

# МУЛЬТИАГЕНТНАЯ СИСТЕМА СОГЛАСОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОЙ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Д.С. Будаев, Г.Ю. Вошук, Н.А. Гусев, А.Н. Мочалкин

ООО «НПК «Сетецентрические платформы»  
443013, Самара, ул. Московское шоссе, 17, офис 22-03, Россия  
info@network-centric.ru  
тел: +7 (846) 279-37-79

**Ключевые слова:** согласованное планирование, распределенное планирование, мультиагентные технологии, роевой интеллект, адаптивное планирование, беспилотные аппараты, сетецентрический подход.

## Abstract

This paper proposes approach to creating multi-agent systems for adaptive action planning of groups together-acting unmanned aircrafts vehicles for joint missions. The aim of current and future developments is the creation of complex scientific and technical solutions for the coordinated planning and actions management of UAV groups in real time.

## Введение

Применение классических методов поиска решений не всегда эффективно для решения сложных многофакторных задач, особенно в условиях высокой динамики событий, влияющих на результаты планирования и согласования отдельных планов распределенных устройств. Ярким примером такой задачи является задача управления объединенной группой беспилотных летательных аппаратов (БЛА).

БЛА сегодня активно применяются в различных отраслях экономики, часто они используются для решения критически важных задач, требующих реагирования в кратчайшие сроки. В числе подобных задач можно отметить использование БЛА аварийными и спасательными службами для поиска пострадавших и оперативного доступа к участкам местности, доступ человека к которым невозможен, опасен или затруднен; также к числу острых задач требующих оперативного решения можно отнести мониторинг и исследование состояния опасных и труднодоступных объектов, высотных сооружений, трубопроводов. Названные задачи успешно решаются с использованием БЛА, однако для обеспечения выполнения поставленных заданий в кратчайшие сроки и повышения качества работ целесообразно использовать совместно действующие объединенные (выполняющие общие задачи) группы устройств.

Следует, однако отметить недостаточную проработку инструментов планирования действий и управления в реальном времени группами БЛА. Большинство существующих программных решений предназначены для планирования и управления действиями автономных БЛА, действующих в одиночку. Механизмы планирования, контроля и управления действиями объединенной группы БЛА позволили бы наиболее эффективно использовать имеющиеся в распоряжении ресурсы (заряды аккумуляторов или запасы топлива, временные ресурсы, аппаратные вычислительные ресурсы БЛА и навесное оборудование) и, при необходимости, оперативно распределять поступающие в режиме реального времени новые задачи между отдельными аппаратами группы непосредственно в процессе выполнения заданий, что позволило бы выполнять поставленные задачи качественно и в кратчайшие сроки.

Для качественного управления распределением ресурсов необходимо использовать систему планирования реального времени, которые развиваются в следующих направлениях:

- методы традиционной оптимизации и 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 [1];
- жадные алгоритмы, основанные на эвристических бизнес-правилах конкретных предметных областей;
- методы искусственного интеллекта, использование нейронных сетей и нечеткой логики;
- метаэвристики (локальный поиск, Tabu Search, GRASP алгоритмы) [2];
- 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 [3];
- методы распределенного решения задач планирования ресурсов с применением мультиагентных технологий и рыночного подхода [4].

Стоит отметить, что большая часть систем планирования реального времени остается централизованной и детерминированной. В направлении централизованного планирования разрабатываются гибридные эвристические алгоритмы, объединяющие традиционные правила диспетчеризации с генетическими, нейро-сетевыми, роевыми и другими подходами [5].

Как показано в [6], наиболее перспективными и адекватными для проектирования алгоритмов решения задач распределения ресурсов представляются мультиагентные технологии, среди которых наибольшим 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 ресурсов, 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 логики выбора действий агента на основании его удовлетворенности и виртуальной прибыли в системе «торгов» за ресурсы.

Распределенный принцип принятия решений и поддержка процессов самоорганизации в системе приводит к тому, что мультиагентные системы управления ресурсами динамически устойчивы к внешним воздействиям, к неполноте и искажению поступающей информации.

В узкоспециализированной системе для каждого вида сущности может быть реализован программный агент с уникальным набором поведений. Так в задаче патрулирования лесного массива можно выделить несколько различных типов поведения для агента летательного аппарата: визуальное исследование с широким охватом местности, осмотр участка тепловизором, ретрансляция получаемых от удаленного аппарата данных оператору. Для патрулируемой местности могут быть задействованы агент квадрата патрулирования, агент объекта наблюдения (вплоть до моста, участка тропы или конкретного дерева). Таким образом, вся система может быть гибко настроена под конкретные задачи ее использования.

## **1 Постановка задачи управления действиями объединённых групп БЛА**

В рамках создания мультиагентной системы согласованного управления действиями объединённых групп БЛА рассматривается задача распределения работ между автономными беспилотными аппаратами, выполняющими совместный облет некоторой заданной территории. Отметим, что облет может быть однократным, а может быть многократным – в таком случае фактически ставится задача постоянного патрулирования (многократного облета) территории с целью поддержания определенного уровня осведомлённости («наблюдаемости») области.

Рассматривается постановка задачи, при которой имеются следующие входные данные:

- ограниченная в размере территория, задаваемая координатами граничных точек;

- информация о рельефе территории (карта высот), при этом информация может быть представлена в неполном объеме;
- заданное количество беспилотных аппаратов. Каждый аппарат может выполнять полет по заданной контрольными точками маршрута траектории в автономном режиме и может «согласовывать» свои действия с другими аппаратами группы путем отправки и приема информационных сообщений по беспроводным каналам связи;
- сведения о тактико-технических характеристиках аппаратов (диапазон доступных скоростей и высот, время зарядки батареи и др.).

## 2 Планирование порядка выполнения подзадач

Для распределения отдельных порций работы между отдельными группы БЛА вводится понятие квадрата наблюдения, размер которого определяется характеристиками БЛА и его навесного оборудования. Общее задание предварительно декомпозируется на некоторый набор элементарных подзадач, которые в свою очередь могут быть определенным образом логически связаны между собой, например, образуя некоторый маршрут БЛА.

С каждым квадратом связывается отметка времени выполнения подзадачи (факта последнего пролета БЛА в данном квадрате) в формате чч:мм:сс. Принимается, что отметка проставляется в момент пролета аппарата через центр квадрата (с учетом допустимости некоторой погрешности). При очередном пролете БЛА над квадратом территории отметка времени обновляется. Таким образом, для каждого квадрата наблюдения БЛА может отслеживать какое время квадрат находился без наблюдения, что актуально для миссии патрулирования.

Рассмотрим более детально постановку задачи и сценарий работы с разработанной версией системы на примере взаимодействия с пользователем.

Имеется некоторая территория, для которой необходима организовать наблюдение. Оператор через программный интерфейс пользователя отмечает точки, ограничивающие некоторую территорию, которую требуется наблюдать. Далее оператор тип миссии, например, однократный облет территории и задает состав группы БЛА. Таким образом, формируется задача группе БЛА, которая отправляется на каждый аппарат созданной группы БЛА.

После нажатия Оператором кнопки «Планировать» начинается процесс распределенного планирования и формируется общий план действий группы, состоящий из отдельных индивидуальных полетных заданий для аппаратов группы. В результате в модуль взаимодействия с оператором поступают выработанные полетные задания БЛА, которые в совокупности составляют общий план выполнения задачи<sup>1</sup>. После согласования с оператором плана выполнения задачи группировка готова к выполнению полетных заданий по нажатию кнопки «Выполнить».

В процессе выполнения задания оператор через модуль взаимодействия может остановить выполнение задания, вернуть на базу любой аппарат, изменить размер и конфигурацию заданных участков наблюдения, добавить или удалить область наблюдения, подключить к группировке новые аппараты. При изменении оператором указанных условий выполнения заданий полетный план должен быть обновлен, и предоставлен оператору через модуль взаимодействия.

Отметим, что все вышеописанные возможности системы управления уже алгоритмически и программным образом реализованы в стенде генерального конструктора системы управления группой БЛА, позволяющем моделировать различные типы миссий и сценарии группово-

<sup>1</sup> Под «полетным заданием» в рамках текущей постановки понимается программный объект, описывающий траекторию полета БЛА и набор действий при полете по маршруту. План выполнения поставленной задачи в рамках описываемой постановки называется «полетным планом», который содержит набор полетных заданий отдельных аппаратов группировки и полностью определяет действий по выполнению задачи.

го управления, в том числе для разнородных групп БЛА (см. рисунок 1). В текущей реализации системы управления реализованы два критерия планирования: критерий по наблюдаемости квадратов наблюдения и критерий по связи между БЛА [7].

Далее более подробно рассмотрим схему работы обновленного алгоритма согласованного распределенного планирования групповых задач БЛА.

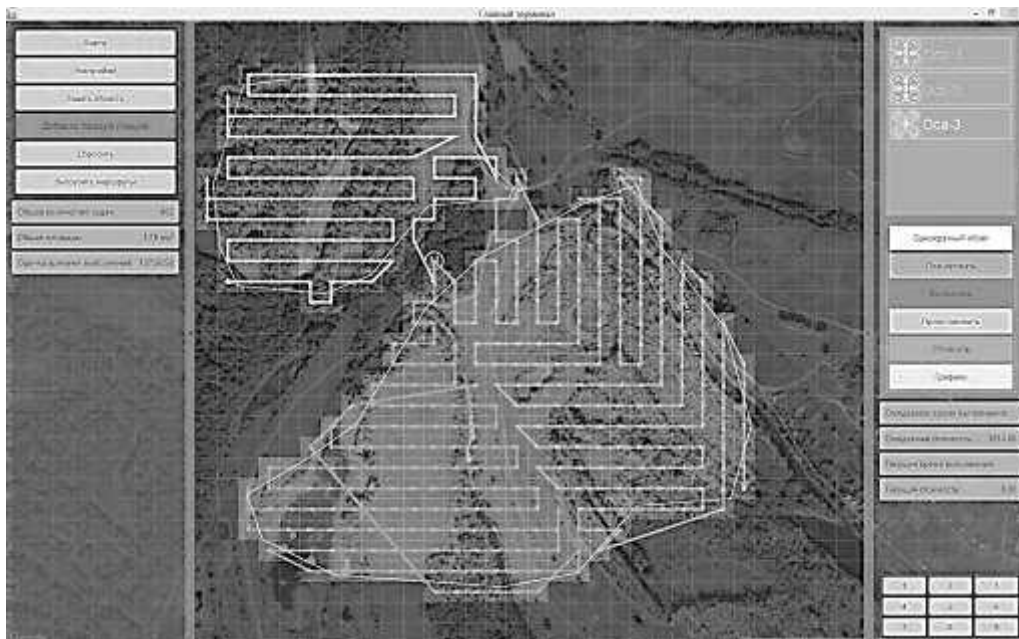


Рисунок 1 – Окно модуля взаимодействия с Оператором

Будем считать подзадачи (квадраты) далее неделимыми порциями работы ресурсов (БЛА). Планирование полетных заданий рассматривается как процесс назначения подзадач на ресурсы.

В момент постановки (формирования) задачи оператором все подзадачи (квадраты) становятся доступны планирования. Вся совокупность квадратов наблюдения передается механизму согласования областей ответственности БЛА. Данный механизм отвечает за начальное распределение отдельных областей территории по БЛА группы. Фактически механизм реализует кластеризацию совокупности квадратов наблюдения, в результате чего выделяется соответствующее количеству БЛА число кластеров.

После проведения начальной кластеризации каждый агент БЛА получает свою область, то есть некоторую совокупность квадратов наблюдения, в рамках которой агент должен построить маршрут и провести обследование данной области. Отметим, что в ходе выполнения отдельными БЛА своих задач данные области могут меняться, в том числе благодаря работе механизма балансировки нагрузки, позволяющей разгрузить менее производительные и медленные БЛА в пользу более быстрых БЛА. Цель механизма балансировки загрузки БЛА состоит в том, чтобы обеспечить завершение облета территории отдельными БЛА примерно к одному времени.

Процессом формирования маршрута (последовательности квадратов наблюдения) в рамках заданной области наблюдения занимается агент БЛА. Агент БЛА просматривает список доступных задач и оценивает альтернативные варианты выбора квадратов по заданным критериям планирования. Список критериев планирования должен определяться в первую очередь самым типом миссии. Так для миссии однократного облета были выбраны два критерия пла-

нирования – по расстоянию и по наблюдаемости квадрата наблюдения. При выборе очередного квадрата наблюдения у него квадрата проставляется новая отметка времени прогнозного времени пролета через квадрат наблюдения.

В процессе планирования 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 [8] 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 новые, смежные с текущим квадратом подзадачи, лежащие на одной линии с уже запланированными, и лишь при отсутствии подзадач, удовлетворяющих данным условиям, агентом рассматриваются другие варианты.

В ходе планирования и в процессе непосредственного выполнения заданий подзадачи могут перераспределяться между устройствами в зависимости загруженности их буферов (для обеспечения балансировки загрузки устройств. Предлагаемый подход позволяет в режиме реального времени производить распределение и балансировку подзадач и, в отличие от схожих способов формирования маршрута [8-11], изначально предназначен для группы совместно выполняющих задачу устройств, а получаемые с его помощью решения зависят от степени удовлетворенности агентов по нескольким одновременно существующим критериям.

### 3 Критерии удовлетворенности агентов

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

- 1) Критерий по наблюдаемости территории, зависящий от оценки наблюдаемости квадратов подзадач. Смысл критерия в том, чтобы в процессе планирования агенты аппаратов выбрали наиболее неисследованные за предыдущие интервалы времени квадраты наблюдения.
- 2) Критерий по суммарному расстоянию маршрута БЛА. Смысл критерия в том, чтобы выбирать на каждом шаге планирования такую совокупность квадратов наблюдения, лежащих на одной прямой, которая бы обеспечивала бы на заданное число шагов вперед максимальную утилизацию ресурса БЛА, то есть минимальное количество пролетов БЛА без «обслуживания» квадрата наблюдения.

Суммарная удовлетворенность системы на некотором шаге определяется как сумма удовлетворенностей всех агентов аппаратов по критерию наблюдаемости квадратов и критерию по расстоянию с учетом весов данных критериев (сумма весов равна 1):

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

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. Суммарная удовлетворенность системы на некотором шаге планирования определяется как сумма удовлетворенностей всех агентов аппаратов по всем текущим критериям с учетом весов данных критериев. Чем выше суммарный KPI системы, тем лучше качество решения, выбранного с учетом вышеописанных критериев.

Таким образом итоговой полетный будет представлять из себя совокупность вариантов всех аппаратов группировки (один утвержденный вариант из списка альтернативных для каждого), обеспечивающий максимальный показатель KPI системы в целом. При сравнении не-

скольких возможных вариантов полетных планов принимается тот вариант, КРІ которого больше оценок КРІ по другим планам.

### 3.1 Критерий планирования маршрута по наблюдаемости квадрата

Критерий удовлетворенности агента БЛА по наблюдаемости 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 рисунке 2 приведен вариант графика функции для расчета оценки наблюдаемости квадрата (значение в интервале от 0 до 1) от времени без наблюдения в секундах.

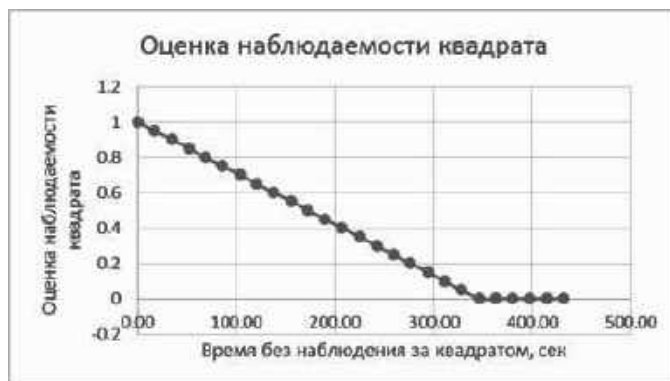


Рисунок 2 – График функции оценки наблюдаемости квадрата

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 возможно также в ходе работы системы (в процессе коллективного распределенного планирования), т.е. реализуется 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 наблюдаемости квадратов территории оценивается с помощью функции, показанной на рисунке 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 страда). Данный подход позволит лучшим образом определить наиболее желательный вектор движения аппарата. Вид и наклон функции может корректироваться, в том числе, в процессе планирования.

Отметим, что для типа миссии многократного пролета при различных значениях наблюдаемости квадратов данный критерий будет иметь важное значение, в то время как для однократного наблюдения более важен критерий по суммарному расстоянию маршрута.

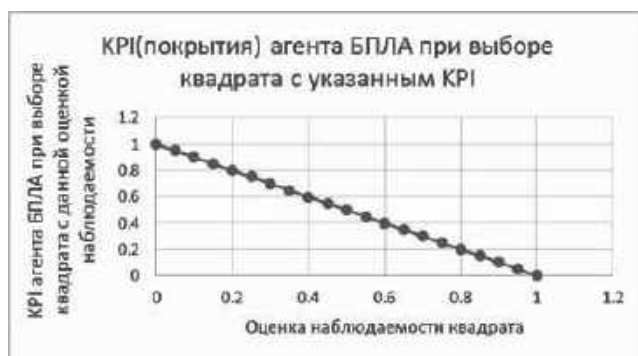


Рисунок 3 – График функции KPI агента аппарата

### 3.2 Критерий планирования маршрута по суммарному расстоянию маршрута

Критерий определяет удовлетворенность агента БЛА от альтернативных вариантов выбора квадратов наблюдения. Так, при планировании маршрута из базовой станции в рамках ограниченной области ответственности, состоящий из набора квадратов наблюдения, у агента БЛА есть несколько различных вариантов прокладки маршрута. Каждый вариант, состоящий из набора квадратов наблюдения, лежащих на одной прямой, можно оценить по данному критерию (допускается последовательности из одного квадрата наблюдения). Привлекательность набора квадратов для агента БЛА тем выше, чем выше значение отношения длины пути по рассматриваемым квадратам наблюдения к общей длине пути рассматриваемого варианта (см. рисунок 4), т.е.

$$\frac{\text{Длина пути по квадратам наблюдения}}{\text{Общая длина пути}} \rightarrow \max$$

Причем, стоит отметить, что можно оценивать как текущие альтернативные варианты и сравнивать их без учета дальнейших маршрутов, действия аналогично «жадному алгоритму». Однако в данной работе и реализации системы предлагается оценивать текущие альтернативные страды (квадраты по прямой) в совокупности с будущими страдами на несколько шагов вперед. То есть на текущем шаге планирования при выборе страды рассчитывается значение критерия для текущей страды и для заданного количества будущих страд заданного количества шагов алгоритма, которые станут доступны при выборе данной страды на текущем шаге. Таким образом, алгоритм позволит как бы вести некоторое окно расчета вперед на несколько страд, выбирая текущий набор квадратов не полностью «жадным» образом, а отслеживая возможную выгоду в будущем для каждого альтернативного варианта.

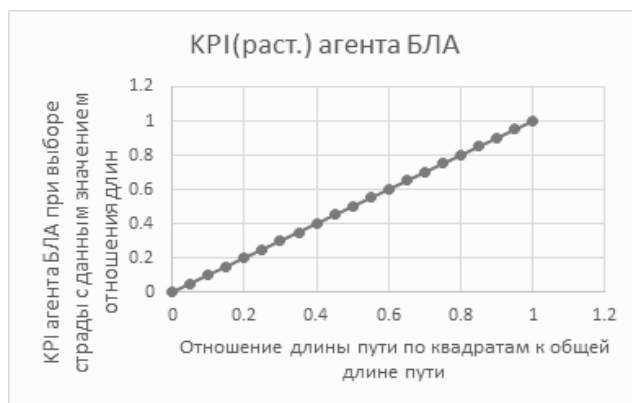


Рисунок 4 – График функции KPI агента БЛА по критерию расстояния

#### 4 Механизм балансировки по времени выполнения миссии

Механизм балансировки обеспечивает адаптивное перераспределение отдельных квадратов между БЛА группы с целью минимизировать разницу между временами окончания работ отдельными БЛА группы. Перераспределение подзадач-квадратов выполняется между двумя участвующими БЛА. В ходе выполнения подзадач БЛА обмениваются прогнозами времен завершения своих подзадач. Если БЛА определяется значительное различие между своим временем выполнения и времени выполнения соседнего БЛА (разница больше некоторого порогового значения) и прогнозируемое время выполнения подзадач соседним БЛА больше собственного, то агент БЛА рассчитывает, какое количество квадратов должно быть передано от соседнего БЛА, чтобы сократить общее время выполнения всего облета. Далее отправляется запрос на перераспределение указанного количества подзадач, после чего квадраты перераспределяются или агент БЛА получает отказ (например, по причине другой оценки времени выполнения своих квадратов соседним БЛА, если он смог уже передать часть квадратов другому БЛА). Таким образом, механизм адаптивной балансировки по времени выполнения обеспечивает выполнение групповой миссии за минимальное время в случае различной производительности БЛА и в условиях поступления незапланированных событий, например, ввода в группу новых БЛА.

#### 5 Результаты исследования работы системы

Для исследования работы системы была проведена серия экспериментов, в ходе которых на вход системе предоставлялись наборы данных, формирующие в совокупности начальные условия задания:

- координаты границ территории наблюдения;
- количество БЛА, для выполнения задания;
- размер квадрата наблюдения.

Целью исследований являлась оценка эффективности распределения подзадач по устройствам группы, оценка формируемых полетных планов БЛА, оценка времени на подготовку задания, исследование реакции системы на изменения задания в ходе планирования.

Рассмотрим подробнее работу системы при выполнении отдельных сценариев.

Для осуществления однократного наблюдения была задана территория, отдельные участки которой обладают разной степенью приоритета (рисунок 5), общее количество подзадач (квадратов наблюдения) было рассчитано исходя из технических характеристик оборудования БЛА (разрешающей способности видеокамер) и составило 746.



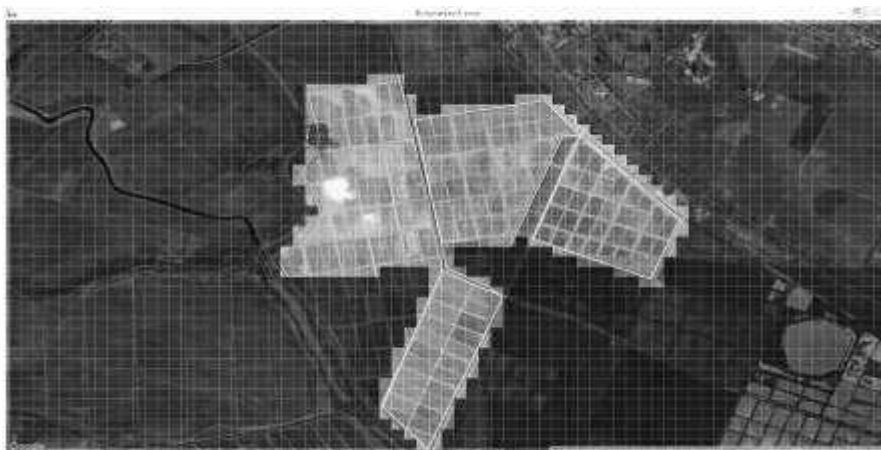


Рисунок 5 – Территория наблюдения площадью 12,73 км<sup>2</sup>, для выполнения задания

В ходе испытаний осуществлялось планирование как объединённых для групп, состоящих из различного количества устройств, так и для одиночного БЛА. Полученные данные о времени на выполнение задания представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты исследований системы

Показатель	Группа из 3 БЛА	Группа из 4 БЛА	Группа из 10 БЛА	Одиночный БЛА
Время на полное планирование миссии, секунд	62	50	21	165
Прогнозное время выполнения миссии, минут	404,23	304,23	145,33	1205,13
Время реакции на добавление области (время перераспределения подзадач между БЛА), секунд	9	15	13	6
Общий КРІ системы по окончании планирования, %	78	79	68	95

По результатам исследований можно сделать несколько выводов.

Во-первых, общие затраты времени на выполнение задания напрямую зависят от количества квадратов наблюдения в миссии и количества распределенных устройств БЛА, участвующих в процессе планирования. При одинаковом количестве квадратов наблюдения чем больше устройств участвует в планировании, тем быстрее система способна выдать план выполнения миссии всей группой. Это объясняется распределенным характером механизма планирования, который позволяет использовать ресурсы всех вычислительных устройств в процессе планирования, что сокращает конечное время получения общего плана. Планирование для одиночного БЛА может занимать большее время, чем планирование для группы устройств, поскольку все подзадачи должны быть последовательно оценены одним устройством.

Во-вторых, чем большее количество БЛА участвует в миссии, тем меньше времени требуется группе для выполнения всего задания. Это легко объясняется тем, что каждый БЛА действует в зоне своей ответственности и параллельно с другими БЛА группы, согласно планы работ выравнивая загрузку каждого БЛА с помощью механизма перераспределения подзадач, что сокращает суммарное время выполнения всей миссии.

В-третьих, время реакции системы на изменение обстановки тем меньше, чем меньше устройств участвуют в отработке данного изменения, поскольку для согласования изменений требуется проведение переговоров некоторого количества затронутых изменениями агентов.

Также стоит отметить, что общая эффективность работы системы характеризуется показателем общего КРІ, который в свою очередь определяется удовлетворенностью каждого агента БЛА. При этом в общем случае КРІ отдельно действующего аппарата с учетом отсутствия конкуренции за подзадачи будет выше, чем общий КРІ группы совместно действующих устройств, которые вынуждены в некотором смысле конкурировать и договариваться, идя на компромисс. Иначе говоря, показатель КРІ служит лишь сигналом о необходимости оптимизации плана в ходе работы системы и может сравниваться только для сходных по составу групп БЛА.

Используемые в системе методы мультиагентного планирования по сравнению с ранее отмеченными традиционными способами могут использоваться в децентрализованных системах в реальном времени. Их применение обеспечивает управление процессами планирования и выполнения заданий, они могут быть использованы для управления группами БЛА, состоящими из большого числа устройств и способны оперативно обрабатывать задачи большого объема.

### **Заключение**

Системы управления группами робототехнических средств, в том числе беспилотными летательными аппаратами, активно развиваются в настоящее время [12-15], 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. Для успешного использования таких подобных систем их функционал должен помимо планирования заданий позволять производить корректировку сформированных планов выполнения задач в изменяющихся условиях, в том числе реагировать на непредвиденные ситуации путем перераспределения подзадач между отдельными БЛА группы.

По мнению авторов, метод планирования групповых действий посредством взаимодействия самих аппаратов будет обладать важными преимуществами по сравнению с централизованным планированием. Так, мультиагентное планирование групповых действий может быть организовано на вычислительных модулях отдельных аппаратов. Данные модули реализованы на основе одноплатных компьютеров с возможностью сетевого взаимодействия между ними. Разработанная система позволяет планировать и корректировать по событиям согласованные действия БЛА группы посредством взаимодействия модулей и таким образом решать поставленные задачи вне зависимости от количества используемых ресурсов (состава группировки БЛА) и с учетом большого количества введенных в модель одновременно влияющих на эффективность работы критериев.

В число задач БЛА, наиболее востребованных рынком, входят:

- применение БПЛА в пожарных и спасательных работах;
- мониторинг и обследование территории с целью охраны и контроля;
- оценка индексов вегетативности растений для нужд сельского хозяйства;
- фото и видеосъемка подвижных объектов в сфере отдыха, туризма, развлечений.

При создании новых аппаратных комплексов предназначенных для решения групповых задач одним из наиболее продолжительных и затратных этапов является стадия разработки программных решений [16]. Универсальность и независимость от контекста задачи предлагаемых методов решения позволит сократить время на внедрение и снизить затраты на их создание за счет сокращения стадии разработки программных решений. Таким образом, в короткие сроки возможно проектирование и ввод в эксплуатацию основанных на использовании мульт-

тиагентных технологий планирования программно-аппаратных комплексов БЛА нового поколения, способных взаимодействовать и работать в группе и применимых для широкого спектра различных задач, разнообразных областей хозяйства и промышленности.

### Список литературы

- [1] Michael L. Pinedo *Scheduling: Theory, Algorithms, and System* – Springer. – 2008. – 673.
- [2] 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.
- [3] Binitha S, S Siva Sathya, A Survey of Bio inspired Optimization Algorithms, *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)* ISSN: 2231-2307, Volume-2, Issue-2, May 2012
- [4] P. Skobelev. *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.
- [5] Граничин О.Н. Поисковые алгоритмы стохастической аппроксимации с рандомизацией на входе // *Автоматика и телемеханика*, 2015, № 5. С. 43-59.
- [6] G.Rzevski, P.Skobelev. *Managing complexity.* WIT Press, 2014, 198 p.
- [7] Будаев Д.С., Вошук Г.Е., Гусев Н.А., Майоров И.В., Мочалкин А.Н. Согласованное управление группой БПЛА с применением мультиагентных технологий и сетецентрического подхода // *Материалы 8-й мультиконференции по проблемам управления МКПУ-2015, 28 сентября-3 октября 2015 г., Дивноморское, Геленджик, Россия. Т.3. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2015. – с. 1-1. ISBN 978-5-9275-1132-7.*
- [8] E. Santamaria, F. Segor, I. Tchouchenkov, and R. Schoenbein. Rapid aerial mapping with multiple heterogeneous unmanned vehicles. *International Journal On Advances in Systems and Measurements*, vol. 6, no. 3 and 4, pp. 384–393, 2013.
- [9] C. Di Franco, G. Buttazzo. Energy-Aware Coverage Path Planning of UAVs. *Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC), 2015 IEEE International Conference*, pp. 111-117
- [10] F. Kamrani *Using On-line Simulation in UAV Path Planning*, Licentiate Thesis in Electronics and Computer Systems, KTH, Stockholm, Sweden, 2007
- [11] Ergezer H., Leblebicioğlu K. 3D path planning for multiple UAVs for maximum information collection // *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. – 2014. – Т. 73. – №. 1-4. – С. 737-762
- [12] Амелин К.С., Граничин О.Н. Мультиагентное сетевое управление группой легких БПЛА. *Нейрокомпьютеры: разработка, применение*, 2011, № 6, стр. 64–72.
- [13] 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, pp. 237–245.
- [14] 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.
- [15] Koo T.J., Shahruz S.M. Formation of a group of unmanned aerial vehicles (UAVs). *American Control Conference (ACC)*, 2001, pp. 69–74.
- [16] Austin, Reg. *Unmanned aircraft systems UAVs design, development and deployment.* 1st ed. Wiley Aerospace Series, United Kingdom, 2010, pp. 221–226.

Published: Д.С. Будаев, Г.Ю. Вошук, Н.А. Гусев, А.Н. Мочалкин. Мультиагентная система согласованного управления группой беспилотных летательных аппаратов // *Труды XVIII Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах»*, Самара, 20-25 сентября 2016 г. – Самара: ОФОРТ, 2016. – С. 180-190.