

УДК 001.57, 004.852, 004.896, 004.942, 519.876.5

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ СТАНЦИЙ ОБСЛУЖИВАНИЯ БПЛА

И.Ю. Данилов (*danilov.iuu@kgeu.ru*)

Казанский государственный энергетический университет,  
Казань

И.М. Афанасьев (*i.afanasyev@innopolis.ru*)

Университет Иннополис, Иннополис

**Аннотация.** Увеличение длительности полёта беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) является важной задачей мобильной робототехники. Для достижения этой цели может использоваться автоматизация перезарядки БПЛА с помощью наземных станций обслуживания. Подобный робототехнический комплекс (станция и БПЛА) востребован для охраны и мониторинга объектов различной инфраструктуры. Однако, эффективность системы зависит от оптимального количества станций и их расположения для мониторинга заданной площади. Статья предлагает интеллектуальный алгоритм расчета искомых параметров, основанный на комбинировании имитационного моделирования и генетического алгоритма поиска. Входами алгоритма являются координаты зоны мониторинга и областей, запретных для полетов БПЛА, вероятности проникновения нарушителей на охраняемую территорию через внешний периметр, информация о скорости движения и зарядки БПЛА, количестве дронов, хранимых и обслуживаемых на одной станции, скорость движения нарушителя и частота инцидентов. В ходе многократного имитационного моделирования процесса вторжения в рассматриваемую область и перехвата цели с помощью БПЛА, происходит оптимизация расположения станций обслуживания. Данный подход следует парадигме обучения с подкреплением. В качестве функции оптимизации используется соотношение эффективного полетного времени для сопровождения цели к общему времени, проведенному всеми БПЛА в воздухе. На основе заданного значения критерия оптимизации происходит подбор минимального числа станций, способных решать требуемую задачу охраны и мониторинга.

**Ключевые слова:** беспилотный летающий аппарат (БПЛА), наземная станция обслуживания, имитационное моделирование, генетический алгоритм поиска, обучение с подкреплением

## Введение

В настоящее время широкое использование летательных аппаратов вертикального взлета и посадки (Vertical Take-Off and Landing, VTOL) ограничивается недостаточным временем их пребывания в воздухе [Nogrouzi Ghazbi et al., 2016]. Одним из подходов при решении этой проблемы является создание роботизированного комплекса, состоящего из летательного аппарата и наземной станции обслуживания, автоматически осуществляющей зарядку/замену элемента питания дрона (Рис. 1).



Рис. 1 Автоматизированная наземная станция обслуживания БПЛА вертикального взлета и посадки

Имитационное моделирование мобильных объектов, хотя и имеет некоторые ограничения [Умников и др., 2018], но часто используется в исследованиях анализа движения в 3D симуляторах, таких как Gazebo [Afanasyev et al., 2015; Shimchik et al., 2016; Sokolov et al., 2017], MATLAB/Simulink [Khusainov et al., 2016], среды ROS/RViz [Ibragimov et al., 2017; Bokovoy et al., 2018, Filipenko et al., 2018], гоночных симуляторов [Zubov et al., 2018] и прикладных программ для захвата движения и генерации соответствующих моделей [Gabbasov et al., 2015]. Различные задачи мониторинга на базе БПЛА исследуются в работах [Афанасьев и др., 2015; Vu et al., 2018; Sabirova et al., 2019], и решения по автоматизированным системам обслуживания БПЛА путем зарядки/замены батарей анализируются в исследованиях [Данилов и др., 2016; Нго и др., 2017]. Применение подобных комплексов имеет большие перспективы, поскольку позволяет автоматизировать использование БПЛА в целях мониторинга и охраны объектов различной инфраструктуры, обработки посевов и сельхозугодий, доставки малогабаритных грузов, мониторинга дорожной обстановки и т.д. [Нго и др., 2017]. Тем не менее,

остаются открытыми вопросы эффективного применения таких систем, в частности, оптимального расположения станций и минимально необходимого их количества для организации мониторинга заданной площади. В работе описывается подход на базе математического моделирования, который позволяет ответить на эти вопросы.

## **1. Роботизированная станция обслуживания БПЛА**

Наземная станция представляет собой роботизированный комплекс, способный хранить БПЛА внутри себя продолжительное время, поддерживая заданную температуру и влажность, за счет наличия систем обогрева, охлаждения и осушки воздуха. При этом внешние погодные условия могут быть жесткими: камера хранения проектируется так, чтобы температура снаружи могла меняться от  $-40$  до  $+50$  С, а влажность достигать 100%, что отличает проектируемую станцию для российских условий от аналогичной разработки компании Airobotics [Airobotics, 2018]. Если во время выполнения задания у дрона заканчивается заряд батареи, он автоматически возвращается на станцию, которая принимает его, и осуществляет обслуживание. После посадки БПЛА, внутри ангара восстанавливаются заданные значения температуры и влажности. Всё это происходит в автоматическом режиме без участия человека.

## **2. Описание подхода**

Для решения задачи оптимального размещения станций в зоне мониторинга используется подход, который совмещает имитационное моделирование и оптимизационный алгоритм (Рис.2). Данный подход следует парадигме «обучения с подкреплением» (Reinforcement learning). В качестве среды моделирования выступает имитационный симулятор, а в качестве оптимизационного алгоритма выбран генетический алгоритм поиска. В результате работы программы происходит итеративный поиск оптимальных значений. В начале, искомые параметры, формирующие так называемую «хромосому», выбираются случайным образом. Прогон каждой из хромосом через имитационный симулятор позволяет получить обратную связь в виде значения целевой функции и оценить качество модели. Генетическая селекция, отбор лучших хромосом и их модификация, направленная на улучшение функции приспособления, позволяет последовательно, шаг за шагом, достигнуть оптимальных значений искомых параметров.

## 2.1 Процесс имитационного моделирования эксперимента

В ходе многократного имитационного моделирования процесса вторжения в рассматриваемую область и перехвата цели с помощью БПЛА, происходит оптимизация расположения станций обслуживания. В качестве функции оптимизации  $F_i$  используется соотношение эффективного полетного времени (таким считается время, потраченное на сопровождение цели) к общему времени, проведенному всеми БПЛА в воздухе.

$$F_i = \frac{\sum_{\text{по всем вылетам всех ЛА}} t_j^{\text{эфф}}}{\sum_{\text{по всем вылетам всех ЛА}} t_j^{\text{общ}}}$$

При решении задачи мы исходим из предположения, что целью мониторинга является определение типа объекта, нарушившего границу, и его сопровождение. Для этого БПЛА использует бортовую камеру, сигнал которой передается на пульт управления мониторинга и охраны. Задача считается выполненной, если нарушитель попал в поле зрения камеры. С точки зрения симуляции это означает, что нарушитель оказывается в границах квадрата, центр которого совпадает с положением дрона. Длина стороны квадрата является настраиваемым параметром. При этом БПЛА движется так, чтобы совместить свою координату с координатой объекта-нарушителя.

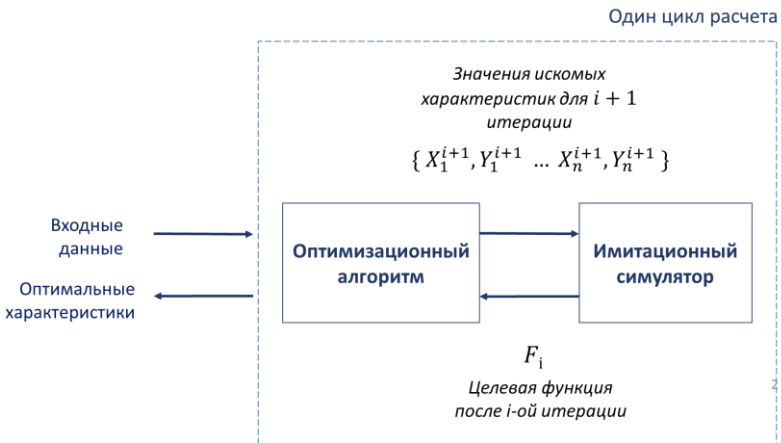


Рис. 2. Блок-схема предложенного подхода к решению задачи оптимального размещения станций, совмещающего имитационное моделирование и оптимизационный алгоритм на базе «обучения с подкреплением».

## 2.2 Описание имитационной модели

Имитационная модель состоит из следующих подсистем (Рис.3):

- Управления временем
- Возникновения угрозы
- Формирования траектории движения объекта-нарушителя
- Выбора станции и запуска БПЛА
- Управления действиями БПЛА
- Выхода из симуляции.

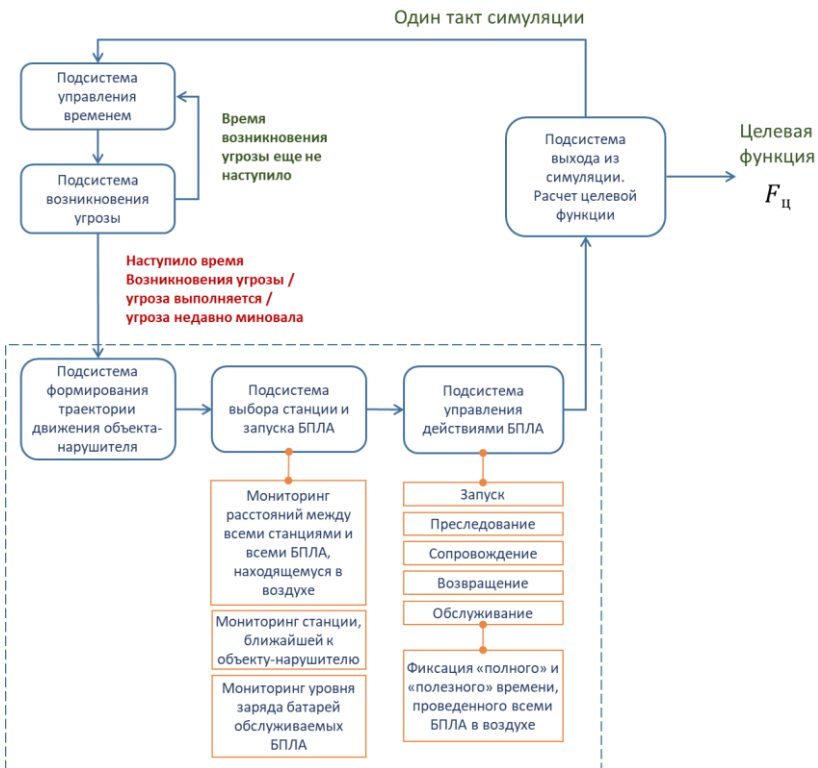


Рис. 3. Блок-схема имитационной модели

Входные данные:

- $\Delta t$  – число тактов, приходящихся на 1 секунду реального времени. По умолчанию  $\Delta t = 1$ . Величина  $T = 86400\Delta t$  называется длиной «симуляционных суток».

- Прямоугольная дискретная координатная сетка с шагом  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  по осям абсцисс и ординат.  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  измеряются в метрах и привязаны к реальной задаче.
- $\Delta X \cdot k$  – длина стороны квадрата поля зрения камеры.
- $(\tilde{X}_1, \tilde{Y}_1 \dots \tilde{X}_N, \tilde{Y}_N)$  - координаты зоны мониторинга, заданные в виде точек многоугольника.
- $(\tilde{X}'_1, \tilde{Y}'_1 \dots \tilde{X}'_N, \tilde{Y}'_N)$  - координаты внутренних областей, запретных для полетов БПЛА, заданные в виде точек многоугольника.
- $(P_1, \dots, P_N)$  - вероятности проникновения на охраняемую территорию через тот или иной отрезок внешнего периметра.
- $V_{uav}$  - скорость движения БПЛА, выраженная в количестве метров, которое дрон пролетает за 1 такт симуляции.
- $R_c$  - Скорость зарядки аккумулятора БПЛА,
- Считается, что зарядка аккумулятора происходит равномерно, в соответствии с функцией:

$$ChargeLevel = R_c \cdot t \cdot 100\%, \quad t \leq \frac{1}{R_c}$$

$$ChargeLevel = 100\%, \quad t > \frac{1}{R_c}$$

- $R_d$  - Скорость разряда аккумулятора БПЛА. Считается, что разряд аккумулятора происходит равномерно, в соответствии с функцией:

$$ChargeLevel = 100\% - R_d \cdot t \cdot 100\%, \quad t \leq \frac{1}{R_d}$$

$$ChargeLevel = 0\%, \quad t > \frac{1}{R_d}$$

Максимальное время полета (в тактах):

$$t_{max} = \frac{1}{R_d}$$

- $K$  - количество БПЛА, одновременно хранимых на одной станции.
- $V_{dng}$  - скорость движения объекта, нарушившего охраняемое пространство.
- $v$  - количество возникающих инцидентов за 86400 тактов симуляции (1 сутки в пересчете на реальное время).

**Искомые параметры.** Исходя из режима расчета ими могут быть:

- $\{ X_1^{i+1}, Y_1^{i+1} \dots X_n^{i+1}, Y_n^{i+1} \}$  - Искомые координаты расположения наземных станций обслуживания.
- Минимально необходимое число станций  $M$  и их координаты.

### 2.3 Работа имитационной модели

Подсистема управления временем осуществляет инкрементальное тактирование алгоритма. Подсистема возникновения угрозы случайным образом, на основе параметра  $v$ , генерирует факт угрозы. Во время первого ( $i = 1$ ) такта каждые новых «симуляционных суток» с помощью генератора псевдослучайных чисел вычисляются номера тактов, в которые произойдут события пересечения периметра:

$$(t_1, t_2 \dots t_v)$$

По умолчанию, события пересечения периметра распределены равномерно, на всем временном отрезке  $(1, T]$ . Если временной счетчик достигает одного из указанных выше номеров, подсистема помещает в центр одного из отрезков границы охраняемой области точку, характеризующую местоположение объекта нарушителя. При этом выбор отрезка осуществляется на основании заданных ранее вероятностей:

$$(P_1, \dots, P_N)$$

Подсистема формирования траектории управляет движением объекта-нарушителя. Он движется по ломаной прямой:

$$\begin{aligned} x &= k_x t + b_x \\ y &= k_y t + b_y \end{aligned}$$

$k_x, k_y, b_x, b_y$  – изменяются случайным образом через каждые 10 тактов симуляции. В самом начале коэффициенты выбираются таким образом, чтобы объект начал двигаться перпендикулярно стороне многоугольника, внутрь области.

Подсистема выбора станции и запуска БПЛА определяет станции:

С которой взлетает БПЛА для перехвата угрозы.

Куда возвращается БПЛА с разряженной батареей.

Для этого система делит пространство многоугольника с помощью диаграммы Вороного, в которой центрами кластеров выступают координаты станций. Затем, она осуществляет мониторинг всех расстояний, между всеми станциями и находящимися в полете летательными аппаратами, а также расстояние от всех станций до объекта-нарушителя. Зная скорость движения БПЛА, система пересчитывает эти расстояния во время  $t_0$ , которое дрон потратит на подлет к цели. Если оставшееся время (с учетом текущего заряда аккумулятора), которое ЛА сможет потратить на сопровождение цели, больше, чем:

$$t_{\text{сопр}} = t_{\text{полета}} - 2t_0 = \frac{\text{Уровень заряда в \%}}{100\%R_d} - 2t_0 > 0.1t_0$$

то система принимает решение о старте БПЛА с данной станции.

Аналогичным образом происходит выбор станции, на которую дрон отправиться в случае низкого заряда аккумулятора. Этой станцией может быть та, с которой он осуществил взлет, так и любая другая, на которой базируется БПЛА способный подменить его. При этом обмен осуществляется так, чтобы не прекращать сопровождения цели. Поэтому в каждый новый такт симуляции происходит перерасчет станции, куда дрон может вернуться в случае угрозы разряда аккумулятора. Подсистема управления действиями БПЛА рассчитывает направление движения в соответствии с кривой погони. Подсистема выхода из симуляции осуществляет подсчет функции приспособления, а также времени, прошедшего с начала симуляции. В случае достижения заданного времени она возвращает в общий цикл ее значение.

## 2.4 Оптимизация расположения методом генетического алгоритма

В качестве хромосомы выступает множество  $\{ X_1^{i+1}, \dots, X_n^{i+1}, Y_1^{i+1}, \dots, Y_n^{i+1} \}$  содержащее искомые координаты расположения наземных станций обслуживания. В самом начале популяция генерируется случайным образом. Выбор родителей происходит методом панмиксии, а скрещивание – точечным методом. К получившимся значениям добавляются небольшие мутации, представляющие собой равномерно распределенные случайные числа, не превышающие 3% от максимальных ширины и длины определенного ранее многоугольника. При этом, получившиеся в результате координаты, не должны выходить за границы многоугольника. Селекция происходит методом рулетки, и затрагивает всю популяцию.

Критерием останова является достижение числа поколений, отпущенных на эволюцию, либо (что важнее) нахождение глобального, либо субоптимального решения. В процессе решения производится несколько «встрясок» системы, в процессе которых поколение генерируется заново. Это позволяет с большей долей уверенности утверждать, что найден именно глобальный максимум. В том случае, если необходимо найти минимальное число станций для мониторинга заданной области, генетический поиск осуществляется для последовательно увеличивающегося числа станций до тех пор, пока не будет достигнуто необходимое значение целевой функции. В силу того, что она отражает эффективность работы системы охраны и мониторинга не рекомендуется использовать значение целевой функции меньше 0.05, поскольку на сопровождение цели в этом случае будет тратиться менее 5% всего полетного времени БПЛА.



## Заключение

В статье рассматривается задача увеличения длительности полёта беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) на базе робототехнической станции обслуживания с функцией хранения БПЛА для автоматической перезарядки мультироторных дронов. Подобная станция предназначена для охраны и мониторинга объектов различной инфраструктуры. В статье изучена эффективность применения таких станций, а также решаются задачи определения требуемого количества станций и оптимального их размещения для мониторинга заданной площади. С этой целью предлагается интеллектуальный алгоритм расчета искомых параметров, основанный на комбинировании имитационного моделирования и генетического алгоритма поиска. Входами алгоритма расчета являются координаты зоны мониторинга и внутренних областей, закрытых для полетов БПЛА, вероятности проникновения на охраняемую территорию через внешний периметр, информация о скорости движения БПЛА, его зарядке, количестве БПЛА, одновременно хранимых и обслуживаемых на одной станции, скорости движения объекта-нарушителя, а также данные о частоте возникающих инцидентов. Статья не только предлагает методологию решения задачи оптимального размещения станций и имитационного моделирования с оптимизационным алгоритмом, следующим парадигме «обучения с подкреплением» (reinforcement learning), но и описывает проектируемую конструкцию станции замены батарей. Путем многократного имитационного моделирования процесса вторжения нарушителя в рассматриваемую область и перехвата цели с помощью БПЛА, происходит оптимизация расположения станций обслуживания. В качестве функции оптимизации используется отношение эффективного полетного времени для сопровождения цели к общему времени, проведенному всеми БПЛА в воздухе. На основе заданного критерия оптимизации подбирается минимальное число станций, способных решать требуемую задачу охраны и мониторинга.

## Список литературы

- [Афанасьев и др., 2015] Афанасьев И.М. и др. Навигация гетерогенной группы роботов (БПЛА и БНР) через лабиринт в 3D симуляторе Gazebo методом вероятностной дорожной карты. Сб. БТС-ИИ, 18-25, 2015.
- [Данилов и др., 2016] Данилов И.Ю. и др. Автоматизированные системы для увеличения длительности полета электрических мультикоптеров. Робототехника и искусственный интеллект, 19-24, 2016.
- [Нго и др., 2017] Нго К. Т., Солная О. Я., Ронжин А. Л. Анализ подвижных роботизированных платформ для обслуживания аккумуляторов беспилотных летательных аппаратов. Труды МАИ (95), 11-11, 2017.

- [Умников и др., 2018] Умников Е.В., Горковенко В.П. Риски моделирования и симуляции робототехнических комплексов, Известия Института инженерной физики, 1 (47): 82-85, 2018.
- [Afanasyev et al., 2015] I. Afanasyev et al. ROS-based SLAM for a Gazebo-simulated mobile robot in image-based 3D model of indoor environment. In Proc. ACIVS. Springer, 273-283, 2015.
- [Airobotics, 2018] Airobotics Solution, Automated Industrial drones, <https://www.airoboticsdrones.com> [Электронный ресурс], 2018.
- [Bokovoy et al., 2018] A. Bokovoy, M. Fomin, K. Yakovlev. Implementation of the Pathfinding System for Autonomous Navigation of Mobile Ground Robot. In Proc. ITTMM-WSS, 72-78, 2018.
- [Filipenko et al., 2018] Filipenko M., Afanasyev I. Comparison of various slam systems for mobile robot in an indoor environment. In Proc. IS, 2018.
- [Gabbasov et al., 2015] B. Gabbasov, I. Danilov, I. Afanasyev, and E. Magid. Toward a human-like biped robot gait: Biomechanical analysis of human locomotion recorded by Kinect-based Motion Capture system, ISMA, 2015.
- [Ibragimov et al., 2017] I. Z. Ibragimov et al. Comparison of ROS-based visual slam methods in homogeneous indoor environment. In WPNC, 1-6, 2017.
- [Khusainov et al., 2016] Khusainov R. et al. Bipedal robot locomotion modelling with virtual height inverted pendulum and preview control approaches in Simulink environment. In Proc. JRNAL (3): 182-187, 2016.
- [Norouzi Ghazbi et al., 2016] S. Norouzi Ghazbi et al. Quadrotors unmanned aerial vehicles: a review. Int. J. on Smart Sensing & Intel. Systems 9.1, 2016.
- [Sabirova et al., 2019] A. Sabirova et al., Ground Profile Recovery from Aerial 3D LiDAR-based Maps. In Proc. IEEE FRUCT, Moscow, Russia, 2019.
- [Sokolov et al., 2017] Sokolov M. et al. Modelling a crawler-type UGV for urban search and rescue in Gazebo environment. In Proc. ICAROB, 2017.
- [Shimchik et al., 2016] I Shimchik, A Sagitov, I Afanasyev, F Matsuno, E Magid. Golf cart prototype development and navigation simulation using ROS and Gazebo. MATEC Web of Conferences, 75, EDP Sciences, 2016.
- [Vu et al., 2018] Q. Vu, M. Rakovic, V. Delic & A. Ronzhin. Trends in Development of UAV-UGV Cooperation Approaches in Precision Agriculture. In LNCS (11097), 213-221, Springer, Cham, 2018.
- [Zubov et al., 2018] Zubov I. et al. Autonomous Drifting Control in 3D Car Racing Simulator. In Proc. IEEE Intelligent Systems, 2018