

УДК 519.687.1

Д.С. Будаев, Г.Ю. Вошук, Н.А. Гусев, И.В. Майоров, А.Н. Мочалкин**РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА СИСТЕМЫ СОГЛАСОВАННОГО
УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОЙ БЕСПИЛОТНЫХ АППАРАТОВ
С ПРИМЕНЕНИЕМ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ***

Беспилотные летательные аппараты активно используются во многих областях деятельности и отраслях. В числе решаемых задач имеются и критически значимые. Например, применение беспилотных аппаратов в поисково-спасательных работах для поиска пострадавших. Время на выполнение подобных задач часто ограничено, поэтому одновременно используются несколько аппаратов. Сложности в ходе эксплуатации беспилотных аппаратов возникают вследствие наличия неразрешенных проблем организации процессов управления согласованными действиями объединенных групп устройств в режиме реального времени. В статье отмечены основные тенденции развития технологии планирования и управления, изложены существующие подходы к разработке программных систем планирования действий совместно действующих устройств, предложено решение задачи организации совместного управления в распределённых системах путем планирования распределения ресурсов. Способ решения задачи продемонстрирован на примере использования объединённой группировки беспилотных летательных аппаратов для исследования некоторой области территории. Для управления действиями аппаратов группы предложено использовать разработанную на принципах мультиагентности систему согласованного управления. В рамках разработанной постановки территория наблюдения разделяется на отдельные квадраты (подзадачи), которые планируются и перераспределяются аппаратами объединенной группы с дальнейшим выполнением. Интересы каждого аппарата в мультиагентной системе представляет отдельный программный агент, а сам процесс распределения основывается на концепции сетей потребностей и возможностей (ПВ-сетей) и методе сопряженных взаимодействий. Эффективность планирования в системах, основанных на принципах мультиагентности, может оцениваться по нескольким критериям. В предлагаемой модели используются критерии по покрытию квадратов территории и по связи между аппаратами группы. Целью процесса планирования является повышение общей удовлетворенности системы, рассчитываемой как сумма удовлетворенностей всех агентов аппаратов по всем критериям с учетом весов критериев. В заключении статьи делается вывод о перспективности развития разработанного прототипа и имеющегося научно-технического задела при создании программно-аппаратных комплексов управления группами беспилотных аппаратов.

Беспилотные аппараты; мультиагентные системы; планирование задач; групповые действия; роевой интеллект; оптимизация; адаптивность; реальное время.

D.S. Budaev, G.Yu. Voschuk, N.A. Gusev, I.V. Majorov, A.N. Mochalkin**DEVELOPMENT OF PROTOTYPE SYSTEM FOR COORDINATED
CONTROL OF UAVS IN GROUP USING MULTI-AGENT TECHNOLOGY**

Unmanned aerial vehicles (UAVs) are widely used in many spheres and industries. Some of the tasks solved with their help are of crucial importance. For example, use of unmanned vehicles for search and rescue operations while locating survivors. The time dedicated for performing such tasks is often very limited, that is why several devices can be used simultaneously. Difficulties in UAV operation can be caused by some unresolved problems in managing coordinated actions of joint UAV groups in real time. The solution is demonstrated by the use of a UAV group for surveying a certain area. In order to control the actions of the group it is proposed to use a coordinated control system based on multi-agent technology. The observation area is divided into separate

* Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение №14.604.21.0035, уникальный идентификационный номер RFMEFI60414X0035).

squares (subtasks) which are planned and redistributed and then fulfilled by UAVs in a joint group. The interests of each device in the multi-agent system are represented by a separate software agent, and the process of allocation is based on the concept of demand and resource networks and on the method of conjugated interactions. The efficiency of multi-agent planning can be evaluated with the help of several criteria. The paper proposes two criteria: square coverage within the observation area and communication among UAVs in a group. In the summary the paper dwells on the prospects of the developed prototype and its existing scientific and technological potential in developing software and hardware systems for UAV group management.

UAVs; multi-agent systems; tasks scheduling; joint actions; swarm intelligence; optimization; adaptability; real time.

Введение. В связи с развитием технологий управления распределенными системами задачи планирования операций в системах реального времени (СРВ) приобретают особую актуальность. Особенно это касается авиационных систем, в которых время принятия решения ограничено и существенными являются факторы взаимодействия с внешней средой, окружающими летательными аппаратами (ЛА) [1].

Назначение систем реального времени заключается в том, что они должны давать эффект внутри заданного промежутка времени, реагируя на внешние или внутренние изменения. Во всяком случае, существуют временные рамки, в которых система должна давать адекватный отклик. Система управления взаимодействует с внешней средой, основываясь на данных о состоянии этой среды, в частности, о характере и сложности поступающих на планирование задач и от состояния исполняющих устройств-ресурсов. Способность СРВ удовлетворять требованиям потока задач также зависит от производительности ресурсов в данный момент времени. Ограниченность ресурсов может вызывать различные последствия при нарушении временных ограничений, а может вообще не быть заметных последствий. Последствия могут быть корректируемыми с минимизацией ущерба или же результат может быть катастрофическим [2].

Системы планирования ресурсов в реальном времени развиваются по следующим направлениям:

- ◆ методы традиционной оптимизации, линейного программирования в области смешанных вещественно-целочисленных и логических переменных, усовершенствование точных методов решения задач, таких, как «метод ветвей и границ», методы нелинейного программирования, методы программирования в ограничениях [3];
- ◆ жадные алгоритмы, основанные на эвристических бизнес-правилах конкретных предметных областей;
- ◆ метаэвристики – Tabu Search, локальный поиск, GRASP-алгоритмы [4];
- ◆ методы искусственного интеллекта на основе генетических алгоритмов планирования, использование нейронных сетей и нечеткой логики;
- ◆ имитационные методы муравьиных алгоритмов (Ant Colony Optimization (ACO)), роя пчел (Artificial Bee Colony (ABC)), стаи птиц и аналогичные (Bio Inspired), а также методы имитации отжига (Simulated Annealing (SA)), Монте-Карло и другие [5];
- ◆ методы распределенного решения задач планирования ресурсов с применением мультиагентных технологий и рыночного подхода [6].

Стоит отметить, что большая часть таких систем планирования остается централизованной и детерминированной, несмотря на использование статистических методов в задачах оптимизации. В направлении централизованного планирования разрабатываются гибридные эвристические алгоритмы, объединяющие традиционные правила диспетчеризации с генетическими, нейросетевыми, роевыми и другими подходами, которые, разумеется, будут развиваться и в будущем [7].

Как показано в [8], наиболее перспективными и адекватными для проектирования алгоритмов решения задач распределения ресурсов представляются мультиагентные технологии, среди которых наибольшими возможностями обладают комбинированные методы с рыночным подходом мультиагентной оптимизации. Во-первых, рыночная трактовка мультиагентных систем дает близкий к естественному для каждой задачи способ построения объектной модели – разделение на агентов задач и ресурс, что позволяет в дальнейшем производить процедуру определения соответствия задачи и выполняющего ее ресурса. Во-вторых, может осуществляться онтологическая конкретизация свойств агентов для настройки на заданную предметную область. В-третьих, предоставляется возможность задания практически любой логики выбора действий агента на основании его удовлетворенности и виртуальной прибыли в системе «торгов» за ресурсы.

Распределенный принцип принятия решений и поддержка процесса самоорганизации в системе приводит к тому, что мультиагентная система для управления ресурсами динамически устойчива к внешним воздействиям, к неполноте и искажению поступающей информации.

1. Планирование задач с применением мультиагентного подхода. Реализация мультиагентного подхода к динамическому планированию задач на ресурсах основана на использовании концепции сетей потребностей и возможностей (ПВ-сетей) и метода сопряженных взаимодействий для управления ресурсами в реальном времени на виртуальном рынке [9–10].

Согласно данной концепции, каждой задаче, входящим в нее подзадачам и другим потребностям и возможностям (ресурсы ЛА, оборудование, система управления) присваиваются программные агенты, которые договариваются с другими агентами и планируют выполнение задач «точно-в-срок» (just in time, JIT) или «как можно раньше» (as soon as possible, ASAP), что позволяет обеспечить поддержку коллективного согласования и принятия решений в реальном времени на различных этапах планирования и исполнения полетного плана в различных подразделениях, работающих совместно над решением общих задач.

Задача агентов потребностей – найти возможности (ресурсы) для удовлетворения потребностей, а задача агентов возможностей состоит в том, чтобы найти потребности для использования своих возможностей. В случае успешного поиска агенты могут заключать или пересматривать контракты на требуемые услуги на виртуальном рынке системы с выплатой бонусов в случае успешного их выполнения или штрафов в случае разрыва связей, а также компенсаций за ухудшение позиций при уступках в ходе переговоров.

Программные агенты ПВ-сети в мультиагентной среде имеют характеристики (атрибуты), связанные с настройкой сети на данную предметную область, например, доставка определенного груза в заданную географическими координатами точку с запретом вхождения в некоторые области. Кроме того, в выбранной предметной области у агентов заданы целевые критерии (срок, затраты топлива, риск и др.) и функции удовлетворенности со значением от 0 до 1, описывающие их состояния по текущим значениям критериев. С каждым агентом связан счет в виртуальной валюте, с помощью которого в процессе переговоров они могут улучшать свои показатели. Отклонения показателей агентов от предполагаемых идеальных оценивается при помощи штраф/бонусных функций, выраженных в виртуальных денежных единицах. Виртуальные денежные средства агентов предназначены для оценки разнородных критериев в виде единой меры, позволяющей выяснить качество существующего плана, и, с другой стороны, с их помощью удастся ввести естественный механизм оптимизации. Поиск консенсусного решения представлен как согласование требований на виртуальном рынке. Итерационный процесс поис-

ка решения останавливается при достижении консенсуса между агентами или при превышении количества итераций. Таким образом может быть найдено решение при групповом выполнении потока задач в реальном времени.

2. Постановка задачи. В рамках работ рассматривается создание прототипа системы согласованного планирования действий группировки распределенных мобильных устройств, в частности, беспилотных летательных аппаратов, которые способны выполнять группой задачу аэрофотосъемки некоторой заданной территории.

Рассматривается постановка задачи, при которой имеются следующие входные данные:

- ◆ территория, заданная координатами (широта, долгота) граничных точек;
- ◆ данные о рельефе территории (карта высот), возможно неполные;
- ◆ заданное количество беспилотных аппаратов, оборудованных навесным оборудованием и способных к одновременному наблюдению за определенной ограниченной частью территории наблюдения. Каждый аппарат оборудован камерой и способен выполнять как автономный полет по траектории, так и согласование своих действий с другими аппаратами посредством приема-отправки сообщений по беспроводным каналам;
- ◆ сведения о тактико-технических характеристиках аппаратов (ТТХ).

Рассмотрим данную постановку задачи на более детальном сценарии. Имеется некоторая территория наблюдения. Оператор через специальный программный интерфейс пользователя вводит исходные данные: координаты (широта и долгота), границы областей наблюдения и их приоритеты.

Оператор через модуль взаимодействия формирует задачу группе мобильных беспилотных аппаратов на планирование маршрутов облета заданной территории. Задача поступает на каждый аппарат группировки. В ходе процесса распределенного планирования выполняется формирование первоначального плана действий, формируются полетные задания отдельных аппаратов. Как результат планирования, на модуль взаимодействия с оператором поступают выработанные полетные задания, которые в совокупности составляют план выполнения задачи.

Полетным заданием будем называть программный объект, описывающий траекторию полета аппарата и набор действий при полете по траектории, необходимой для выполнения задачи. План выполнения поставленной задачи будем называть полетным планом, который содержит набор полетных заданий отдельных аппаратов группировки и полностью определяет порядок действий всех аппаратов по выполнению задачи. После согласования с оператором плана выполнения задачи группировка приступает к выполнению полетных заданий.

Во время наблюдения за квадратами оператор через модуль взаимодействия может остановить выполнение полетного задания и вернуть на базу любой аппарат, изменить размер и конфигурацию любой области, добавить или удалить область наблюдения, изменить приоритеты областей наблюдения, подключить к группировке новые аппараты. После этих событий оператору должны поступить обновленные маршруты всех аппаратов группировки.

3. Понятие квадрата наблюдения. Для реализации мультиагентного метода планирования коллективных действий вводится понятие квадрата наблюдения. Вся территория наблюдения, заданная оператором, делится на квадраты наблюдения (рис. 1). Размер квадратов не является фиксированным и определяется (вычисляется) исходя из фактических возможностей оборудования аппаратов, например, исходя из площади охвата камеры. Размер квадрата может быть больше, например, при наличии камеры с большей разрешающей способностью. До старта задания определяются размеры квадратов наблюдения. Размер квадратов принимается одинаковым для всех аппаратов группировки.

С каждым квадратом связана отметка времени выполнения (пролета) данного квадрата в формате чч:мм:сс, указывающая когда было последнее наблюдение данного квадрата любым аппаратом группировки. Отметка проставляется в момент пролета аппарата через центр (с учетом некоторой поправки) квадрата. Например, для квадрата может быть указано 12:24:33. Если текущее время 12:25:45, то это означает, что квадрат находится без наблюдения 72 секунды. При очередном пролете аппарата над квадратом территории отметка времени обновляется, проставляется фактическое время наблюдения квадрата.

Кроме отметок времени, с каждым квадратом связан приоритет, определяющий важность квадрата относительно других с их приоритетами.

4. Планирование порядка облета квадратов наблюдения. Для решения задачи согласованного планирования маршрутов группы аппаратов условно выделим понятия потребности и возможности. Потребностью будем считать квадрат наблюдения, для которого требуется произвести аэрофотосъемку. Возможностью будем считать беспилотный аппарат, с помощью которого можно выполнить задачи по наблюдению за квадратами, т.е. обеспечить потребности.

Будем считать подзадачи (квадраты) далее неделимыми порциями работы для ресурсов (беспилотных аппаратов). Планирование полетных заданий будем рассматривать как процесс назначения подзадач на ресурсы. В некоторых случаях агенты аппаратов могут отказываться от выполнения подзадач в пользу других аппаратов.

В момент формирования задачи оператором все подзадачи (квадраты) становятся доступны для всех ресурсов (для выбора агентами всех аппаратов). Количество квадратов наблюдения известно, так как оператор задал границы территории наблюдения и был произведен расчет размера квадратов исходя из количества аппаратов и их характеристик (рис. 1). Таким образом, возможен расчет начального значения буфера для подзадач каждого агента аппарата. Смысл начального ограничения размеров буферов состоит в том, чтобы сбалансировать начальное количество подзадач (квадратов), планируемых к выполнению каждым аппаратом. В дальнейшем возможен пересчет размеров буферов в зависимости от фактических планов-маршрутов аппаратов, их фактической производительности по выполнению подзадач и складывающейся оперативной ситуации (изменения в составе группы, изменения областей).

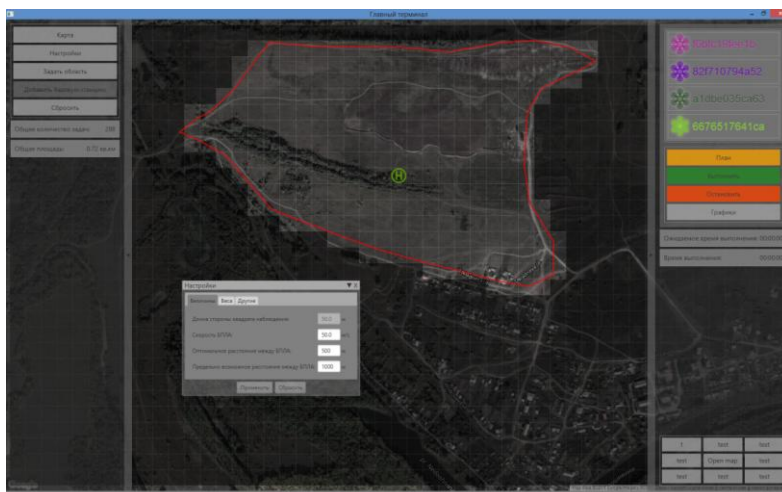


Рис. 1. Оператор задает территорию наблюдения и выбирает аппараты группы для данной задачи

После вычисления начального размера буферов агентов аппаратов происходит начальное распределение подзадач агентами. Каждый агент аппарата выбирает из общего списка подзадач наиболее близкие к своему текущему местоположению, оценивает выбранные подзадачи с учетом собственных критериев (приведены далее), выбирает наиболее выгодную по ключевому показателю эффективности (KPI) подзадачу и сохраняет подзадачу и значение KPI в буфере подзадач. При выборе подзадач агент аппарата выбирает только те свободные подзадачи, которые являются граничными к уже выбранным подзадачам (квадратам) из его буфера подзадач. Это подзадачи, которые находятся слева, справа, впереди или позади текущего квадрата.

Если некоторый агент аппарата уже выбрал подзадачу и поместил ее в свой буфер, эта подзадача считается запланированной и другой агент уже не может ее выбрать. При выборе подзадачи добавляются в буфер агента в том порядке, в котором они были выбраны данным агентом, т.е., например, третья по порядку выбранная подзадача данного аппарата будет на третьей позиции в буфере подзадач агента. У выбранного квадрата проставляется новая отметка времени, равная прогнозируемому значению пролета через центр квадрата.

В процессе планирования порядка облета квадратов важно формировать маршруты аппаратов таким образом, чтобы траектория полета имела наименьшее количество поворотов и разворотов. Для решения этой задачи было предложено по аналогии с предложенным в работе [11] способом генерировать участки маршрута, квадраты подзадач в которых лежат на одной линии – для этого на начальном этапе агентом аппарата в первую очередь выбираются и помещаются в буфер смежные с текущим квадратом подзадачи, лежащие на одной линии с уже запланированным участком маршрута, и лишь при отсутствии подзадач, удовлетворяющих данным условиям, агент рассматривает другие варианты. В ходе дальнейшего планирования и в ходе непосредственного выполнения заданий подзадачи могут перераспределяться между устройствами в зависимости от загруженности их буферов (в процессе балансировки загрузки устройств), при этом большую удовлетворенность агент получит при выборе подзадач, расположенных на одной линии с существующими участками маршрута.

Предлагаемый подход позволяет в режиме реального времени производить распределение и балансировку подзадач и, в отличие от схожих способов формирования маршрута [11–14], изначально предназначен для группы устройств, а получаемое с его помощью решение зависит от степени удовлетворенности агентов по нескольким одновременно существующим критериям.

5. Критерии удовлетворенности агентов. Для численной оценки и сравнения различных вариантов распределения квадратов наблюдения по ресурсам выделяются критерии удовлетворенности агентов аппаратов. В качестве критериев для расчета удовлетворенности агента в настоящий момент выбраны два критерия:

1. Критерий по покрытию квадратов территории, зависящий от оценки наблюдаемости квадратов территории. Смысл критерия в том, чтобы в процессе планирования агенты аппаратов выбирали наиболее неисследованные за предыдущие интервалы времени квадраты наблюдения.
2. Критерий по связи аппаратов группировки друг с другом. Смысл критерия в том, чтобы поддерживать связность аппаратов группировки по каналам передачи информации. Это позволит аппаратам «не разлетаться» за пределы зон, где возможность общения и синхронизации планов с другими аппаратами отсутствует.

6. Критерий по покрытию квадратов наблюдения. Критерий удовлетворенности агента аппарата по покрытию территории зависит от времени, в течение которого квадрат оставался без наблюдения. То есть от того времени, в течение которого ни один аппарат группировки не пролетал квадрат и не производил на нем наблюдения. Данную величину будем называть оценкой наблюдаемости квадратов. На рис. 2 приведен вариант графика функции для расчета оценки наблюдаемости квадрата (значение в интервале от 0 до 1) от времени без наблюдения в секундах.

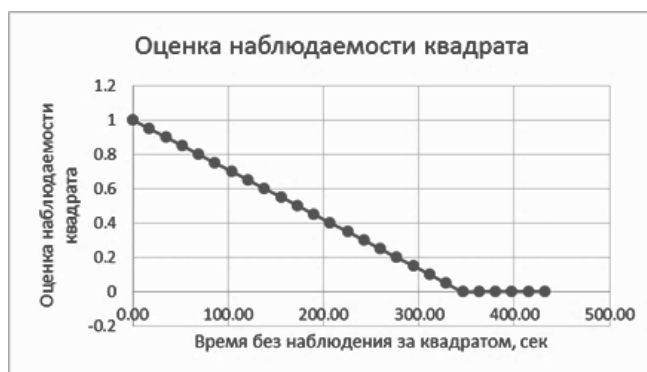


Рис. 2. График функции оценки наблюдаемости квадрата

Вид и наклон функции может корректироваться, в том числе с учетом приоритетов квадратов наблюдения, путем умножения времени без наблюдения за квадратом на значение приоритета. Предлагается задавать приоритет значениями от 1 до 3. Значение 1 задает максимальный приоритет, значение 3 задает минимальный приоритет.

Таким образом, при значении приоритета 2 и более возможны более длительные интервалы без наблюдения за квадратами с данными приоритетами при тех же значениях оценки наблюдаемости квадрата. Как следствие, при выборе квадратов наблюдения для квадратов с большим приоритетом значения оценки наблюдаемости квадратов будут меньше, а значит, меньше будет удовлетворенность агентов аппаратов от выбора квадратов с большим приоритетом при одинаковых значениях времени без наблюдения.

Отметим, что изменение вида функции будет возможно также в ходе работы системы (в процессе коллективного распределенного планирования), т.е. рассматривается возможность динамически управлять «привлекательностью» квадратов наблюдения для агентов аппаратов через корректировку параметра приоритета и вида функции.

Оценка наблюдаемости квадратов территории также меняется со временем согласно дискретным отсчетам (таймеры с дискретизацией на каждом аппарате). Это означает, что данный критерий будет способствовать выбору наименее наблюдаемых квадратов, а сама оценка наблюдаемости «затухает» с ходом времени согласно виду выбранной функции.

Критерий по покрытию квадратов территории оценивается с помощью функции, показанной на рис. 3. Чем ниже оценка наблюдаемости квадрата, который рассматривается как вариант нового положения агентом аппарата, тем выше может быть удовлетворенность агента от выбора такого квадрата.

Данный критерий позволяет оценивать не только один конкретный квадрат, но и совокупность квадратов в определенном направлении (так называемая старода). Данный подход позволит лучшим образом определить наиболее желательный вектор движения аппарата. Вид и наклон функции может корректироваться, в том числе в процессе планирования.

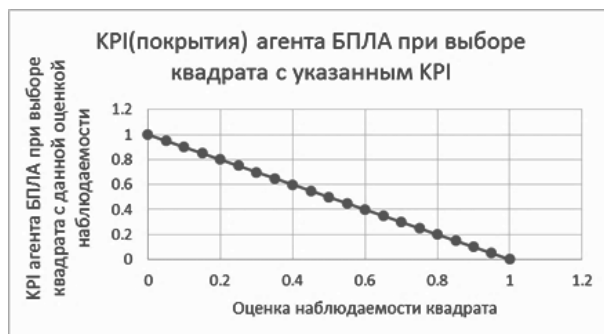


Рис. 3. График функции KPI агента аппарата

7. Критерий по связи между аппаратами. Критерий позволяет рассчитать удовлетворенность агента аппарата по расстояниям до других аппаратов группировки. Для расчета удовлетворенности агента по данному критерию необходимо сопоставить известные расстояния до аппаратов с графиком функций, который определяется характеристикой максимального расстояния связи для передатчика, на основе которого реализуется коммуникация. После определения значений удовлетворенностей агента аппарата по связи с каждым другим аппаратом группировки, определяется итоговое значение удовлетворенности как среднее арифметическое удовлетворенностей.

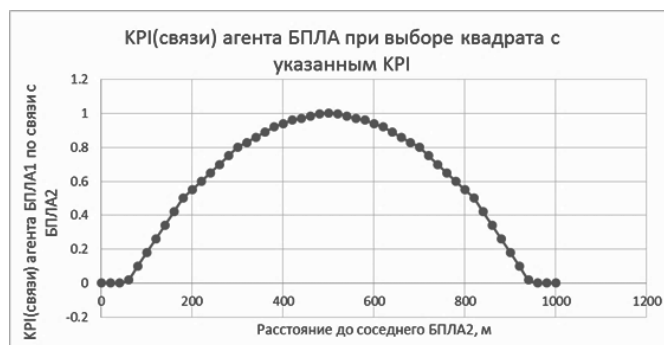


Рис. 4. График функции оценки наблюдаемости квадрата

8. Суммарная удовлетворенность агентов системы. Суммарная удовлетворенность системы на некотором шаге определяется как сумма удовлетворенностей всех агентов аппаратов по критерию покрытия квадратов и критерию связи с другими аппаратами с учетом весов данных критериев (сумма весов равна 1):

$$KPI_{\text{системы}} = k_{\text{покрыт.}} * \sum_{i=1}^N KPI_{i \text{ покрыт.}} + k_{\text{связи}} * \sum_{i=1}^N KPI_{i \text{ связи}}$$

Чем выше суммарный KPI системы, тем лучше качество решения, выбранного с учетом вышеописанных критериев.

При согласовании полетного плана каждый аппарат предоставляют набор возможных вариантов изменения своего положения. Каждый из этих вариантов может быть охарактеризован показателями удовлетворенности отдельно взятого аппарата по покрытию и связи. Итоговой полетный будет представлять из себя совокупность вариантов всех аппаратов группировки (один утвержденный вариант из списка альтернативных для каждого), обеспечивающий максимальный показатель КРІ системы в целом. При сравнении нескольких возможных вариантов полетных планов принимается тот вариант, КРІ которого больше оценок КРІ по другим планам.

Заключение. Системы управления группами робототехнических средств, в том числе беспилотными летательными аппаратами, активно развиваются в настоящее время [15–19], при этом перспективным направлением их развития является выработка технических решений для использования в них инструментов планирования согласованных групповых действий мобильных аппаратов при выполнении общей задачи. Подобные системы должны помимо планирования позволять производить корректировку планов выполнения задач в изменяющихся условиях, в том числе реагировать на непредвиденные ситуации путем перераспределения подзадач между отдельными аппаратами (узлами, ресурсами) группы. Авторы полагают, что метод планирования групповых действий посредством взаимодействия непосредственно самих аппаратов будет обладать преимуществами по сравнению с централизованным планированием. Так, мультиагентное планирование групповых действий может быть организовано на вычислительных модулях отдельных аппаратов. Предлагается организовывать данные модули на основе одноплатных компьютеров с возможностью сетевого взаимодействия между ними. Таким образом, система будет способна планировать и корректировать по событиям согласованные действия аппаратов группы посредством взаимодействия модулей и решать поставленную задачу вне зависимости от того, будет в ее основе группировка беспилотных наземных машин, беспилотных летательных аппаратов, водных судов или их совокупность.

При создании новых аппаратных комплексов, предназначенных для решения групповых задач, одним из наиболее продолжительных и затратных этапов является стадия разработки программных решений [20]. Универсальность и независимость от контекста задачи предлагаемых методов решения также позволит сократить время на внедрение и снизить затраты на их создание за счет сокращения стадии разработки программных решений.

Дальнейшее развитие разработанного прототипа подобной системы видится в тесной взаимосвязи с представителями предметных областей применения мобильных распределенных аппаратов, а также непосредственно с производителями беспилотной техники.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Будаев Д.С., Воцук Г.Ю., Гусев Н.А., Майоров И.В., Мочалкин А.Н. Разработка интеллектуальной системы адаптивного планирования действий групп летательных аппаратов для согласованного выполнения задач // Материалы 3-й Всероссийской научно-технической конференции «РТИ Системы ВКО - 2015», 28 мая 2015 г., Москва.
2. Buttazzo G.C. *Hard Real-Time Computing Systems: Predictable Scheduling Algorithms and Applications.*, Springer, 2011 ISSN 1867-321X.
3. Michael L. Pinedo *Scheduling: Theory, Algorithms, and System.* – Springer, 2008. – 673 с.
4. Vos S. *Meta-heuristics: The State of the Art in Local Search for Planning and Scheduling / A. Nareyek (Ed.).* – Berlin, Springer-Verlag, 2001. – P. 1-23.
5. Binitha S, S Siva Sathya. A Survey of Bio inspired Optimization Algorithms // *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE).* – May 2012. – Vol. 2, Issue-2. ISSN: 2231-2307.

6. Skobelev P. Multi-Agent Systems for Real Time Adaptive Resource Management // In *Industrial Agents: Emerging Applications of Software Agents in Industry*. Paulo Leitão, Stamatios Karnouskos (Ed.). – Elsevier, 2015. – P. 207-230.
7. *Граничин О.Н.* Поисковые алгоритмы стохастической аппроксимации с рандомизацией на входе // *Автоматика и телемеханика*. – 2015. – № 5. – С. 43-59.
8. *Rzevski G., Skobelev P.* Managing complexity. – WIT Press, 2014. – 198 p.
9. *Виттих В.А., Скобелев П.О.* Метод сопряженных взаимодействий для управления распределением ресурсов в реальном масштабе времени // *Автометрия*. – 2009. – № 2. – С. 78-87.
10. *Виттих В.А., Скобелев П.О.* Мультиагентные модели взаимодействия для построения сетей потребностей и возможностей в открытых системах // *Автоматика и телемеханика*. – 2003. – № 1. – С. 177-185.
11. *Santamaria E., Segor F., Tchouchenkov I., and Schoenbein R.* Rapid aerial mapping with multiple heterogeneous unmanned vehicles // *International Journal On Advances in Systems and Measurements*. – 2013. – Vol. 6, No. 3 and 4. – P. 384-393.
12. *Franco C.Di., Buttazzo G.* Energy-Aware Coverage Path Planning of UAVs. Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC) // *IEEE International Conference*. – 2015. – P. 111-117.
13. *Kamrani F.* Using On-line Simulation in UAV Path Planning, Licentiate Thesis in Electronics and Computer Systems, KTH, Stockholm, Sweden, 2007.
14. *Ergezer H., Leblebicioğlu K.* 3D path planning for multiple UAVs for maximum information collection // *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. – 2014. – Vol. 73, No. 1-4. – P. 737-762.
15. *Амелин К.С., Граничин О.Н.* Мультиагентное сетевое управление группой легких БПЛА // *Нейрокомпьютеры: разработка, применение*. – 2011. – № 6. – С. 64-72.
16. *Городецкий В.И., Грушинский М.С., Хабалов А.В.* Многоагентные системы (обзор) // *Новости искусственного интеллекта*. – 1998. – № 2. – С. 64-116.
17. *Тимофеев А.В., Юсупов Р.М.* Принципы построения интегрированных систем мультиагентной навигации и интеллектуального управления мехатронными роботами // *Int. Journal "Information Technologies & Knowledge"*. – 2011. – Vol. 5, No. 3. – P. 237-245.
18. *Baxter J.W., Horn G.S., Leivers D.P.* Fly-by-Agent: Controlling a Pool of UAVs via a Multi-Agent System // *The 27th SGAI International Conference on Artificial Intelligence*. – 2008. – Vol. 21, No. 3. – P. 232-237.
19. *Koo T.J., Shahrz S.M.* Formation of a group of unmanned aerial vehicles (UAVs) // *American Control Conference (ACC)*. – 2001. – P. 69-74.
20. *Austin, Reg.* Unmanned aircraft systems UAVs design, development and deployment. – 1st ed. Wiley Aerospace Series, United Kingdom, 2010. – P. 221-226.

REFERENCES

1. *Budaev D.S., Voshchuk G.Yu., Gusev N.A., Mayorov I.V., Mochalkin A.N.* Razrabotka intellektual'noy sistemy adaptivnogo planirovaniya deystviy grupp letatel'nykh apparatov dlya soglasovannogo vypolneniya zadach [The development of intelligent system for adaptive planning of the group actions of aircraft for the coordinated implementation tasks], *Materialy 3-y Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «RTI Sistemy VKO - 2015», 28 maya 2015 g., g. Moskva* [Materials of the 3rd all-Russian scientific-technical conference "RTI Systems SAIs 2015", may 28, 2015, Moscow].
2. *Buttazzo G.C.* Hard Real-Time Computing Systems: Predictable Scheduling Algorithms and Applications., Springer, 2011 ISSN 1867-321X.
3. *Michael L.* Pinedo Scheduling: Theory, Algorithms, and System. Springer, 2008, 673 p.
4. *Vos S.* Meta-heuristics: The State of the Art in Local Search for Planning and Scheduling / A. Nareyek (Ed.). Berlin, Springer-Verlag, 2001, p. 1-23.
5. *Binitha S, S Siva Sathya.* A Survey of Bio inspired Optimization Algorithms, *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)*. May 2012, Vol. 2, Issue-2. ISSN: 2231-2307.
6. *Skobelev P.* Multi-Agent Systems for Real Time Adaptive Resource Management, *In Industrial Agents: Emerging Applications of Software Agents in Industry*. Paulo Leitão, Stamatios Karnouskos (Ed.). Isevier, 2015, pp. 207-230.
7. *Granichin O.N.* Poiskovye algoritmy stokhasticheskoy approksimatsii s randomizatsiey na vkhode [Search algorithms of stochastic approximation with randomized input], *Avtomatika i telemekhanika* [Avtomatika i Telemekhanika], 2015, No. 5, pp. 43-59.
8. *Rzevski G., Skobelev P.* Managing complexity. WIT Press, 2014, 198 p.

9. Vittikh V.A., Skobelev P.O. Metod sopryazhennykh vzaimodeystviy dlya upravleniya raspredeleniem resursov v real'nom masshtabe vremeni [The method of conjugate interactions to control the distribution of resources in real time], *Avtometriya* [Avtometriya], 2009, No. 2, pp. 78-87.
10. Vittikh V.A., Skobelev P.O. Mul'tiagentnye modeli vzaimodeystviya dlya postroeniya setey potrebnostey i vozmozhnostey v otkrytykh sistemakh [Multiagent interaction models for constructing networks requirements and capabilities in open systems], *Avtomatika i telemekhanika* [Avtomatika i Telemekhanika], 2003, No. 1, pp. 177-185.
11. Santamaria E., Segor F., Tchouchenkov I., and Schoenbein R. Rapid aerial mapping with multiple heterogeneous unmanned vehicles, *International Journal On Advances in Systems and Measurements*, 2013, Vol. 6, No. 3 and 4, pp. 384-393.
12. Franco C.Di., Buttazzo G. Energy-Aware Coverage Path Planning of UAVs. Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC), *IEEE International Conference*, 2015, pp. 111-117.
13. Kamrani F. Using On-line Simulation in UAV Path Planning, Licentiate Thesis in Electronics and Computer Systems, KTH, Stockholm, Sweden, 2007.
14. Ergezer H., Leblebicioğlu K. 3D path planning for multiple UAVs for maximum information collection, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2014, Vol. 73, No. 1-4, pp. 737-762.
15. Amelin K.S., Granichin O.N. Mul'tiagentnoe setevoe upravlenie gruppoy legkikh BPLA [Multi-agent network management group of light drones], *Neyrokomp'yutery: razrabotka, primeneniye* [Neurocomputers: Development, Application], 2011, No. 6, pp. 64-72.
16. Gorodetskiy V.I., Grushinskiy M.S., Khabalov A.V. Mnogoagentnye sistemy (obzor) [Multi-agent systems (review)], *Novosti iskusstvennogo intellekta* [AI NEWS], 1998, No. 2, pp. 64-116.
17. Timofeev A.V., Yusupov R.M. Printsipy postroeniya integrirovannykh sistem mul'tiagentnoy navigatsii i intellektual'nogo upravleniya mekhatronnymi robotami [Principles of integrated systems of multi-agent navigation and intelligent control of mechatronic robots], *Int. Journal "Information Technologies & Knowledge"*, 2011, Vol. 5, No. 3, pp. 237-245.
18. Baxter J.W., Horn G.S., Leivers D.P. Fly-by-Agent: Controlling a Pool of UAVs via a Multi-Agent System, *The 27th SGAI International Conference on Artificial Intelligence*, 2008, Vol. 21, No. 3, pp. 232-237.
19. Koo T.J., Shahruz S.M. Formation of a group of unmanned aerial vehicles (UAVs), *American Control Conference (ACC)*, 2001, pp. 69-74.
20. Austin, Reg. Unmanned aircraft systems UAVs design, development and deployment. 1st ed. Wiley Aerospace Series, United Kingdom, 2010, pp. 221-226.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. С.В. Смирнов.

Будаев Денис Сергеевич – ООО «НПК «Сетецентрические платформы»; e-mail: budaev@smartsolutions-123.ru; 443013, Самара, Московское шоссе, 17, офис 701; тел.: +79270131151; ведущий программист.

Вощук Георгий Юрьевич – e-mail: voschuk@smartsolutions-123.ru; тел.: +79171482188.

Гусев Николай Александрович – e-mail: gusev@smartsolutions-123.ru; тел.: +79297015582.

Мочалкин Александр Николаевич – e-mail: mochalkin@smartsolutions-123.ru; тел.: +79279006007; генеральный директор.

Майоров Игорь Владимирович – ООО «НПК «Разумные решения»; e-mail: imayorov@smartsolutions-123.ru; 443013, г. Самара, Московское шоссе, 17, офис 1201; тел.: +79277486871; ведущий специалист.

Budaev Denis Sergeevich – SEC “Network-centric platforms” Ltd; e-mail: budaev@smartsolutions-123.ru; 17, Moskovskoe shosse, of. 701, Samara, 443013, Russia; phone: +79270131151; lead programmer.

Voschuk Georgy Yurievich – e-mail: voschuk@smartsolutions-123.ru; phone: +79171482188.

Gusev Nikolay Aleksandrovich– e-mail: gusev@smartsolutions-123.ru; phone: +79297015582.

Mochalkin Alexander Nikolaevich – e-mail: mochalkin@smartsolutions-123.ru; phone: +79279006007; general director.

Majrov Igor' Vladimirovich – SEC “Smart Solutions” Ltd.; e-mail: imayorov@smartsolutions-123.ru; 17, Moskovskoe shosse, of. 1201, Samara, 443013, Russia; phone: +79277486871; leading specialist.