в момент времени  $t$  не рассматриваются.

Рассмотрены следующие модели имитации полета БПЛА:

– модель плоского движения, разработанная Mattias Fagerlund [5];

– модель пространственного движения, разработанная Robert Platt [6];

– моделирование движения мобильных роботов, рассмотренная Бурдуном И.Е., Бубиным А.Р. [7].

В рассмотренных моделях на основе принципов К. Рейнольдса разработана библиотека базовых стереотипов адаптивного поведения «стай» БПЛА, которые представляются полезными для рассматриваемой области приложений. Библиотека включает следующие стереотипы:

V1: «Приблизиться к объекту»,

V2: «Удалиться от объекта»,

V3: «Преследовать объект»,

V4: «Убегать от объекта»,

V5: «Следовать за лидером»,

V6: «Перемещаться (бродить) в заданном районе случайным образом»,

V7: «Сопровождать объект с заданным смещением»,

V8: «Преследовать объект с заданным смещением»,

V9: «Прибыть в заданную точку»,

V10: «Причалить к заданной точке»,

V11: «Избегать столкновений с неподвижными препятствиями»,

V12: «Следовать по заданной траектории»,

V13: «Огибать рельеф местности»,

V14: «Следовать вдоль стены»,

V15: «Избегать столкновений с подвижными объектами»,

V16: «Находиться в пределах заданной области»,

V17: «Следовать вдоль линий векторного поля»,

V18: «Следовать вдоль градиента потенциального поля»,

V19: «Следовать по сигналам поля искусственных феромонов»,

V20: «Рассредоточиться в заданном районе»,

V21: «Пройти между заданными полями (препятствиями)»,

V22: «Найти точку по заданным координатам»,

V23: «Искать объект (процесс)»,

- V24: «Наблюдать (объект, процесс)»,
- V25: «Взять объект(ы)»,
- V26: «Доставить объект(ы) в заданную точку»,
- V27: «Охранять территорию»,
- V28: «Охранять периметр»,
- V29: «Охранять (стеречь) объект (добычу)»,
- V30: «Блокировать продвижение объекта»,
- V31: «Защищать территорию (прайд)»,
- V32: «Защищать периметр»,
- V33: «Защищать объект»,
- V34: «Заслонить объект»,
- V35: «Обездвижить объект»,
- V36: «Охотиться»,
- V37: «Самопожертвовать (режим камикадзе)»,
- V38: «Двигаться в заданном направлении»,
- V39: «Сформировать заданный порядок»,
- V40: «Создать детерминированный хаос».

Существенно, что библиотека {V1, ..., V40} является открытой (наращиваемой), а алгоритмы, которые реализуют базовые стереотипы адаптивно-го поведения, не зависят от класса БПЛА.

В рамках проведенного исследования были проанализированы следующие стереотипы движения: V6, V20, V27. Для обеспечения безопасности полета, выбранные стереотипы были объединены с V1, V2, V11, V13, V15.

Целью моделирования было рассмотрение возможности мониторинга территории с использованием выбранной стратегии. В качестве параметра эффективности мониторинга была выбрана площадь территории, которая будет рассмотрена за выбранный период времени.

Для этого в имитационной модели была реализована функция «окрашивания» территории, находящейся в эллипсоиде локальной окрестности, под наблюдаемыми БПЛА (рис. 2).

По окончании времени мониторинга (задается пользователем до эксперимента), вычисляется площадь «окрашенной» территории. В результате проведенных экспериментов получено, что для мониторинга замкнутой территории лучшей стратегией полета будет V27 – «Охранять территорию».

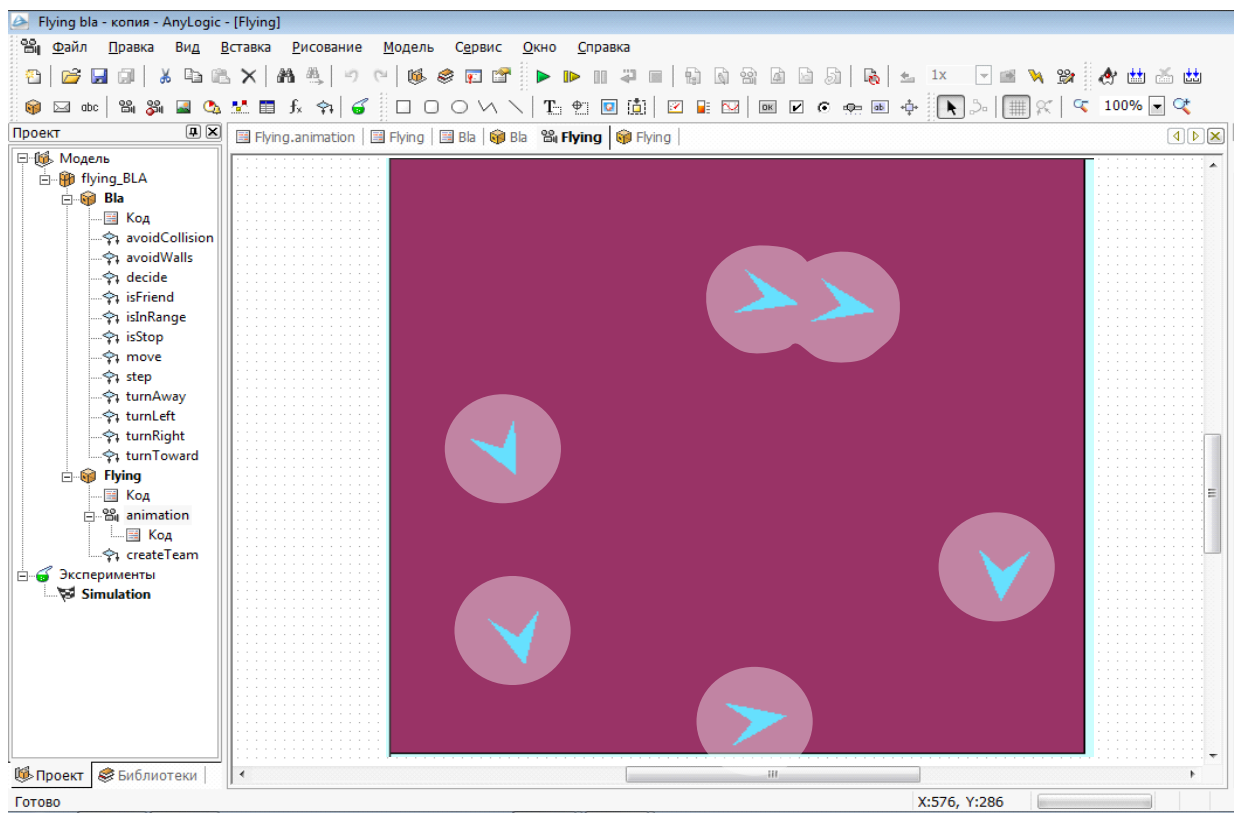


Рис. 2. Имитационная модель

## Заключение

В результате проведенного исследования опытных разработок в области систем мониторинга полета группы БПЛА было получено, что наибольший полезный эффект ожидается при использовании БПЛА в форме самоорганизующихся групп

(стай, роев, кластеров, порядков и т.п.) с переменной – по времени и по функциям управления – степенью автономности: от дистанционного управления и до полностью автономного поведения. В целом, стайный принцип применения БПЛА имеет большой потенциал для обеспечения надёжности («робастности»), эффективности и безопасности

выполнения работ в сложных и неопределённых условиях эксплуатации. Потенциал и пределы практических приложений БПЛА стайного применения в настоящее время определяются уровнем характеристик бортового комплекса мультимодальных датчиков, систем связи, навигации, управления и энергообеспечения. Второе научно-технологическое направление, которое также является критически важным для успешного развития БПЛА – это имитационное моделирование, искусственный интеллект и виртуальное прототипирование (вычислительный эксперимент) с целью ускорения и удешевления процесса создания и испытаний образцов БПЛА различного назначения.

В работе проанализирована имитационная модель, построенная на основе принципов модели К.Рейнольдса и элементов библиотеки базовых стереотипов адаптивного поведения. В результате проведенных экспериментов, для дальнейших исследований была выбрана стратегия полета «охрана территории».

### Список литературы

1. KMel Robotics LLC [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://kmelrobotics.com>.
2. Технология моделирования одного класса мультиагентных систем на основе автоматного программирования на примере игры «Соревнование летающих тарелок».

лок»: учебное пособие / Д.А. Паращенко, Ф.Н. Царев, А.А.Шальто и др. – СПб.: НИУ ИТМО, 2006. – 107 с.

3. Мирзоян Л.А. Нейросетевая система планирования полета группы беспилотных летательных аппаратов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01 / Мирзоян Лолита Артуровна. – М., 2007. – 25 с.

4. Болгаров А.В. Влияния модели информационного взаимодействия на содержание проектов программы информатизации / А.Д. Болгаров, О.К. Погудина, И.Н. Бабак, Б.В. Гайдабрус // Системы обработки информации. – Х.: ХУПС, 2011. – Вып. 8(98). – С. 266-274.

5. Craig W. Reynolds Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model / SIGGRAPH '87 Proceedings of the 14th annual conference on Computer graphics and interactive techniques – NY, USA: ACM, 1987. – P. 25-34.

6. Robert Platt. 3D Boids Simulation. [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: [http://www.abs2net.com/robert/3d\\_boids](http://www.abs2net.com/robert/3d_boids).

7. Бурдун И.Е. Прикладные исследования в области обеспечивающих технологий для безоператорных систем «стайного» применения: обзор по материалам иностранной печати / И.Е. Бурдун // Сб. тезисов докладов III Школы-семинара СибНИА «Аэродинамика и динамика полёта летательных аппаратов», 31 января - 3 февраля 2005 г. – Новосибирск: Седова Заимка, 2005. – С. 26-27.

Поступила в редколлегию 15.08.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.М. Илюшко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

### РОЗРОБКА ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ВЗАЄМОДІЇ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ СУМІСНОГО ПОЛЬОТУ

О.К. Погудіна

Проаналізовані теоретичні і практичні результати моделювання польоту групи безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Різні варіанти організації польоту зв'язані з метою використання безлічі БПЛА. Розглянута модель, сформована за принципом пріоритетності автономної мети польоту. Завданням такої моделі є змагання БПЛА. Альтернативною моделлю є взаємозв'язок систем для досягнення загальної стратегічної мети, де існує необхідність комбінувати завдання польоту групи і окремого БПЛА. Для подальшого вивчення вибрана модель використання БПЛА у формі груп, що самоорганізуються. Розглянуті принципи моделі К.Рейнольдса і елементи бібліотеки базових стереотипів адаптивної поведінки. Розроблена імітаційна модель організації групового польоту БПЛА для моніторингу території, заснована на стереотипі «охрана території».

**Ключові слова:** безпілотний літальний апарат, груповий політ, принципи самоорганізації руху, стереотипи адаптивної поведінки.

### DEVELOPMENT OF SIMULATION MODEL OF CO-OPERATION OF PILOTLESS AIRCRAFTS FOR RESEARCH OF POSSIBILITY OF JOINT FLIGHT

O.K. Pogudina

The theoretical and practical results of design of flight of group of pilotless aircrafts are analysed (BPLA). The different variants of organization of flight are CPLD with the purpose of the use of great number of BPLA. A model, formed on principle of priority of autonomous purpose of flight, is considered. The task of such model is a competition of BPLA. An alternative model is intercommunication of the systems for achievement of general strategic purpose, where a necessity to combine the tasks of flight of group and separate BPLA is. For a further study the model of the use of BPLA is chosen in form of the self-optimizing groups. Principles of model of K.Reynolds and elements of library of base stereotypes of adaptive conduct are considered. The simulation model of organization of group flight of BPLA is developed for monitoring of territory, «guard of territory based on a stereotype».

**Keywords:** pilotless aircraft, group flight, principles of self-optimizing of motion, stereotypes of adaptive conduct.