

СПОСОБ ПОСТРОЕНИЯ МАРШРУТА ДВИЖЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА
С УЧЕТОМ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ
НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО ПРИМЕНЕНИЯ МНОГОАГЕНТНЫХ АЛГОРИТМОВ

О. В. Есиков^{1*}, Д. О. Есиков², А. В. Данилов³, М. С. Земляницын⁴

¹ Центральное конструкторское бюро аппаратостроения, Тула, Россия
* eovmail@rambler.ru

² Вымпелком-Информационные технологии, Тула, Россия

³ Филиал Военной академии материально-технического обеспечения, Пенза, Россия

⁴ Тульский государственный университет, Тула, Россия

Аннотация. Для определения рационального варианта маршрута движения летательного аппарата с учетом рельефа местности предложен способ решения соответствующей задачи на основе комплексного применения многоагентных алгоритмов стохастического поиска. Для оценки качества маршрута движения летательного аппарата с учетом ограничений, накладываемых на задачу, предложено использовать комплексный критерий в виде штрафной функции. Разработан алгоритм формирования опорного варианта маршрута на основе результатов решения задачи методом динамики формирования рек, получение рационального маршрута движения летательного аппарата осуществляется методом роя частиц. Данные опорного варианта маршрута используются для определения значений параметров алгоритма метода роя частиц и его инициализации. Представлены результаты экспериментальной проверки, демонстрирующие работоспособность и эффективность предложенного способа.

Ключевые слова: планирование маршрута, многоагентный алгоритм, летательный аппарат, локальная оптимизация, стохастический поиск

Ссылка для цитирования: Есиков О. В., Есиков Д. О., Данилов А. В., Земляницын М. С. Способ построения маршрута движения летательного аппарата с учетом рельефа местности на основе комплексного применения многоагентных алгоритмов // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 5. С. 395–405. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-5-395-405.

METHOD FOR CONSTRUCTING AN AIRCRAFT ROUTE TAKING INTO ACCOUNT THE TERRAIN
BASED ON THE INTEGRATED USE OF MULTI-AGENT ALGORITHMS

O. V. Yesikov^{1*}, D. O. Yesikov², A. V. Danilov³, M. S. Zemlyanitsyn⁴

¹ Central Design Bureau of Apparatus Engineering, Tula, Russia
* eovmail@rambler.ru

² VimpelCom–Information Technologies LLC, Tula, Russia

³ Branch of the Military Academy of Logistics, Penza, Russia

⁴ Tula State University, Tula, Russia

Abstract. To determine a rational route for an aircraft, taking into account the terrain, a method for solving the corresponding problem is proposed based on the integrated use of multi-agent stochastic search algorithms. To assess the quality of the aircraft's route, taking into account the restrictions imposed on the problem, it is proposed to use a complex criterion in the form of a penalty function. An algorithm for generating a reference route option is developed based on the results of solving the problem using the method of river formation dynamics. A rational route for the

movement of an aircraft is carried out using the particle swarm method. The data of the reference variant of the route of the aircraft are used to determine the values of the parameters of the algorithm of the particle swarm method and its initialization. Results of an experimental test are presented, demonstrating the performance and effectiveness of the described method.

Keywords: route planning, multi-agent algorithm, aircraft, local optimization, stochastic search

For citation: Yesikov O. V., Yesikov D. O., Danilov A. V., Zemlyanitsyn M. S. Method for constructing an aircraft route taking into account the terrain based on the integrated use of multi-agent algorithms. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 5. P. 395–405 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-5-395-405.

Введение. Задача планирования маршрута летательного аппарата (ЛА) является частью этапа предполетной подготовки [1]. Построение маршрута полета ЛА сводится к формированию последовательности точек, подлежащих облету (промежуточных пунктов маршрута — ППМ). Результат решения этой задачи существенно влияет на целевую эффективность ЛА и безопасность его полета [1–3].

Исходными данными задачи являются значения координат начальной и конечной точек маршрута, карта высот рельефа местности, высота полета ЛА. Планирование маршрута движения ЛА сводится к определению значений координат совокупности ППМ, обеспечивающих экстремальное значение принятого показателя эффективности.

В качестве ограничений, накладываемых на задачу, принимаются следующие:

- полет ЛА должен осуществляться на заданной высоте;
- на всем протяжении маршрута полета расстояние до поверхности земли не должно быть меньше заданной величины;
- радиус кривизны участков траектории ЛА, задаваемых двумя последовательными параметрами ППМ, не должен быть меньше заданной величины.

Решению задачи формирования маршрутов полета ЛА в различных условиях, в том числе с учетом препятствий, посвящены работы [4–14]. В указанных работах число ППМ и их местоположение считается заданным или определяется узлами сетки геотопологической модели местности, над которой планируется полет. При этом построение маршрута движения ЛА сводится к одному из следующих вариантов:

- 1) решение задачи о коммивояжере [10, 11, 13];
- 2) поиск на графе [4–6, 8, 9];
- 3) применение аналитических моделей и эвристических методов [7, 12, 14, 15].

В первом и втором случаях решение задачи в указанных работах выполнялось методами дискретной оптимизации и поиска на графах, а также с использованием многоагентных алгоритмов (генетический алгоритм (ГА), муравьиный алгоритм). Построение маршрута движения ЛА посредством решения задачи о коммивояжере выполняется на фиксированном наборе ППМ с заданными координатами. При этом время решения задачи известными методами (ГА, муравьиный алгоритм, методы дискретной оптимизации) экспоненциально увеличивается с ростом ее размерности (числа ППМ). При использовании поиска на графах точность решения ограничивается параметрами дискретности применяемых моделей и может достигать нескольких тысяч метров [4], что, например, для случая полета ЛА на низких высотах в условиях сложного рельефа местности является недопустимо большим.

При планировании полета на малых высотах число и местоположение ППМ определяются не только полетным заданием, но и рельефом местности, над которой полет будет выполняться. К настоящему времени отсутствуют способы определения количества ППМ, обеспечивающие минимальную длину маршрута с выполнением условий всех ограничений, накладываемых на решаемую задачу для произвольных исходных данных.

Преимущество многоагентных алгоритмов [16], таких как ГА, метод роя частиц, метод косяка рыб и др., заключается в нечувствительности к виду целевой функции и принятым ограничениям, хорошей приспособленности к распараллеливанию процесса вычислений. Недостатки

данных алгоритмов — значительное влияние результатов начальной инициализации на решение задачи и необходимость задания значений определенного числа параметров алгоритмов перед выполнением расчетов.

Настоящая статья посвящена способу решения задачи построения маршрута движения ЛА с учетом рельефа местности, обеспечивающему получение рационального решения высокого качества с автоматическим определением числа ППМ, значений параметров алгоритма решения и нивелированием влияния начальной инициализации на результат решения алгоритма.

Критерий оценки качества маршрута движения ЛА. Оценивать качество маршрута движения ЛА предлагается на основе применения комплексного показателя, представленного функцией штрафа следующего вида [2, 17]:

$$F = \alpha_1 f_1 + \alpha_2 f_2 + \alpha_3 f_3 + \alpha_4 f_4,$$

где α_i , $i = 1, \dots, 4$, — весовые коэффициенты; параметры f_i , $i = 1, 2, \dots, 4$, задают условия и ограничения полета: f_1 — число ячеек сетки карты высот, в которых траектория движения с заданной высотой пересекает рельеф местности; f_2 — длина маршрута; f_3 — характеристика траектории, предназначенная для обеспечения безопасного расстояния до поверхности на всем протяжении маршрута; f_4 — параметр, предназначенный для обеспечения радиусов кривизны участков траектории не менее заданных.

Для определения f_4 рассчитывается угол, образуемый двумя последовательными фрагментами траектории (определяются ППМ), и, если его величина будет менее допустимой, добавляется значение штрафа.

В качестве одного из параметров эффективности маршрута в ряде случаев (особенно характерных для беспилотных ЛА малых классов) представляет интерес рассмотрение не длины (или не только длины) маршрута, а продолжительности полета, в том числе с учетом влияния атмосферных и погодных явлений, например ветра. Для этого в штрафную функцию могут быть либо введены новые слагаемые, либо откорректирован параметр f_2 [14, 15].

Весовые коэффициенты α_i , $i = 1, \dots, 4$, определяются экспериментально [4] и задают уровень жесткости выполнения условий полета, вплоть до запретительного, например, на пересечение рельефа, пролет над поверхностью земли на расстоянии менее допустимого. В связи с тем, что слагаемое $\alpha_1 f_1$ играет основную роль в обеспечении безопасности полета ЛА при планировании маршрута, значение весового коэффициента α_1 необходимо задавать существенно превышающим вес других параметров, что обуславливает жесткость ограничения на минимальную высоту полета.

Недопущение случаев пересечения одних участков маршрута другими при его планировании возможно путем введения дополнительного параметра в штрафную функцию.

В работах [14, 15, 17] для решения задачи построения маршрута движения ЛА с применением вышеприведенного критерия предложено использовать многоагентные алгоритмы стохастического поиска [16, 18–22].

Особенности применения многоагентных алгоритмов. Решение задачи построения маршрута движения ЛА методом роя частиц (МРЧ) осуществляется путем минимизации значения функции штрафа [3, 17].

Алгоритм метода роя частиц представляет собой многошаговый процесс перемещения частиц в многомерном пространстве поиска решения, размерность которого определяется заданным числом ППМ N [15, 19, 20]. Направление движения частиц определяется их текущим положением, лучшим положением на предыдущих шагах, а также положением лучшей, в смысле минимума штрафной функции, частицы в рое.

Начальная инициализация исходных множеств агентов (частиц) в МРЧ производится случайным образом, с недопущением дублирования агентов. Для снижения влияния начальной инициализации роя на результат и получения более стабильного и высокого по качеству

решения предложено использовать островную схему реализации данного алгоритма [14—16] с кольцевой схемой миграции агентов.

Перед решением задачи МРЧ требуется задать ее размерность (число ППМ) и параметры алгоритма (число роев, размер роя, число итераций, число шагов в итерации). Математически обоснованных способов определения значений параметров МРЧ для решения задач с произвольным набором исходных данных к настоящему времени не существует. Обычно данные значения определяются экспериментально, что затрудняет практическое использование этого метода для решения прикладных задач.

Для определения значений параметров алгоритма для заданного числа ППМ предложено использовать экспериментально определенные аппроксимирующие зависимости [15], обеспечивающие получение решения высокого качества за ограниченное время.

Кроме этого, вследствие особенностей комплексного критерия качества маршрутов движения ЛА при решении задачи МРЧ возможны случаи, когда вариант маршрута, нарушающий принятие ограничения, будет иметь наилучшее значение штрафной функции. Для недопущения этого требуется либо более точная настройка весовых коэффициентов α_i для каждого из вариантов исходных данных, что само по себе нетривиальная задача, либо наличие некоторого опорного варианта маршрута движения ЛА, близкого к экстремуму целевой функции при инициализации роя. Наличие опорного варианта маршрута позволит значительно снизить как возможность появления таких случаев, так и влияние начальной инициализации алгоритма на качество получаемого решения.

Для заданного варианта исходных данных с целью определения числа ППМ и близкого, в смысле выбранного критерия оптимальности, к искомому экстремуму варианта маршрута (для применения в начальной инициализации алгоритма МРЧ) предлагается использовать результат предварительного решения задачи методом динамики формирования рек (МДФР) [23]. Этот метод отличается невысокой вычислительной сложностью и не требует для получения результата настройки значительного (как в МРЧ) числа параметров и задания размерности решаемой задачи (количества ППМ).

Принцип работы алгоритма МДФР заключается в имитации процесса формирования русел рек.

Применительно к решаемой задаче создается набор агентов (капель), которые перемещаются под действием силы тяжести между узлами (ячейками) карты высот от начальной к конечной, исследуя пространство в поиске наилучшего решения. Закрепление промежуточных результатов поиска решения выполняется имитацией механизмов эрозии и осадения грунта, связанных с изменением значений ячеек карты высот. В результате выполнения алгоритма МДФР на заданной карте высот формируется последовательность ячеек, определяющая кратчайший из найденных путь агентов от начальной ячейки маршрута к конечной.

Для определения положения ППМ движения ЛА на карте высот по результатам решения задачи МДФР предложен алгоритм, схема которого представлена на рис. 1, где $Path$ — массив координат ячеек, входящих в результирующий путь из начальной точки в конечную (результат решения задачи МДФР); $Track$ — список координат ППМ; H^p — заданная высота полета ЛА. Применение данного алгоритма позволяет сформировать последовательность ППМ минимальной длины, задающую маршрут из начальной точки в конечную с огибанием рельефа местности на заданной высоте полета ЛА.

Вследствие особенностей МДФР ППМ имеют координаты, совпадающие с центрами соответствующих ячеек карты высот, что не во всех случаях может удовлетворить требования по точности их расположения. Кроме того, при решении задачи МДФР не учитывается ограничение на минимальный радиус кривизны участка траектории движения ЛА, определяемый двумя последовательными отрезками маршрута.

Полученный в результате реализации МДФР маршрут движения ЛА может быть принят за опорный, как в части количества ППМ, так и их местоположения при инициализации МРЧ, для последующего уточнения полученного решения.

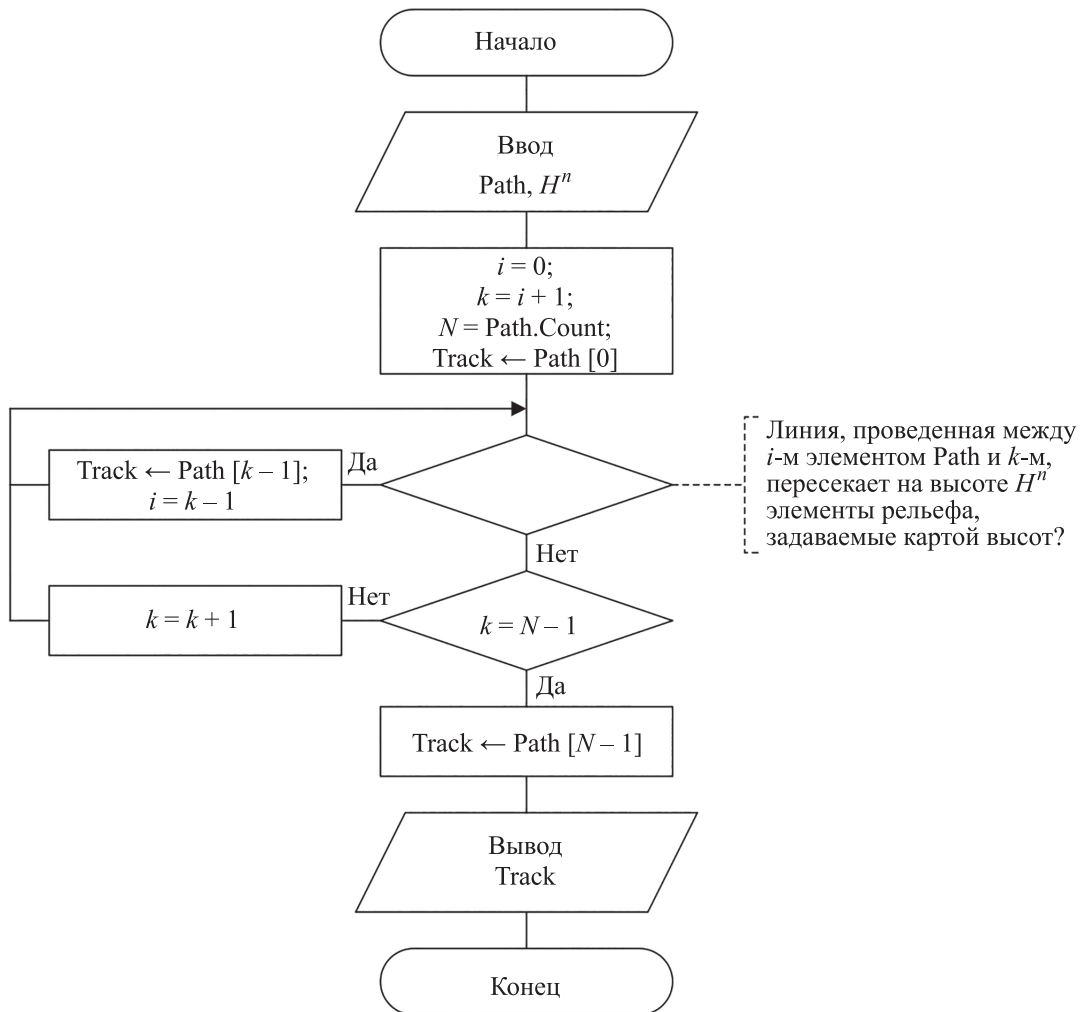


Рис. 1

Способ построения маршрута движения ЛА на основе комплексного применения многоагентных алгоритмов. Предлагается способ определения рационального варианта движения ЛА с учетом рельефа местности на основе комплексного применения МДФР и МРЧ, схема которого представлена на рис. 2.

Для заданных карты высот, координат начальной и конечной точек маршрута и высоты полета первоначально задача решается МДФР. На основе полученного МДФР результата с помощью предложенного алгоритма (см. рис. 1) определяется количество ППМ и их координаты. Полученный вариант маршрута движения ЛА принимается за опорный. Уточнение опорного варианта маршрута выполняется методом роя частиц. Относительно числа ППМ, входящих в опорный вариант, с применением аппроксимирующих зависимостей (табл. 1) [15] по изложенной в [24, 25] методике определяются значения параметров алгоритма МРЧ. При выполнении инициализации роя (роев) опорный маршрут движения ЛА включается в состав промежуточных вариантов решения задачи, задаваемых агентами. Это позволяет обеспечить ограничение сверху (при минимизации штрафной функции) на качество лучшего варианта маршрута для всего роя, что, в свою очередь, будет способствовать скорейшему его движению в направлении экстремума целевой функции, ближайшего к опорному варианту. Далее задача решается методом роя частиц с минимизацией значения комплексного критерия оценки качества маршрута [14, 15, 17].

Подобное построение вычислительного процесса позволит получить рациональный вариант маршрута ЛА высокого качества (не хуже опорного варианта, в смысле комплексного критерия), нивелируя влияние начальной инициализации МРЧ, с автоматическим определением размерности задачи и параметров метода решения.

Таблица 1

Число ППМ, N	Параметры алгоритма МРЧ				Время решения t , с
	Размер роя	Число шагов в итерации	Число роев	Число итераций	
6	350	120	5	4	13,55
10	500	150	6	5	62,05
15	800	300	7	6	378,29
20	1500	900	9	8	5166,72
Зависимости для расчета параметров	$5,62N^2 - 66,06N + 559,2$	$6,2N^2 - 107,62N + 560,8$	$0,28N + 3,2$	$0,28N + 2,2$	—

Примечание. Время решения определено для вычислительной системы со следующими параметрами: ОС Windows 10 Home × 64; процессор Intel Core i5-7300HQ с тактовой частотой 2,5 ГГц; объем оперативной памяти 8 Гб.

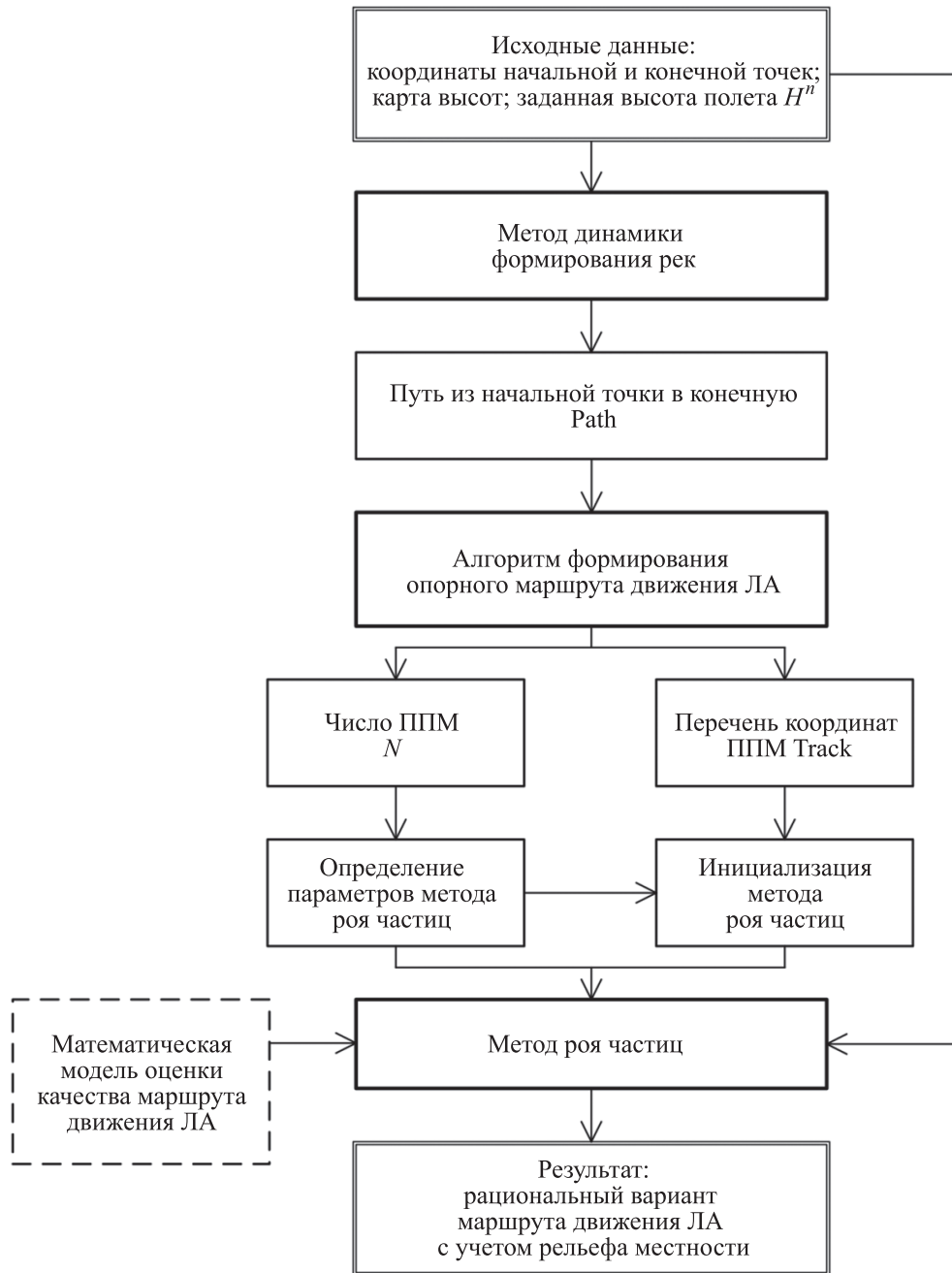


Рис. 2

Результаты эксперимента. Экспериментальная проверка эффективности предложенного способа решения задачи построения маршрута движения ЛА на основе комплексного применения многоагентных алгоритмов выполнялась для разных вариантов исходных данных полета:

- с огибанием зон, запрещенных для полета;
- в городской застройке;
- с огибанием рельефа местности.

Результаты экспериментальной проверки представлены на рис. 3 и в табл. 2, 3.

На рис. 3 приведены примеры решения задачи построения маршрута движения ЛА предлагаемым способом: *а* — с огибанием зон, запрещенных для полета; *б* — с огибанием рельефа местности (ущелье); *в* — в городской застройке. На рисунках синим цветом обозначены ячейки карты высот, вошедшие в решение задачи МДФР, а серой ломаной линией — местоположения ППМ и опорный вариант маршрута движения, полученные на основе применения этого метода; белая ломаная линия соответствует уточненному посредством МРЧ маршруту движения ЛА.

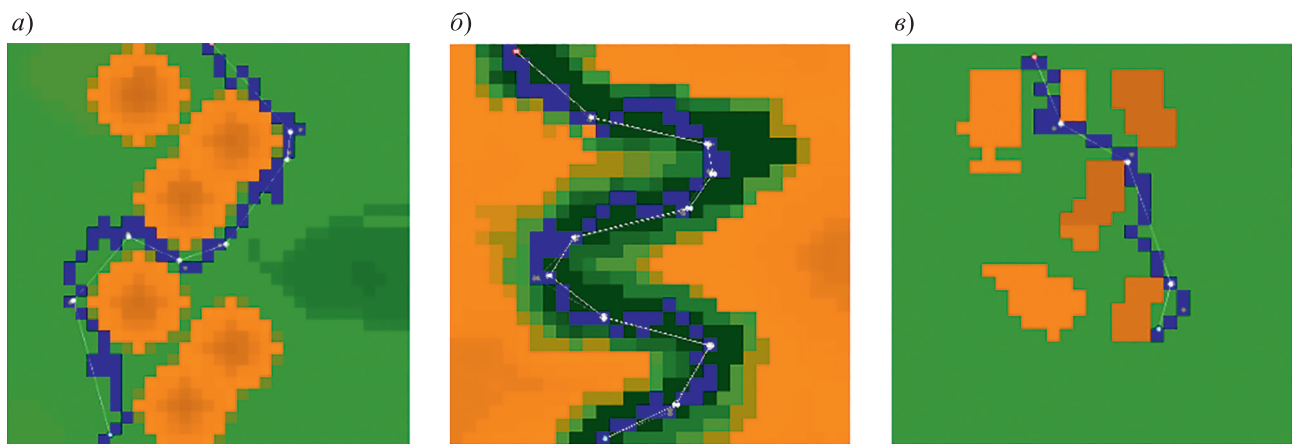


Рис. 3

Таблица 2

Вариант маршрута движения ЛА	Время решения t , с				Длина маршрута L , м			
	МДФР		МДФР + МРЧ		МДФР		МДФР + МРЧ	
	\bar{t}	СКО	\bar{t}	СКО	\bar{L}	СКО	\bar{L}	СКО
С огибанием зон, запрещенных для полета	42,7	0,4	76,5	4,8	27099,2	1165,8	26327,3	768,3
В городской застройке	32,5	1,1	58,9	3,0	1342	50	1287,5	41,5
С огибанием рельефа местности	35,2	0,4	91,3	37,2	17496,25	415,6	17100,15	398,3

Примечание. Результаты получены при следующих параметрах МДФР: количество агентов — 600; число шагов алгоритма — 60.

Таблица 3

Вариант маршрута движения ЛА	Число точек маршрута по результатам МДФР		Число ППМ	L , м		t , м	
	Среднее значение	СКО		\bar{L}	СКО	\bar{t}	СКО
С огибанием зон, запрещенных для полета	7,2	0,7	6	26832	1415,2	31,7	2
В городской застройке	6,5	1,2	5	1494,1	100,3	21,7	1,4
С огибанием рельефа местности	11,1	1,14	10	17720,33	734,78	45,71	1,63

В табл. 2 приведены результаты оценки времени решения (t) задачи и длины (L) полученных маршрута движения ЛА для различных вариантов исходных данных. Анализ рис. 3 и табл. 2 показывает, что МДФР позволяет находить путь от начальной до конечной ячейки карты высот и определять опорный вариант маршрута движения ЛА.

В табл. 3 представлены результаты оценки длины маршрутов (L) движения и времени решения (t) задачи МРЧ без использования опорного варианта маршрута. Число ППМ оценивалось по результатам решения задачи МДФР с этими же вариантами карт высот. Параметры МРЧ определялись по зависимостям, приведенным в табл. 1.

Как видно из представленных результатов, комплексное применение метода динамики формирования рек и методы роя частиц дает более высокий по качеству результат по сравнению с решением задачи только методом роя частиц, но при большем времени решения задачи.

Алгоритм построения маршрута движения ЛА на основе решения задачи МДФР обеспечивает результат оценки длины маршрута, сопоставимый (не худший) с результатом, получаемым МРЧ. Следует отметить, что данное утверждение верно при задании размерности задачи и параметров МРЧ на основе данных, полученных предлагаемым способом.

Для вариантов маршрута, связанных с огибанием зон, запрещенных для полета, и полетом в городской застройке, разброс времени решения задачи не превышает 6 % от среднего значения. Более значительный (41 % от среднего значения) разброс времени решения наблюдается для варианта полета с огибанием рельефа местности по сравнению с другими вариантами. Это связано с тем, что для данного варианта карты высот характерна достаточно сложная конфигурация рельефа местности, что по результатам предварительного решения задачи МДФР дает разброс в количестве ППМ от 7 до 11 и, как результат, — во времени решения МРЧ.

Использование МРЧ для уточнения маршрута движения ЛА позволяет сократить длину маршрута на 2–4% относительно опорного варианта, полученного МДФР, с обеспечением выполнения всех принятых ограничений.

Применение предлагаемого способа решения рассматриваемой задачи позволяет сформировать маршрут, имеющий длину на 3–13,8 % меньшую, чем маршрут, полученный при решении задачи той же размерности только МРЧ. Кроме того, наблюдается меньший разброс результатов — СКО длины маршрута в относительном выражении не превышает 3 % от среднего значения против 4–7% для результатов, полученных с применением только МРЧ.

Заключение. Предложенный способ решения рассмотренной задачи на основе комплексного применения метода динамики формирования рек и метода роя частиц позволяет получить рациональный вариант маршрута движения ЛА с учетом рельефа местности.

Предварительное решение задачи МДФР обеспечивает формирование опорного варианта маршрута движения ЛА с автоматическим определением числа ППМ и параметров МРЧ. Применение МРЧ для уточнения опорного решения формирует рациональный вариант маршрута движения ЛА с учетом всех ограничений, накладываемых на задачу, с обеспечением более стабильного и высокого по качеству результата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Моисеев В. С.* Динамика полета и управление беспилотными летательными аппаратами: Монография. Казань: РИЦ „Школа“, 2017. 416 с.
2. *Есиков О. В., Акинишин О. Н., Хомяков К. А., Агафонов Д. О.* Модели и алгоритмы имитации движения воздушных целей в тренажерных комплексах. Тула: ВСРОК, 2022. 115 с.
3. *Шпенст В. А., Морозова О. Ю., Белошицкий А. А.* Устройства для диагностики объектов электроэнергетики с помощью беспилотных авиационных систем // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 6. С. 503–508.
4. *Васильченко А. С., Иванов М. С., Колмыков Г. Н.* Формирование маршрутов полета беспилотных летательных аппаратов с учетом местоположения средств противовоздушной обороны и радиоэлектронного подавления // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 4. С. 403–420. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10416.

5. Бортакровский А. С., Урюпин И. В. Оптимизация маршрутов непрерывно-дискретного движения управляемых объектов при наличии препятствий // Тр. МАИ. 2020. № 113. С. 1–34. DOI: 10.34759/trd-2020-113-17.
6. Козуб А. Н., Кучеров Д. П. Интеграционный подход к задаче выбора маршрута группы БПЛА // Системы и средства искусственного интеллекта. 2013. № 4. С. 333–343.
7. Марусин В. С., Пономарев О. П., Столяров О. Г., Темеров О. П. Алгоритмы оптимизации маршрута полета летательного аппарата // Вестн. Концерна ВКО „Алмаз–Антей“. 2019. № 1. С. 98–104.
8. Яковлев К. С., Баскин Е. С., Андрейчук А. А. Метод автоматического планирования совокупности траекторий для навигации беспилотных транспортных средств // Управление большими системами. 2015. Вып. 58. С. 306–342.
9. Алилуева Н. В., Руденко Э. М. Задача маршрутизации беспилотных летательных аппаратов на графе реперных точек // I-methods. 2018. Т. 10, № 1. С. 5–18.
10. Жук А. А., Булойчик В. М., Акулич С. В. Планирование оптимального маршрута движения беспилотного летательного аппарата по критерию минимума общего расхода топлива // Системный анализ и прикладная информатика. 2022. № 3. С. 43–49.
11. Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б., Нгуен Т. К., Фам К. Ф. Планирование маршрутов полета БПЛА в задачах группового патрулирования протяженных территорий // Мехатроника, автоматизация, управление. 2023. Т. 24, № 7. С. 374–381.
12. Белоконь С. А., Золотухин Ю. Н., Нестеров А. А. Планирование маршрутов движения летательного аппарата с использованием гладких траекторий // Автометрия. 2017. Т. 53, № 1. С. 3–11.
13. Хачумов М. В. Планирование и моделирование траекторного движения летательного аппарата в сложных условиях // Искусственный интеллект и принятие решений. 2018. № 1. С. 3–11.
14. Есиков О. В., Данилов А. В., Земляничин М. С. Планирование маршрута движения летательного аппарата с применением многоагентных алгоритмов стохастического поиска решения // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2022. Вып. 12. С. 156–159.
15. Есиков О. В., Акинишин Р. Н., Данилов А. В., Земляничин М. С. Решение задачи планирования маршрута движения летательного аппарата с учетом рельефа местности // Электронные информационные системы. 2023. № 1 (36). С. 17–26.
16. Карпенко А. П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: Учеб. пособие. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. 446 с.
17. Nikolos I. K., Valavanis K. P., Tsourveloudis N. C., Kostaras A. N. Evolutionary Algorithm Based Offline/Online Path Planner for UAV Navigation // IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics. Part B: Cybernetics. 2003. DOI: 10.1109/TSMCB.2002.804370.
18. Гладков Л. А., Курейчик В. В., Курейчик В. М. Генетические алгоритмы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 320 с.
19. Eberhart R. C., Kennedy J. Particle swarm optimization // Proc. IEEE Intern. Conf. on Neural Networks. Piscataway, NJ. IEEE Service Center, 1995. P. 1942–1948.
20. Clerc M. Particle Swarm Optimization. Wiley-Interscience, 2006. 243 p.
21. Yesikov D. O., Ivutin A. N. Rational values of parameters of island genetic algorithms for the effective solution of problems of ensuring stability of functioning of the distributed information systems // 5th Mediterranean Conf. on Embedded Computing (MECO), 12–16 June, 2016. P. 309–312. DOI: 10.1109/MECO.2016.7525769.
22. Leguizamon G., Blum C., Alba E. Evolutionary computation // Handbook of approximation algorithms and metaheuristics; Ed. T. F. Gonzalez. Boca Raton, FL: CRC Press, 2007. P. 372–386.
23. Rabanal P., Rodriguez I., Rubio F. Applying River Formation Dynamics to Solve NP-Complete Problems // Nature-Inspired Algorithms for Optimisation; Ed. R. Chiong. Springer-Berlin-Heidelberg, 2009. Vol. 193. P. 333–368.
24. Есиков О. В., Есиков Д. О., Акинишина Н. Ю. Общие принципы выбора параметров многоагентных алгоритмов стохастического поиска для решения отдельных задач дискретной оптимизации // Приборы и системы. Контроль, управление, диагностика. 2018. № 5. С. 47–56.
25. Yesikov O., Yesikov D., Rumiantsev V., Ivutin A. Procedure of Selecting Stochastic Search Multi-agent Algorithm Parameters by the Example of Solving Discrete Optimization Problems // 8th Mediterranean Conf. on Embedded Computing (MECO), Budva, Montenegro, June 10–15, 2019. DOI:10.1109/MECO.2019.8760067.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- Олег Витальевич Есиков** — д-р техн. наук, профессор; Центральное конструкторское бюро аппаратуры, отдел перспективных разработок; заместитель начальника отдела; E-mail: eovmail@rambler.ru
- Дмитрий Олегович Есиков** — канд. техн. наук; Вымпелком-Информационные технологии; ст. архитектор; E-mail: mcgeen4@gmail.com
- Александр Владимирович Данилов** — филиал Военной академии материально-технического обеспечения, учебно-методический отдел, начальник отдела
- Максим Самюэльевич Земляницын** — студент; Тульский государственный университет, Институт прикладной математики и компьютерных наук

Поступила в редакцию 09.11.2023; одобрена после рецензирования 01.12.2023; принята к публикации 22.03.2024.

REFERENCES

- Moiseev V. S. *Dinamika poleta i upravleniye bespilotnymi letatel'nyimi apparatami* (Flight Dynamics and Control of Unmanned Aerial Vehicles), Kazan, 2017, 416 p. (in Russ.)
- Esikov O. V., Akinshin O. N., Khomyakov K. A., Agafonov D. O. *Modeli i algoritmy imitatsii dvizheniya vozdushnykh tseley v trenazhernykh kompleksakh* (Models and Algorithms for Simulating the Movement of Air Targets in Training Complexes), Tula, 2022, 115 p. (in Russ.)
- Shpenst V. A., Morozova O. Yu., Beloshitsky A. A. *Journal of Instrument Engineering*, 2021, no. 6, pp. 503–508. (in Russ.)
- Vasilchenko A. S., Ivanov M. S., Kolmykov G. N. *Systems of Control, Communication and Security*, 2019, no. 4, pp. 403–420, DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10416. (in Russ.)
- Bortakovskii A., Uryupin I. *Trudy MAI*, 2020, no. 113, DOI: 10.34759/trd-2020-113-17. (in Russ.)
- Kozub A. N., Kucherov D. P. *Sistemy i sredstva iskusstvennogo intellekta*, 2013, no. 4, pp. 333–343 (in Russ.)
- Marusin V. S., Ponomarev O. P., Stolyarov O. G., Temerov O. P. *Vestnik Kontserna VKO „Almaz-Antey“*, 2019, no. 1, pp. 98–104. (in Russ.)
- Yakovlev K. S., Baskin E. S., Andreychuk A. A. *Management of Large Systems*, 2015, no. 58, pp. 306–342. (in Russ.)
- Alilueva N. V., Rudenko E. M. *I-methods*, 2018, no. 1(10), pp. 5–18. (in Russ.)
- Zhuk A. A., Bulochik V. M., Akulich S. V. *System Analysis and Applied Information Science*, 2022, no. 3, pp. 43–49. (in Russ.)
- Filimonov A. B., Filimonov N. B., Nguyen T. K., Pham Q. P. *Mechatronics, Automation, Control*, 2023, no. 7(24), pp. 374–381. (in Russ.)
- Belokon' S. A., Zolotukhin Y. N., Nesterov A. A. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2017, no. 1(53), pp. 3–8.
- Khachumov M. V. *Artificial Intelligence and Decision Making*, 2018, no. 1, pp. 3–11. (in Russ.)
- Yesikov O. V., Danilov A. V., Zemlyanitsyn M. S. *News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2022, no. 12, pp. 156–159. (in Russ.)
- Yesikov O. V., Akinshin R. N., Danilov A. V., Zemlyanitsyn M. S. *Elektronnyye informatsionnyye sistemy*, 2023, no. 1(36), pp. 17–26. (in Russ.)
- Karpenko A. P. *Sovremennyye algoritmy poiskovoy optimizatsii. Algoritmy, vdokhnovlennyye prirodoy* (Modern Search Engine Optimization Algorithms. Algorithms Inspired by Nature), Moscow, 2017, 446 p. (in Russ.)
- Nikolos I. K., Valavanis K. P., Tsourveloudis N. C., Kostaras A. N. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics — part b: cybernetics*, 2003, DOI: 10.1109/TSMCB.2002.804370.
- Gladkov L. A., Kureichik V. V., Kureichik V. M. *Geneticheskiye algoritmy (Genetic Algorithms)*, Moscow, 2006, 320 p. (in Russ.)
- Eberhart R. C., Kennedy J. *Proc. IEEE Intern. Conf. on Neural Networks, Piscataway, IEEE Service Center*, 1995, no. 4, pp. 1942–1948.
- Clerc M. *Particle swarm optimization*, NJ, Wiley-Interscience, 2006, 243 p.
- Yesikov D. O., Ivutin A. N. *5th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)*, June 12–16, 2016, pp. 309–312, DOI: 10.1109/MECO.2016.7525769.
- Leguizamón G., Blum C., Alba E. *Handbook of approximation algorithms and metaheuristics*, Boca Raton, CRC press, 2007, pp. 372–386.
- Rabanal P., Rodriguez I. and Rubio F. *Nature-Inspired Algorithms for Optimisation*, vol. 193. Studies in Computational Intelligence, Springer, Berlin Heidelberg, 2009, pp. 333–368.
- Yesikov O. V., Yesikov D. O., Akinshina N. Yu. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2018, no. 5, pp. 47–56. (in Russ.)
- Yesikov O., Yesikov D., Rumiantsev V., Ivutin A. *8th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)*, Budva, Montenegro, June 10–15, 2019, DOI:10.1109/MECO.2019.8760067.

DATA ON AUTHORS

- Oleg V. Yesikov** — Dr. Sci., Professor; Central Design Bureau of Apparatus Engineering, Department of Advanced Development; Deputy Head of the Department; E-mail: eovmail@rambler.ru
- Dmitry O. Yesikov** — PhD; VimpelCom–Information Technologies LLC; Senior Architect; E-mail: mcaeen4@gmail.com
- Alexander V. Danilov** — Branch of the Military Academy of Logistics, Educational and Methodological Department: Head of the Department
- Maksim S. Zemlyanitsyn** — Student; Tula State University, Institute of Applied Mathematics and Computer Sciences

Received 09.11.2023; approved after reviewing 01.12.2023; accepted for publication 22.03.2024.