

Р.Ф. Файзуллин, Е.А. Магид

**ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ РЕШЕНИЯ
ЗАДАЧИ ПОКРЫТИЯ ТЕРРИТОРИИ ГРУППОЙ БЕСПИЛОТНЫХ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПРИ ПОДДЕРЖКЕ НАЗЕМНОЙ
МОБИЛЬНОЙ ЗАРЯДНОЙ СТАНЦИИ: ФОРМИРОВАНИЕ ХРОМОСОМЫ**

Статья посвящена решению актуальной проблемы покрытия территории при помощи беспилотных летательных аппаратов (БЛА) с использованием мобильных зарядных станций. Современные практические задачи покрытия территории требуют одновременного участия нескольких БЛА с целью оптимизации временных затрат в ходе миссии. Другим ограничивающим фактором в контексте охвата территории с использованием БЛА является длительность автономной работы этих систем. Из-за ограниченной дальности полета на одном заряде батареи может возникнуть необходимость в использовании зарядных станций для завершения миссии охвата. Статические зарядные станции позволяют зарядить аккумуляторы БЛА, однако это приводит к прерыванию миссии и увеличивает время, необходимое для завершения охвата. При использовании статических зарядных станций важно так же правильно выбрать их местоположение, учитывая доступные места для установки. При этом сам процесс установки зарядных станций требует времени, что делает их использование нецелесообразным в миссиях, где покрытие территории нужно осуществить в кратчайшие сроки, например, при спасательных или поисковых операциях. Мобильные зарядные станции, которые способны перемещаться по территории для оптимизации процесса зарядки или замены аккумуляторов БЛА лишены этих недостатков. Возникает задача планирования траекторий движения не только для БЛА, но и мобильной зарядной станции. При совместном планировании движения повышается эффективность охвата, но одновременно возрастает и вычислительная сложность при поиске траекторий. В настоящей статье решается задача эффективного покрытия территории с использованием нескольких БЛА и мобильной зарядной станции при помощи генетического алгоритма. Для адаптации задачи к использованию генетического алгоритма предлагается и обосновывается способ формирования хромосомы, которая корректно отражает решение задачи и позволяет закодировать траектории движения БЛА, мобильной зарядной станции, а также учитывает время и место проведения подзарядки или замены аккумулятора БЛА. Для исследования предложенного алгоритма разработано программное обеспечение на языке программирования Python. Адекватность предложенного подхода подтверждена результатами моделирования.

Генетический алгоритм; мобильный робот; беспилотный летательный аппарат (БЛА); групповое взаимодействие роботов; планирование маршрута; задача покрытия; формирование хромосомы.

R.F. Faizullin, E.A. Magid

**APPLICATION OF A GENETIC ALGORITHM TO THE AREA COVERAGE
PROBLEM WITH A GROUP OF UNMANNED AERIAL VEHICLES
SUPPORTED BY A GROUND MOBILE CHARGING STATION:
A CHROMOSOME FORMATION**

The paper considers a problem of area coverage by unmanned aerial vehicles (UAV) using mobile charging stations. Practical area coverage tasks require a simultaneous use of several UAVs in order to optimize time consumption during a mission. Another limiting factor in UAV-based coverage is a duration of a UAVs' single-battery autonomous operation. To complete a large territory coverage mission static or mobile charging stations could be employed in order to recharge or replace an onboard battery. Static charging stations cause a mission interruption and increase time required to complete the coverage mission. It is also important to choose proper locations in the case of static charging stations. However, a process of installing the charging stations is time-consuming, which makes them impractical for missions where coverage must be

achieved within a short period of time, e.g., such as rescue or emergency search operations. Mobile charging stations can move around the area to optimize a UAV battery recharging or replacing process. A challenge of the latter case is to plan motion trajectories not only for UAVs but also for a mobile charging station. Joint motion planning improves coverage efficiency but increases computational complexity of a trajectory planning. This paper considers a problem of efficient area coverage with multiple UAVs and a mobile charging station using a genetic algorithm. To adapt a genetic algorithm for the coverage problem, a chromosome formation method is proposed in the paper. The method allows encoding trajectories of the UAVs and the mobile charging station, and takes into account time and a place of charging (replacing) the UAV batteries. To evaluate the proposed approach, a software was developed in Python programming language. The obtained results of the simulation demonstrated feasibility of the proposed approach.

Genetic algorithm; mobile robot; unmanned aerial vehicle (UAV); group robot interaction; path planning; coverage problem; chromosome formation.

Введение. Задача покрытия территории [1] подразумевает посещение или обследование мобильным роботом всех точек карты в выделенных границах и естественным образом возникает из практических задач, таких как поисково-спасательные операции [2] или картография [3]. Решение задачи покрытия часто осуществляется с применением БЛА [4], поскольку данный тип мобильных роботов способен быстро охватывать обширные территории, преодолевая ограничения, связанные с рельефом местности и препятствиями на земле [5].

При постановке задачи покрытия нередко вводятся дополнительные ограничительные критерии. Например, ограничение по времени на проведение покрытия территории при выполнении поисково-спасательной операции [6]. При использовании единственного БЛА на больших по размеру территориях в условиях ограниченного времени задача становится неразрешимой. Это приводит к необходимости привлечения группы БЛА, где несколько аппаратов одновременно [7] охватывают территорию, избегая столкновений между собой [8]. Использование нескольких мобильных роботов повышает надежность системы и увеличивает скорость завершения миссии, но при этом задача поиска пути покрытия для группы БЛА становится более вычислительно сложной [9]. Другим ограничивающим фактором является время автономной работы БЛА на одном заряде батареи, за которое он способен преодолеть ограниченное расстояние. Расход энергии зависит от веса и габаритов самого БЛА, траектории полета, погодных условий и ряда других факторов [10].

В научной литературе рассматриваются несколько способов решения проблемы недостаточности единственного заряда батареи робота для исследования большой территории; самыми популярными являются подзарядка или замена батареи. Замена батареи БЛА [11] представляет собой более быстрый способ решения, но технологически он более сложен по сравнению с подзарядкой. Подзарядка может производиться на стационарных [12] или мобильных пунктах зарядки [13]. Стационарные пункты обладают преимуществом в обслуживании, так как они могут быть подключены к источникам энергии или использовать возобновляемые источники энергии, такие как солнечные батареи. Недостатком стационарных зарядных станций является необходимость для БЛА затрачивать энергию на перемещение до зарядной станции и обратно к точке продолжения прерванного маршрута после подзарядки [14]. Альтернативным решением служат мобильные зарядные станции [13], которые чаще всего реализуются с помощью наземных мобильных роботов, и способны перевозить достаточное количество съёмных аккумуляторов или аккумуляторы большой емкости для подзарядки батарей БЛА.

В данной работе рассматривается задача покрытия территории с помощью группы БЛА при поддержке наземной мобильной зарядной станции, которая производит замену батарей питания БЛА. Ячейки, в которых производится замена батарей, обозначаются как «точки подзарядки». Совместное планирование одно-

временного движения группы БЛА и мобильной зарядной станции повышает эффективность траектории покрытия. Сложность вычислений в задаче поиска оптимальных траекторий движения мобильного робота при охвате территории экспоненциально возрастает с увеличением сложности территории и количества мобильных роботов. На практике такие задачи решают с помощью эвристических алгоритмов [15]. В данной статье рассматривается применимость генетического алгоритма к сформулированной задаче покрытия территории; основной акцент сделан на формировании хромосом генетического алгоритма.

Формулировка проблемы. Исследуемая в рамках задачи покрытия территория задается в виде двумерного многоугольника M , с наложенной на нее сеткой. Сетка делит многоугольник M на множество ячеек одинакового размера $l \times l$. Предполагается связанность ячейки сетки с четырьмя ближайшими соседями по прямолинейным траекториям. Каждая ячейка m сетки пронумерована и имеет свой идентификационный номер k_m . Ячейка m относится к классу свободных ячеек или к классу ячеек бесполётной зоны Obs , в которых расположены высотные препятствия, не позволяющие БЛА находиться в данной ячейке. Соответственно, предполагается, что БЛА не могут совершать полеты над ячейками бесполётной зоны Obs [16]. Алгоритм работает в дискретном времени $T = 0, 1, 2, \dots, T_{max}$.

Задача покрытия выполняется группой из s БЛА, обозначим их $U = \{U_1, U_2, \dots, U_s\}$. БЛА в каждый дискретный момент времени находится только в одной ячейке сетки, и перемещается прямолинейно на соседнюю ячейку на каждом шаге. Траектория полета БЛА U_i обозначается как $L_i = [k_1^i, k_2^i, \dots, k_q^i]$, при этом длина полета считается как количество пройденных ячеек $|L_i| = q^i$. В начальный момент времени $T=0$ БЛА $U_1, U_2, \dots, U_s$ находятся в разных стартовых ячейках: $ST = \{k_1^0, k_2^0, \dots, k_s^0\}$.

Емкость аккумулятора каждого БЛА предполагается одинаковой. На расход энергии БЛА при движении оказывает влияние множество факторов, включая погодные условия (например, наличие встречного ветра) и форму траектории БЛА (например, количество поворотов при движении). Однако главным фактором остается длина маршрута и, соответственно, время полета БЛА. Предполагая, что каждая БЛА движется с одинаковой скоростью, введем допущение, что потребление энергии прямо пропорционально пройденному пути БЛА, и при полном заряде аккумулятора БЛА способно пройти Z ячеек сетки. Заряд батареи БЛА U_i в момент времени t обозначим как $P_i(t)$; он численно равен количеству ячеек сетки, которое БЛА способно пройти на остатке заряда батареи ($P_i(t) \leq Z$).

Одновременно с БЛА в задаче покрытия участвует мобильная зарядная станция S ; это мобильный наземный робот, который в каждый дискретный момент времени находится только в одной свободной ячейке сетки, и способен перемещаться прямолинейно на соседнюю ячейку на каждом шаге, если данная ячейка не входит в класс Obs . Траекторию зарядной станции обозначим как $G = [k_1, k_2, \dots, k_r]$, где $k_i \notin Obs$. Когда БЛА U_i и зарядная станция оказываются в одной ячейке, БЛА U_i может произвести замену батареи аккумулятора. Зарядная станция в каждый момент времени может обслужить только один БЛА.

Требуется найти траектории полета для каждого БЛА ($L_1, L_2, \dots, L_s$) и траекторию движения для мобильной зарядной станции G [17], такие что траектории всех БЛА образуют полный охват всей территории $\cup_{i=1}^s L_i = M$, и при этом заряд батареи каждый БЛА $P_i(t)$ никогда не опускается ниже некоторого критического уровня ε : $P_i(t) > \varepsilon$ для $\forall t = 0, 1, \dots, T_{max}$.

Генетический алгоритм. Генетические алгоритмы [18], основанные на принципах естественного отбора, широко используются для оптимизации маршрутов мобильных роботов. Они моделируют эволюционные процессы, одновременно работая со множеством потенциальных решений задачи. Каждое рассматриваемое

решение в рамках генетического алгоритма называется индивидуумом, а множество всех решений на данном этапе называется популяцией. Процесс работы алгоритма разделен на этапы, на каждом из которых формируется новая популяция решений. На каждом этапе алгоритма выбираются индивидуумы для создания нового поколения с использованием фиксированного правила отбора. Индивидуумы с лучшими характеристиками имеют преимущество при передаче своих свойств следующей популяции. Далее с помощью операции кроссинговера [19] создается новая популяция. Кроссинговер представляет собой процесс, при котором индивидуумы текущей популяции с помощью установленных правил порождают новых индивидуумов, унаследовавших какие-то характеристики от родительских. Этот процесс обеспечивает передачу лучших свойств от родителей к будущим поколениям. С каждым этапом решения становятся более адаптированными к поставленной задаче. При этом генетический алгоритм стремится на каждом этапе поддерживать максимально разнообразную популяцию [20], чтобы вся популяция не составляла копию какого-то одного удачного (с точки зрения оценки целевой функции) решения. Мутация [21] представляет собой случайное изменение в характеристиках индивидуума, призванное поддерживать генетическое разнообразие и иногда способствующее нахождению новых эффективных решений.

Для применения генетического алгоритма к задаче покрытия территории с помощью группы БЛА вначале необходимо формализовать решение этой задачи в виде специального закодированного вектора [22]; в терминах генетического алгоритма данный вектор называется хромосомой, а каждый элемент вектора называется геном. Хромосома должна однозначно представлять решение задачи.

В нашей задаче для однозначного задания решения необходимо определить траектории полетов для всех БЛА $U_1, U_2, \dots, U_s$, траекторию движения для мобильной зарядной станции С и все точки подзарядки. Так как БЛА на каждом шаге перемещает прямолинейно на соседнюю ячейку, то ячейки каждой траектории U_i должны быть соседними. Траектория движения кодируется последовательностью номеров ячеек сетки, эта последовательность принимается за хромосому движения одного БЛА. Так как решение задачи представляет собой объединение всех траекторий движения БЛА, то хромосома решения задачи должна представлять собой объединение хромосом каждой БЛА, при этом длины траекторий движения БЛА могут быть произвольными. Хромосома, отражающая траекторию движения всех БЛА представлена на рис. 1.

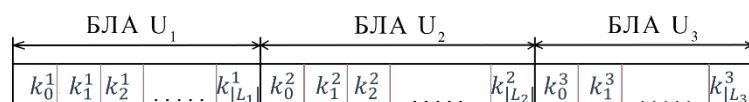


Рис. 1. Представление хромосомы группы БЛА

Использование аналогичного подхода для определения хромосомы для мобильной зарядной станции невозможно. Поскольку при задании только траектории движения теряется критически важная информация о ячейках, в которых происходит замена аккумулятора. Для однозначного определения точки подзарядки необходимо задать: номер ячейки, в которой происходит замена аккумулятора; время, когда происходит замена аккумулятора, так как мобильная зарядная станция может посещать эту ячейку несколько раз; номер БЛА, для которого происходит замена аккумулятора.

По условиям задачи важна не столько конкретная траектория мобильной зарядной станции, сколько расположение точек подзарядки, их последовательность и тот факт, что мобильная зарядная станция успевает посетить каждую точку во-

время и в заданной последовательности, обходя препятствия на земле. Таким образом, геном в хромосоме мобильной зарядной станции можно определить тройку чисел, обозначающих время подзарядки t_j ($t_j \in T$), номер ячейки k_j ($k_j \in M$) и номер БЛА n_j ($n_j \in \{0, 1, \dots, s\}$), для которого производится замена батареи. В результате формируется последовательность, кодирующая информацию о замене батарей $W = [(t_1, k_1, n_1), (t_2, k_2, n_2), \dots, (t_h, k_h, n_h)]$. Эту последовательность W примем за хромосому мобильной зарядной станции.

Из информации о последовательности W можно получить траекторию движения мобильной зарядной станции, рассчитывая кратчайший маршрут движения между последовательными промежуточными точками (ячейками $k_1, k_2, \dots, k_h$), который обходит препятствия, с помощью любого известного алгоритма, например, A* [23] или его модификаций [24].

Следует учитывать, что не для каждой $k_1, k_2, \dots, k_h$, на заданной карте с препятствиями возможно создание маршрута. В этом случае хромосома для мобильной зарядной станции будет отражать «невозможное решение». Ген хромосомы мобильной зарядной станции (t_i, k_i, n_i) отражает время t_i , не позднее которого зарядная станция должна прибыть в ячейку k_i для подзарядки БЛА U_{n_i} . Если существует участок хромосомы $[\dots, (t_i, k_i, n_i), (t_{i+1}, k_{i+1}, n_{i+1}), \dots]$, в котором мобильная зарядная станция не успевает переместиться между соседними точками зарядки k_i и k_{i+1} за время $t_{i+1} - t_i$, тогда хромосома так же будет отражать «невозможное решение».

Итоговый вариант хромосомы для задачи покрытия, включающий в себя траектории движения всех БЛА, отражающий траекторию для мобильной зарядной станции и точек зарядки, представлен на рис. 2.

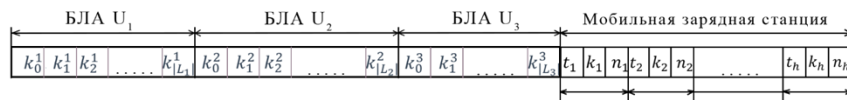


Рис. 2. Итоговое представление хромосомы для задачи

Перед запуском генетического алгоритма происходит разбиение территории на регионы $Y_1, Y_2, Y_3 \dots Y_s$, такое что $\cup_{i=1}^s Y_i = M$ и для $\forall i, j: i \neq j \Rightarrow Y_i \cap Y_j = \emptyset$. Для каждого региона назначается БЛА U_i для охвата; каждый БЛА охватывает свой регион, что исключает столкновение БЛА при выполнении миссии охвата.

Начальная популяция формируется случайным образом. Это предполагает формирование случайных путей охвата для каждого региона. Точки подзарядки для каждой хромосомы начальной популяции выбираются после формирования путей для всех БЛА так же случайным образом. Однако между точками зарядки для фиксированной БЛА расстояние должно быть меньше чем Z ячеек. Если между двумя точками подзарядки k_j^i и k_g^i ($j < g$) для БЛА U_i : $(g-j) > Z$, то случайным образом добавляется новая точка подзарядки k_c^i , такая что $j < c < g$. Поддержание заряда для каждого БЛА U_i $P_i(t) > \epsilon$ при формировании начальной популяции позволяет сократить количество вычисляемых популяций, снижая время вычисления, но не является обязательным.

Для всех хромосом популяции необходимо рассчитать траекторию движения мобильной зарядной станции в обход препятствий в соответствии с последовательностью точек подзарядки W . Рассчитывается время достижения каждой точки подзарядки и факт прибытия мобильной станции с опозданием к месту подзарядки. Целевая функция при расчете приспособленности каждого индивидуума учитывает этот фактор, и накладывает штраф, если мобильная станция не успевает вовремя. Мутация применяется к хромосомам из популяции с вероятностью α , и

заключается в изменении пути покрытия в отдельном регионе, без изменения точек подзарядки для мобильной зарядной станции. Работа алгоритма заканчивается после фиксированного числа популяций V .

Валидация алгоритма. Алгоритм был реализован на языке Python, с возможностью визуализации траекторий движения БЛА (рис. 3) и мобильной зарядной станции. В качестве входных данных программа принимает параметры территории, размер ячейки сетки, расположение препятствий на территории (последовательность номеров ячеек, которые относятся к классу препятствий Obs), начальные точки расположения каждой БЛА на карте $ST = \{k_1^0, k_2^0, \dots, k_q^0\}$. Результатом работы программы является хромосома с наибольшим значением оценки целевой функции после V популяций. Хромосома отображает траектории движения всех БЛА и точек подзарядки для мобильной станции, по которым происходит расчет траектории мобильной зарядной станции.

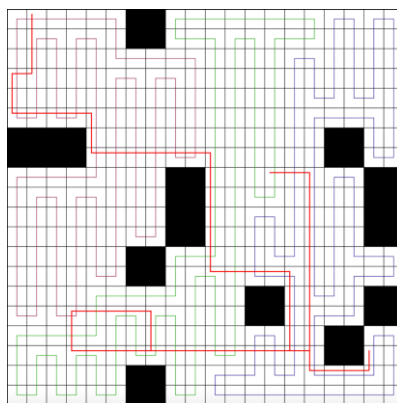


Рис. 3. Результат работы программы по охвату территории размера 20x20 ячеек с помощью трех БЛА. Траектории БЛА показаны зеленым, фиолетовым и бордовым цветом. Траектория мобильной зарядной станции обозначена красным цветом

Заключение. В данной работе рассмотрен метод решения задачи охвата территории группой БЛА с ограничениями по затрачиваемой энергии, при использовании мобильной зарядной станции. Предложенное решение базируется на применении генетического алгоритма для совместного планирования траекторий БЛА и зарядной станции, что повышает эффективность алгоритма. Основной акцент в статье сделан на формировании хромосомы генетического алгоритма, которая корректно отражает траектории движения БЛА и мобильной зарядной станции, а также учитывает точки замены аккумулятора. Представлена структура генетического алгоритма с пошаговым объяснением ее работы. Алгоритм реализован на языке Python, с возможностью визуализации траекторий движения БЛА и мобильной зарядной станции. Адекватность предложенного подхода подтверждена результатами моделирования.

Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Galceran E., Carreras M. A survey on coverage path planning for robotics // Robotics and Autonomous Systems. – 2013. – No. 12 (61). – P. 1258-1276.
2. Semenas R., Bausys R. Adaptive Strategy for Environment Exploration in Search and Rescue Missions by Autonomous Robot Lecture Notes in Networks and Systems / под ред. Н. Sharma [и др.]. – Singapore: Springer Singapore, 2021. – P. 335-353.

3. *Almadhoun R., Taha T., Seneviratne L., Zweiri Y.* A survey on multi-robot coverage path planning for model reconstruction and mapping // *SN Applied Sciences*. – 2019. – No. 8 (1). – P. 847.
4. *Cabreira T., Brisolara L., Ferreira Jr. P.R.* Survey on Coverage Path Planning with Unmanned Aerial Vehicles // *Drones*. – 2019. – No. 1 (3). – P. 4.
5. *Bai Y., Wang Y., Svinin M., Magid E., Sun R.* Adaptive Multi-Agent Coverage Control With Obstacle Avoidance // *IEEE Control Systems Letters*. – 2022. – 6. – P. 944-949.
6. *Hayat S., Yanmaz E., Brown T. X., Bettstetter C.* Multi-objective UAV path planning for search and rescue. – Singapore, Singapore: IEEE, 2017. – P. 5569-5574.
7. *Калыев И.А., Капустян С.Г.* Групповое управление роботами: проблемы, решения // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. – 2011. – 13. – P. 7-12.
8. *Karapetyan N., Benson K., McKinney C., Taslakian P., Rekleitis I.* Efficient Multi-Robot Coverage of a Known Environment. – 2017. – P. 1846-1852.
9. *Васильев И.А., Половко С.А., Смирнова Е.Ю.* Организация группового управления мобильными роботами для задач специальной робототехники // *Информатика, телекоммуникации и управление*. – 2013. – С. 119-123.
10. *Di Franco C., Buttazzo G.* Energy-Aware Coverage Path Planning of UAVs. – Vila Real: IEEE, 2015. – P. 111-117.
11. *Suzuki K.A.O., Kemper Filho P., Morrison J.R.* Automatic Battery Replacement System for UAVs: Analysis and Design // *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. – 2012. – No. 1-4 (65). – P. 563-586.
12. *Li B., Patankar S., Moridian B., Mahmoudian N.* Planning Large-Scale Search and Rescue using Team of UAVs and Charging Stations Philadelphia, PA, USA: IEEE, 2018. – P. 1-8.
13. *Li B., Page B. R., Hoffman J., Moridian B., Mahmoudian N.* Rendezvous Planning for Multiple AUVs With Mobile Charging Stations in Dynamic Currents // *IEEE Robotics and Automation Letters*. – 2019. – No. 2 (4). – P. 1653-1660.
14. *Wei M., Isler V.* Coverage Path Planning Under the Energy Constraint Brisbane, QLD: IEEE, 2018. – P. 368-373.
15. *Tan C.S., Mohd-Mokhtar R., Arshad M.R.* A Comprehensive Review of Coverage Path Planning in Robotics Using Classical and Heuristic Algorithms // *IEEE Access*. – 2021. – 9. – P. 119310-119342.
16. *Denisov E., Sagitov A., Yakovlev K.S., Su K.L., Svinin M.M., Magid E.* Towards Total Coverage in Autonomous Exploration for UGV in 2.5D Dense Clutter Environment: Prague, Czech Republic: SCITEPRESS - Science and Technology Publications, 2019. – P. 409-416.
17. *Пилюхов В.Х., Медведев Ю.М., Костюков В.А., Хуссейн Ф., Кадим А.* Trajectory planning algorithms in two-dimensional environment with obstacles // *Информатика и автоматизация*. – 2022. – 21 (3). – P. 459-492.
18. *Гладков Л., Курейчик В., Курейчик В.* Генетические алгоритмы. – Физматлит, 2010. – 368 с.
19. *Umbarkar A.J., Sheth P.D.* Crossover operators in genetic algorithms: a review // *ICTACT Journal on Soft Computing*. – 2015. – No. 01 (06). – P. 1083-1092.
20. *Lozano M., Herrera F., Cano J.* Replacement strategies to preserve useful diversity in steady-state genetic algorithms // *Information Sciences*. – 2008. – No. 23 (178). – P. 4421-4433.
21. *Deb K., Deb A.* Analysing mutation schemes for real-parameter genetic algorithms // *International Journal of Artificial Intelligence and Soft Computing*. – 2014. – No. 1 (4). – С. 1.
22. *Tuncer A., Yildirim M.* Chromosome Coding Methods in Genetic Algorithm for Path Planning of Mobile Robots / под ред. E. Gelenbe, R. Lent, G. Sakellari. – London: Springer London, 2011. – P. 377-383.
23. *Guruji A. K., Agarwal H., Parsediya D. K.* Time-efficient A* Algorithm for Robot Path Planning // *Procedia Technology*. – 2016. – 23. – P. 144-149.
24. *Koenig S., Likhachev M.* D* lite // In Eighteenth national conference on Artificial intelligence. – 2002. – P. 476-483.

REFERENCES

1. *Galceran E., Carreras M.* A survey on coverage path planning for robotics, *Robotics and Autonomous Systems*, 2013, No. 12 (61), pp. 1258-1276.
2. *Semenas R., Bausys R.* Adaptive Strategy for Environment Exploration in Search and Rescue Missions by Autonomous Robot Lecture Notes in Networks and Systems, ed. by H. Sharma [et al.]. Singapore: Springer Singapore, 2021 33. 335-353.
3. *Almadhoun R., Taha T., Seneviratne L., Zweiri Y.* A survey on multi-robot coverage path planning for model reconstruction and mapping, *SN Applied Sciences*, 2019, No. 8 (1), pp. 847.

4. Cabreira T., Brisolara L., Ferreira Jr. P.R. Survey on Coverage Path Planning with Unmanned Aerial Vehicles, *Drones*, 2019, No. 1 (3), pp. 4.
5. Bai Y., Wang Y., Svinin M., Magid E., Sun R. Adaptive Multi-Agent Coverage Control With Obstacle Avoidance, *IEEE Control Systems Letters*, 2022, 6, pp. 944-949.
6. Hayat S., Yanmaz E., Brown T.X., Bettstetter C. Multi-objective UAV path planning for search and rescue. Singapore, Singapore: IEEE, 2017, pp. 5569-5574.
7. Kalyaev I.A., Kapustyan S.G. Gruppovoe upravlenie robotami: problemy, resheniya [Group control of robots: problems, solutions], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye* [News of higher educational institutions. Mechanical engineering], 2011, 13, pp. 7-12.
8. Karapetyan N., Benson K., McKinney C., Taslakian P., Rekleitis I. Efficient Multi-Robot Coverage of a Known Environment, 2017, pp. 1846-1852.
9. Vasil'ev I.A., Polovko S.A., Smirnova E.Yu. Organizatsiya gruppovogo upravleniya mobil'nymi robotami dlya zadach spetsial'noy robototekhniki [Organization of group control of mobile robots for special robotics tasks], *Informatika, telekommunikatsii i upravlenie* [Informatics, telecommunications and control], 2013, pp. 119-123.
10. Di Franco C., Buttazzo G. Energy-Aware Coverage Path Planning of UAVs. – Vila Real: IEEE, 2015. – P. 111-117.
11. Suzuki K.A.O., Kemper Filho P., Morrison J.R. Automatic Battery Replacement System for UAVs: Analysis and Design, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2012, No. 1–4 (65), pp. 563-586.
12. Li B., Patankar S., Moridian B., Mahmoudian N. Planning Large-Scale Search and Rescue using Team of UAVs and Charging Stations Philadelphia, PA, USA: IEEE, 2018, pp. 1-8.
13. Li B., Page B. R., Hoffman J., Moridian B., Mahmoudian N. Rendezvous Planning for Multiple AUVs With Mobile Charging Stations in Dynamic Currents, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2019, No. 2 (4), pp. 1653-1660.
14. Wei M., Isler V. Coverage Path Planning Under the Energy Constraint Brisbane, QLD: IEEE, 2018, pp. 368-373.
15. Tan C.S., Mohd-Mokhtar R., Arshad M.R. A Comprehensive Review of Coverage Path Planning in Robotics Using Classical and Heuristic Algorithms, *IEEE Access*, 2021, 9, pp. 119310-119342.
16. Denisov E., Sagitov A., Yakovlev K.S., Su K.L., Svinin M.M., Magid E. Towards Total Coverage in Autonomous Exploration for UGV in 2.5D Dense Clutter Environment: Prague, Czech Republic: SCITEPRESS - Science and Technology Publications, 2019, pp. 409-416.
17. Pshikhopov V.Kh., Medvedev Yu.M., Kostyukov V.A., Khusseyn F., Kadim A. Trajectory planning algorithms in two-dimensional environment with obstacles, *Informatika i avtomatizatsiya* [Computer science and automation], 2022, 21 (3), pp. 459-492.
18. Gladkov L., Kureychik V., Kureychik V. Geneticheskie algoritmy [Genetic algorithms]. Moscow: Fizmatlit, 2010, 368 p.
19. Umbarkar A.J., Sheth P.D. Crossover operators in genetic algorithms: a review, *ICTACT Journal on Soft Computing*, 2015, No. 01 (06), pp. 1083-1092.
20. Lozano M., Herrera F., Cano J. Replacement strategies to preserve useful diversity in steady-state genetic algorithms, *Information Sciences*, 2008, No. 23 (178), pp. 4421-4433.
21. Deb K., Deb A. Analysing mutation schemes for real-parameter genetic algorithms, *International Journal of Artificial Intelligence and Soft Computing*, 2014, No. 1 (4), pp. 1.
22. Tuncer A., Yildirim M. Chromosome Coding Methods in Genetic Algorithm for Path Planning of Mobile Robots, ed. by E. Gelenbe, R. Lent, G. Sakellari. London: Springer London, 2011, pp. 377-383.
23. Guruji A. K., Agarwal H., Parsediya D. K. Time-efficient A* Algorithm for Robot Path Planning, *Procedia Technology*, 2016, 23, pp. 144-149.
24. Koenig S., Likhachev M. D* lite, In *Eighteenth national conference on Artificial intelligence*, 2002, pp. 476-483.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Р.В. Мещеряков.

Файзуллин Рамиль Фирдусович – Казанский (Приволжский) федеральный университет; e-mail: fzllnrml@gmail.com; г. Казань, Россия; тел.: +78432065233; аспирант.

Магид Евгений Аркадьевич – e-mail: magid@it.kfu.ru; тел.: +78432065233; PhD; зав. кафедрой интеллектуальной робототехники.

Faizullin Ramil Firdusovich – Kazan (Volga Region) Federal University; e-mail: fzllnrml@gmail.com; Kazan, Russia; phone: +78432065233; graduate student.

Magid Evgeni Arkad'evich – e-mail: magid@it.kfu.ru; phone: +78432065233; PhD; head of intelligent robotics department.