

УДК 519.6:004.93

*А.Н. Козуб¹, Д.П. Кучеров²*¹Национальная академия обороны Украины (НАОУ)

Украина, 03049, г. Киев, пр. Воздухофлотский, 28

²Национальный авиационный университет (НАУ)

Украина, 03680, г. Киев, пр. Космонавта Комарова, 1

Интеграционный подход к задаче выбора маршрута группы БПЛА

*A.N. Kozub¹, D.P. Kucherov²*¹ National Defense Academy of Ukraine

Ukraine, 03049, Kyiv, Povitroflotskyi Ave, 28

² National Aviation University

Ukraine, 03680, Kyiv, Kosmonavta Komarova Ave, 1

Integrated approach to the problem of planning the route of UAV

*А.М.Козуб¹, Д.П.Кучеров²*¹ Національна академія оборони України (НАОУ)

Україна, 03049, м. Київ, пр. Повітрофлотський, 28

² Національний авіаційний університет (НАУ)

Україна, 03680, м. Київ, пр. Космонавта Комарова, 1

Інтеграційний підхід до задачі вибору маршруту групи БПЛА

В статье рассматривается три подхода к задаче планирования маршрута беспилотных летательных аппаратов. Проводится сравнительный анализ поисковых методов на графах и мультиагентные алгоритмы: муравьиный алгоритм и алгоритм «запрос-ответ-соглашение». На основе проведенного анализа предлагается интеграция поисковых подходов на графах и мультиагентного, работающих на параллельной основе.

Ключевые слова: планирование маршрута, мультиагентная система, поиск на графе.

In these paper three approaches to the problem of planning a route of unmanned aerial vehicles is discussed. A comparative analysis of search methods on graphs and multi-agent algorithms: the ant algorithm and the algorithm of the "request-reply-agreement" is given. Based on the analysis the integration of methods running on a parallel basis is proposed.

Key words: planning of the route, multi-agent system, search on graph.

У статті розглядається три подходи до задачі планування маршруту безпілотних літальних апаратів.

Проводиться порівняльний аналіз пошукових методів на графах і мультиагентні алгоритми: мурашиний алгоритм та алгоритм «запит-відповідь-угода». На основі проведеного аналізу пропонується інтеграція пошукових походів на графах і мультиагентного, що працюють на паралельній основі.

Ключові слова: планування маршруту, мультиагентна система, пошук на графі.

Введение

В настоящее время накоплен значительный опыт по созданию беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), в то же время вопрос их эффективного применения, судя по значительному количеству публикаций в этом направлении в изданиях

ближнего и дальнего зарубежья (см., например, [1-3] и ссылки), остается открытым. Одной из наиболее важных задач обеспечения полетов является задача планирования маршрута БПЛА. Эта задача состоит в определении набора точек в пространстве, которые бы отвечали траектории полета БПЛА и определялись на карте. На выбор маршрута оказывают влияние следующие факторы: ограниченное время полета; безопасность полета; множественность маршрутов.

Последний фактор свидетельствует о неоднозначности пути, по которому будут следовать БПЛА. Решение этой задачи требует выдвижения критерия, по которому следует выбрать наиболее подходящий маршрут. В условиях препятствий полету необходимо увеличивать число промежуточных точек, которые обеспечивали бы возможность обхода возможных препятствий. В этом случае возникает совместная задача, как сокращение маршрутного времени, так и уменьшения количества точек, по которым строится траектория.

Безопасность полета определяется выбором соответствующих значений дистанции, интервала и превышения в вертикальной плоскости между элементами группы. Это является самостоятельной задачей, основанной на практике применения БПЛА и корректном выполнении маневров при выполнении конкретных задач.

Ограниченность полета по времени предполагает определение такого маршрута, который позволил бы решить поставленную задачу в установленное время. Из практических соображений маршрут БПЛА должен состоять из прямолинейных участков и участков кривизны, соединяющих прямолинейные участки.

В работах [1-3] предпринимались попытки решения задачи планирования маршрута с использованием геометрического подхода, базирующегося на работе [4]. Однако, оптимальная траектория при решении задачи по Дубинсу может оказаться физически не реализуемой, в таком случае имеем задачу с ограничением на кривизну полета или же эти подходы в принципе не являются применимыми в условиях большого количества опорных точек, по которым строится маршрут. Для этого могут оказаться пригодными поисковые методы такие, как, например, поиск на графах [5], [6] и мультиагентные алгоритмы [7-9], интенсивно развиваемые в последнее время. Однако эти алгоритмы обладают проблемами сходимости и точности полученного решения.

Таким образом, целью статьи является разработка подхода, обеспечивающего построение маршрутов группы БПЛА, которые имели бы минимальное расстояние между начальной и конечной опорными точками в условиях с большим количеством промежуточных точек на основе графов и мультиагентности.

Постановка задачи. Задача функционирования группы БПЛА ставится в форме некоторого задания. В наиболее общей форме система, состоит из оператора с пультом управления, наземных средств управления, контроля и связи, группы из n БПЛА, $n \geq 2$. Предполагается, что БПЛА являются разноцелевыми и могут многократно использоваться (рис. 1). На рис. 1 введены обозначения областей выполнения задания O_1-O_4 отдельными БПЛА, маршруты M_1-M_4 , БПЛА – L_1-L_5 .

Полученное задание вводится в вычислительную часть, где оно подвергается формализации и обработке планировщиком. Планировщиком определяется требуемое количество БПЛА, им назначаются маршруты, производится выдача заданий самолетам, мониторинг выполнения планов и обнаружение расхождения / несоответствие их выполнения. БПЛА получают и отрабатывают задание, реагируют на определенные события и формируют отчеты о выполнении задания. Этот процесс контролируется оператором, а именно производится анализ отчетов, при необходимости могут вноситься коррективы.

Маршрут задается набором, включающим N опорных точек, определяемых пространственными координатами области выполнения задания. Предполагается, что значения начальной (x_0, y_0, z_0) и конечной переменной (x_k, y_k, z_k) фиксированы. Заданы также координаты препятствий, в виде координат (x_j, y_j, z_j) центра и его радиуса, $j = 0, m, m \neq N, j \neq k$. Необходимо построить такое решение, которое позволяет выбрать набор n опорных точек, таких, что $n < N$, обеспечивает наименьшую длину пути каждому самолету:

$$S = \min_{n < N} \sum_{i=1}^n S_i, \quad (1)$$

где $S = f(n, m, t)$, где t имеет смысл длительности алгоритма, а m – отрезки пути.

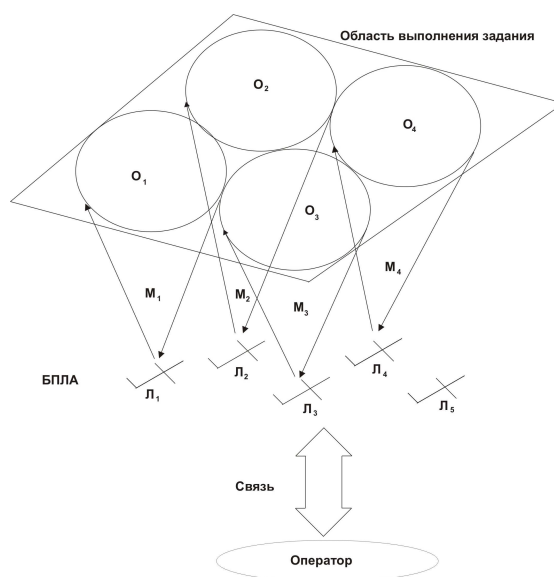


Рисунок 1 – Структура мультиагентной системы с БПЛА

Задача (1) определяет последовательность точек в пространстве возможных решений (граф), который обеспечивает минимальное расстояние между начальной и конечной точками с учетом всех возможных N . В статье представляются возможные подходы к построению оптимального маршрута по критерию минимума длины пути, основанные на различных подходах.

Построение дерева решений

Естественный путь к решению задачи (1) состоит в построении дерева решений и оптимизации маршрута по возможным направлениям. Дерево решений структурно состоит из внутренних и внешних узлов. Во внутренних узлах принимается решение о следующем посещаемом дочернем узле по расчетным значениям некоторой функции решения. Внешние узлы не содержат дочерних узлов, описывают значение, характеризующее входные данные.

Деревья решений могут строиться таким образом. В корневом узле рассчитывается функция решений по входным данным. Функция решения представляет длину маршрута с учетом путевых препятствий, фиксируемую на каждом очередном узле. По результатам расчета происходит переход к одному из дочерних узлов. Решением считается линия, соединяющая точку S с точкой F (рис. 2).

При значительном количестве точек n такой граф представляет набор решений, структура которого позволяет говорить о дереве (лесе) решений. Деревья решений представляют собой нисходящую систему, основной целью которой является разделение дерева на взаимно непересекающиеся подмножества. Процедура принятия решения о принадлежности определённого состояния к тому или иному классу с помощью дерева решений относится к методам классификации состояний.

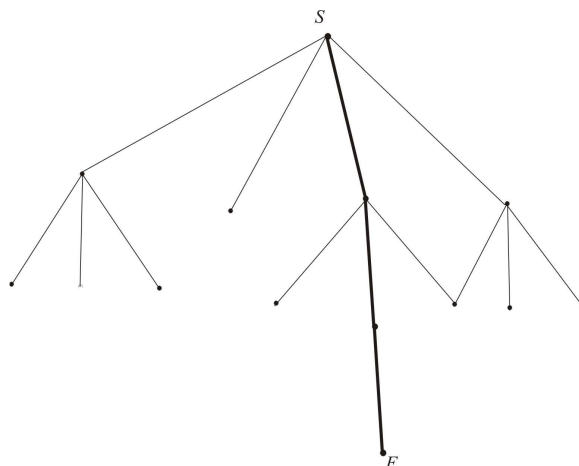


Рисунок 2 – Поиск решения по дереву решений

Отличительной особенностью такого графа является замкнутость, т.е. конечная точка совпадает с начальной или достаточно близко к ней расположена, однако, $S \neq 0$, а ребра определяются кривыми второго порядка. Для упрощения построения графа будет считать ребра прямыми.

В случае использования алгоритма с поиском по замкнутому графу (например, Дейкстры [9]) выбор направления может быть сделан по наибольшему расстоянию, образуемым соседними треугольниками и следуемым из неравенства треугольника

$$c(i, j) \leq c(i, v) + c(v, j), \quad (2)$$

где i, j, v – опорные узлы дерева.

Такие переходы продолжаются до тех пор, пока не будет посещён конечный узел, описывающий либо метку класса, либо значение, связанное с входным вектором значений признаков. Наличие препятствий позволяет добавлять упрежденную путевую точку, в которой направление дальнейшего маршрута следования должно быть изменено.

Алгоритм является одноагентным, детерминированным, однако требует как минимум одноразового посещения каждого узла с целью определения и фиксации в дальнейшем наименьшего расстояния. В отличие от муравьиного алгоритма является сходящимся.

Алгоритмы, относящиеся к разряду алгоритмов поиска на графе, позволяют находить маршрут с наименьшей стоимостью пути от одной вершины к другой. К алгоритмам такого сорта можно отнести и алгоритмы поиска по дереву решений, Дейкстры, A^* и их модификации. Время работы алгоритмов в общем случае не превышает $O(n^2)$, а для разреженного графа $O((n+m)\log n)$, где n и m – количество вершин и ребер графа соответственно.

Построение многоагентной системы с такими алгоритмами возможно при назначении агентам различных подзадач с централизованным распределением областей выполнения задач. Основными проблемными вопросами этих алгоритмов является требования к ресурсам памяти, требующих хранения экспоненциального числа узлов, и временные затраты на поиск всех возможных решений.

Мультиагентные алгоритмы. В последнее время многими авторами, развивающими децентрализованное управление, пропагандируется подход мультиагентных систем [7-9], заимствованный из общественных биосистем, которым относят муравейник, пчелиный рой и другие. Данные системы привлекательны по некоторым признакам, к которым относят, прежде всего, автономность действий отдельных агентов, децентрализация управления за счет реализации в системе коллективного интеллекта и обучаемость агентов. В зависимости от типа выбранной мультиагентной системы накопленная при поиске информация о пройденном маршруте передается в виде феромона для муравьев или же виляющего танца для пчел. Как и в [7], в качестве агентов здесь будем иметь в виду агентов, подобным муравьям, оставляющих феромон как единицу информативности.

Муравьиный алгоритм. В этой системе рассматривается набор агентов $A_m = \{a_1, \dots, a_m\}$, выполняющих единую задачу – определение наилучшего маршрута путем многократного исследования пространства поиска в различных направлениях. Особенностью предполагаемого перемещения является наличие феромона, выделяемого агентами на пути в процессе своего перемещения. Считается, что маршрут представляется конечным набором отрезков, определяемых рядом опорных точек. Феромон, оставляемый на отрезке ij маршрута, с течением времени испаряется. Запись ij означает, что осуществляется переход из опорной точки i маршрута в точку j , рис. 3.

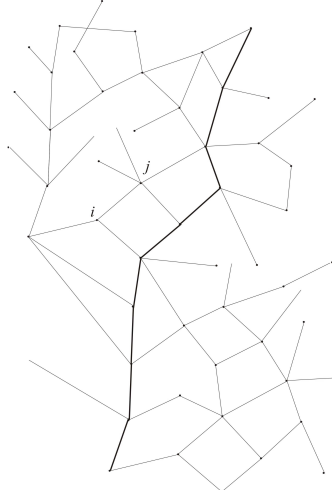


Рисунок 3 – Действие муравьиного алгоритма при определении маршрута

Таким образом, наилучшим маршрутом является тот, на котором остаётся большее количество феромона, так как добавление феромона происходит чаще, чем испарение. Тогда правило обновления феромона записывается в виде [9]

$$\tau_{ij}[k+1] = (1-p)\Delta\tau_{ij}[k] + \tau_{ij}[k], \quad (3)$$

В уравнении (3) $\tau_{ij}[k]$ – текущее значение феромона, оставляемого на участке ij , $\Delta\tau_{ij}[k]$ имеет смысл количества отложенного феромона на отрезке ij проделанного маршрута очередным агентом на k -ой итерации с начальным значением $\tau[0]$, а $p \leq 1$ – коэффициент испарения феромона, определяемый интенсивностью действия агентов и выбираемый из интервала $p \in [0, 1]$.

Вероятность выбора транспортировки агента из опорной точки i в точку j на k -ой итерации оценивается формулой [7]

$$P_{ij}(k) = \frac{(\tau_{ij}[k])^\alpha (\eta_{ij})^\beta}{\sum_l (\tau_{il}[k])^\alpha (\eta_{il})^\beta}, \quad (4)$$

где η – видимость следующей опорной точки, представляет величину обратную расстоянию до нее, а α и β – весовые показатели интенсивности следа феромона и видимости, устанавливаемые на основании проводимых опытов.

Достоинством подхода является возможность нахождения квазиоптимального маршрута, что достигается многократным повторением процедуры прохождения агентов по маршруту, соответствующему максимальному значению τ из (1). А длительность процедуры поиска является платой за проведенный поиск, что непосредственно ведет к поиску стратегий усовершенствования метода поиска.

Как следует из (2) (см. также [9]), количество феромона является величиной вероятностной, поэтому для получения достоверного результата необходимо большое число повторений эксперимента, что значительно увеличивает время поиска наилучшего решения. К тому же алгоритм не является конвергентным, т.е. после обнаружения ближайшего к лучшему решению генерируются новые решения, что дает положительное свойство – возможность избежать попадания в локальные экстремумы. К недостаткам метода следует также отнести эвристичность подхода, а именно отсутствие строгого математического анализа приводит к тому, что все решения базируются только на результатах проводимых экспериментов.

Описанный подход с агентами, участвующих в поиске, имеет смысл в задачах со значительным количеством неупорядоченных в пространстве опорных точек, когда возникают определенные трудности при поиске наилучшего маршрута. Следует предполагать, что ввиду большого числа агентов, задействованных в процедуре поиска, в определенных условиях возможно получать временной выигрыш в использовании муравьиного по сравнению с другими известными подходами.

Данный подход может быть также целесообразен при выборе кратчайшего маршрута с использованием БПЛА при наличии значительного количества препятствий на маршруте, воспринимаемых как дополнительные опорные точки.

В задачах же с малым количеством опорных точек правильный выбор маршрута в большинстве случаев является очевидным и поэтому подход муравьиной колонии не может быть рекомендован к применению.

Алгоритм «запрос-ответ-соглашение». Иным подходом к построению децентрализованных систем, использующим роевые решения и оптимизацию на основе деревьев решений при построении систем с БПЛА, является подход использования мультиагентных систем. В этом случае система также представляет набор агентов, общающихся между собой путем отправки запросов, получения ответа и далее принятия самостоятельного решения на продолжение поиска, которое следует воспринимать как двустороннее соглашение. Такой подход построения мультиагентных систем получил название «запрос-ответ-соглашение».

В этом случае каждый агент мультиагентной системы занимается своей автономной задачей, способен производить не только обмен информацией с центром, но и оказывать помощь своим коллегам. В соответствии с указанными свойствами, каждому агенту-БПЛА указывается свой специфический маршрут, который не пересекается с маршрутом агента-коллеги, но может дополнять его. Исходя из назначения БПЛА, будем считать все маршруты замкнутыми. Варианты маршрутов БПЛА могут использовать схемы, представленные на рис. 4 – 6, где показано, что они могут координироваться также центром управления, представляемого на рисунках оператором.

С целью повышения производительности функционирования системы, может быть назначено и большее количество агентов на один маршрут, как это показано на рис. 5.

В системе управления с мультиагентным подходом используется аналогия феромон – информация, феромон испаряется – информация устаревает. Представленные

на рис. 4-6 возможные маршруты, показывают типовые варианты движения БПЛА на открытых участках местности по замкнутым маршрутам с широким и узким кольцам, а также зигзагообразный. В зависимости от размера области выполнения задачи предполагается, что большая по величине область соответствует маршруту с широким кольцом, а узкая – малой.

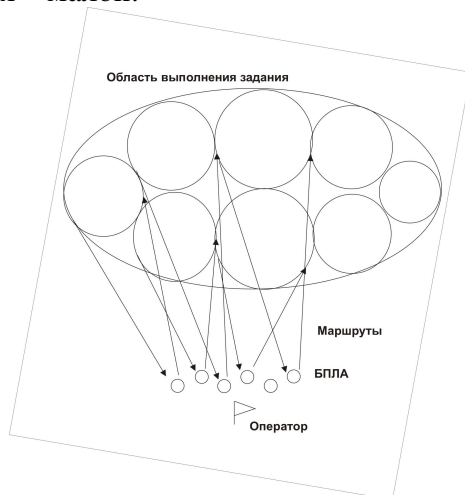


Рисунок 4 – Маршруты движения БПЛА в широком кольце

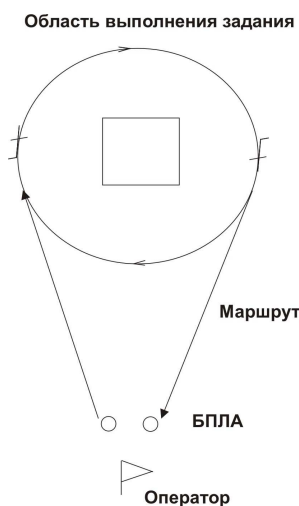


Рисунок 5 – Маршрут движения БПЛА в узком кольце

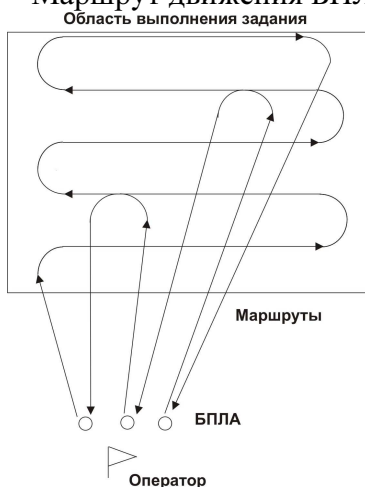


Рисунок 6 – Зигзагообразные маршруты движения БПЛА

Из анализа рис. 4 – 6 видно, что характерными элементами маршрутов являются участки прямолинейного и кругового движений БПЛА, что вполне реализуемо техническими средствами, хотя и может требовать значительных вычислительных затрат и хорошей информативности канала связи.

Сравнительная оценка различных подходов к построению мультиагентных систем с БПЛА. В результате рассмотрения различных подходов к задаче планирования маршрутов БПЛА в сложных условиях позволяет сделать вывод о целесообразности ее построения как мультиагентной системы. Все эти алгоритмы базируются на разных системах знаний. Так, муравьиный алгоритм требует информацию об испаряемости феромона, видимости (длины) маршрута, набора агентов и по сути является вероятностным. Алгоритм поиска решений на графах является детерминированным, использует информацию только об опорных точках и расстоянии между ними, наилучший маршрут определяется одним агентом. Модель «запрос-ответ-соглашение» также относится к вероятностным, как и муравьиный алгоритм. Алгоритмы муравьиной колонии и принцип «запрос-ответ-соглашение» обладают определенными недостатками. Так муравьиному алгоритму свойственны итерационность и многократность повторения связанная с вероятностной природой алгоритма, что приводит к значительным временным затратам на поиск квазиоптимального решения. В свою очередь подходу «запрос-ответ-соглашение» требуется только предварительное определение задачи (конечной цели) и значительное время на согласование действий с соседями.

Алгоритмы поиска решений на графе являются хорошо сходящимися, детерминированными алгоритмами, однако предназначены для работы с одним агентом. Обобщенные результаты сравнительной оценки алгоритмов поиска представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Сравнительная оценка алгоритмов поиска маршрута

Алгоритм	поиска решений на графе	муравьиный	«запрос-ответ-соглашение»
Основа	детерминированный	вероятностный	вероятностный
Сходимость	экспоненциальная	полиномиальная	полиномиальная
Агентность	одноагентный	мультиагентный	число агентов определяется количеством решаемых задач
Ресурсы	требует хранения всей карты узлов	не требует хранения информации о всех узлах	не требует хранения информации о всех узлах
Информирование	исходные данные	феромоном	запросное
Размерность	малая	высокая	высокая

В табл. 1 размерность следует выбирать, руководствуясь выводами [7], где малая размерность определена как $n < 20$.

Реализация задачи планирования маршрута группы БПЛА. Определение маршрута каждому элементу в группе из БПЛА в сложных условиях функционирования является важной и в тоже время длительной процедурой, связанной с множественностью выбора из возможных решений. Естественным образом возникает желание применить централизованное управление, когда устанавливается маршрут по жесткой схеме, что может приводить к неоправданной трате ресурсов.

Анализ возможных решений данной задачи дает представление о способах построения систем, обеспечивающих разработку плана маршрутов. Рассмотренные способы базируются на одноагентном и мультиагентном подходах. Одноагентный, в отличие от мультиагентного подхода, обладает высокой точностью получающихся решений, хотя и проигрывает мультиагентному в скорости сходимости в задачах с высокой размерностью и требованиями к памяти системы. Поэтому представляет интерес интегрировать эти подходы и ожидать от такой комбинации системного эффекта, обеспечивая работу мультиагентного подхода при высокой размерности системы, по мере прохождения опорных точек и, соответственно, сокращении размерности системы передать дальнейший поиск оптимального решения одноагентному алгоритму. Схематически такую интеграцию можно представить в виде следующей схемы рис. 7.

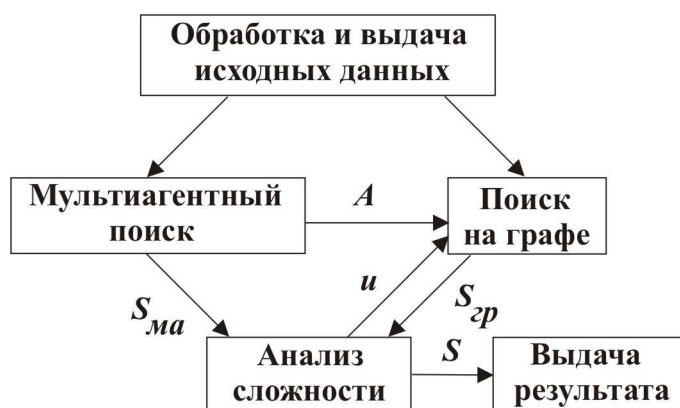


Рисунок 7 – Схема интеграции алгоритмов

На рис. 7 алгоритмы мультиагентного поиска и поиска на графе работают параллельно и выдают результаты поиска на блок анализа сложности системы. Блок анализа сложности производит оценку сложности задачи путем обратного отсчета необработанных результатов. Принимается решение о целесообразности выдачи в качестве результатов S_{ma} системы мультиагентного поиска или S_{gp} поиска на графе, в случае определения лучших результатов в при поиске. Сигнал u , который выдает в блок поиска на графе, говорит о приоритетности результатов этого блока и выдает в качестве результата наилучший маршрут.

Данная интеграция позволяет получить решение значительно точнее и быстрее, чем отдельное использование алгоритма решения на графах или же мультиагентного. Особенностью подхода является параллельное использование алгоритмов, что обеспечивает высокую скорость сходимости и достаточную точность результата за счет использования точного метода, которым является поиск на графе. В случае, когда анализатор сложности задачи обнаруживает возможность использования поиска на графе, то выдаваемый сигнал u обеспечивает перезагрузку исходных данных A с мультиагентного алгоритма на графовый. Такой переход с одного алгоритма на другой позволяет реализовать идею адаптации к сложности задачи. Полный маршрут формируется в блоке анализа сложности задачи. Данный подход в целом позволяет эффективно решать сложные практические задачи планирования маршрутов БПЛА.

Выводы. В статье рассматривается задача выбора маршрута при коллективном использовании БПЛА, а также приводится сравнительный анализ алгоритмов, основанных на различных системах знаний, а именно алгоритмов, применяемые в

мультиагентных системах и алгоритмов поиска на графах. Среди мультиагентных рассмотрены муравьиный алгоритм и алгоритм «запрос-ответ-соглашение». Альтернативой мультиагентным системам представлено также решение этой задачи детерминированным алгоритмом, использующим подход поиска решений на графе, обладающим превосходными свойствами сходимости и точности в определении результата.

Наилучшего решения задачи выбора маршрута в системах высокой размерности, как показано в статье, следует ожидать в комбинировании рассмотренных алгоритмов, когда недостатки продолжительности поиска и точности мультиагентных подходов будут компенсироваться сходимостью и точностью графовых алгоритмов поиска решений, что позволит реализовать триаду «интеллект-адаптация-управление» в достижении свойства эмерджентности разрабатываемых систем.

Литература

1. Shanmugavel M. Differential Geometric Path Planning of Multiple UAVs / Shanmugavel M., Tsourdos A., White B.A., Zbikowski R.W. / Transactions of the ASME. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. - Vol. 129, 2007, p. 620-632.
2. Степанян К.В. Планирование траектории БПЛА в сложных условиях при наличии угроз / Степанян К.В., Миллер А.Б., Миллер Б.М. // Материалы 33-й конференции молодых ученых и специалистов ИППИ РАН «Информационные технологии и системы» (ИТИС'10) 20-24 сентября 2010, Россия, Геленджик, с.263-268. [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.itas2010.ittp.ru/pdf/1569326822903.pdf>.
3. Алдошин Д.В. Планирование пространственных маршрутов для БПЛА с использованием поиска на графах / Алдошин Д.В. // Молодеж. науч.-техн. вестник. - №2. – 2013. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://sutbud.bmstu.ru/doc/551948.html>
4. Dubins L.E. On curves of minimal length with a constraint on overage curvature, and with prescribed initial and terminal positions and tangents / Dubins L.E. // AM. J. Math. – 1957. - 79. – P. 497-516.
5. Гофман Е. А. Мультиагентный метод построения деревьев решений / Е. А. Гофман, А. А. Олейник, С. А. Субботин // Бионика интеллекта. - № 1 (75). - 2011. - С. 35–40
6. Кормен Т.Х. Алгоритмы: построение и анализ / Кормен Т.Х., Лейзерсон Ч.И., Ривест Р.Л., Штайн К. – М.: ИД «Вильямс», 2005. – 1293 с.
7. Субботін С.О. Неітеративні, еволюційні та мультиагентні методи нечітко логічних і нейромережних моделей / Субботін С.О., Олійник А.О., Олійник О.О. // Запоріжжя: ЗНТУ, 2009. – 375 с.
8. Ходашинский И.А. Алгоритмы муравьиной и пчелиной колонии / И.А. Ходашинский, И.В. Горбунов, П.А. Дудин // Доклады ТУСУРа, № 2 (20), декабрь 2009. – С. 157-161.
9. Штовба С.Д. Мурашині алгоритми оптимізації / Штовба С.Д., Рудий О.М. // Вісник ВПІ. - № 4. – 2004. – С.62-69.

Literatura

1. Shanmugavel M. Differential Geometric Path Planning of Multiple UAVs / Shanmugavel M., Tsourdos A., White B.A., Zbikowski R.W. / Transactions of the ASME. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. - Vol. 129, 2007, p. 620-632.
2. Stepanyan K.V. UAV path planning in difficult conditions, with threats / Stepanyan K.V., Miller A.B., Miller B.M. // Proceedings of the 33rd conference of young scientists and specialists IPPI RAN "Information Technologies and Systems" (ITIS '10), 20-24 September 2010, Russia, Gelendzhik, p.263-268. [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.itas2010.ittp.ru/pdf/1569326822903.pdf>.
3. Aldoshin DV Spatial planning routes for UAVs using search on graphs / DV Aldoshin // Youth. Scientific-Technical. Bulletin. - № 2. - 2013. [Electronic resource]. – Access mode: <http://sutbud.bmstu.ru/doc/551948.html>
4. Dubins L.E. On curves of minimal length with a constraint on overage curvature, and with prescribed initial and terminal positions and tangents / Dubins L.E. // AM. J. Math. – 1957. - 79. – P. 497-516.

5. Hoffman E.A. Multiagent method of decision trees / E.A. Hoffman, A.A. Oleinik, S.A. Subbotin // Bionics intelligence. - № 1 (75). - 2011. - P. 35-40.
6. Cormen T.H. Algorithms: construction and analysis / Cormen T.H., Leiserson Ch.I., Rivest R.L., Stein C. – Moscow: ID "Williams", 2005. - 1293 p.
7. Subbotin S.O. Neiterativni, evolyutsiyni that multiagentni methodological nechitko logichnih i neyromerezhnih models / Subbotin S.O., Oliynik A.O., Oliynik O.O.// Zaporizhzhya: Zaporozhye National Technical University, 2009. – 375 p.
8. Khodashinsky I.A. Algorithms and ant bee colony / I.A. Khodashinsky, I.V. Gorbunov, P.A. Dudin // Reports TUSUR, № 2 (20), December 2009. - P. 157-161.
9. Shtovba S.D. Murashini algorithmic optimizatsii / Shtovba SD, Rudy O. // News VPI. - № 4. - 2004. - P.62-69.

RESUME

A.N. Kozub, D.P. Kucherov

Integrated approach to the problem of planning the route of UAV

In this paper considered the problem of planning a route of unmanned aerial vehicles in complex environment with a lot of control points. To solve this problem are analyzed deterministic and probabilistic approaches. Among deterministic approaches are chosen search methods on graphs are considered as probabilistic multi-agent: an ant algorithm and the algorithm of the "request-reply-agreement". A comparative analysis of the considered algorithms is given. A distinctive feature of deterministic algorithms is the accuracy of the solutions, but in difficult conditions, this accuracy is achieved considerable duration of the work, at the same time multi-agent have a higher convergence, but have low accuracy. Based on the analysis is proposed integration of search approaches on graphs and multi-agent running on a parallel basis, which leads to the acquisition system, the so-called "systemic effect".

Статья поступила в редакцию 10.07.2013.