

МОДЕЛЬ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ЗАДАЧИ РЕКОНФИГУРАЦИИ ГЕТЕРОГЕННОЙ ГРУППЫ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ОБЪЕКТОВ КИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ¹

**Подвесовский А. Г.^{2а,б}, Филонов А. А.^{3а}, Венец В. И.^{4а},
Настас Г. Н.^{5в}, Захарова А. А.^{6а}**

*(^а ФГБУН Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН, Москва; ^б ФГБОУ ВО
Брянский государственный технический университет,
Брянск; ^в ФГБУ «НИЦ «Институт имени
Н.Е. Жуковского», Москва)*

Управление взаимодействием объектов киберфизических систем в составе гетерогенной группы требует решения комплекса задач, среди которых можно выделить задачи управления конфигурацией группы, включающие формирование начальной конфигурации, оптимизацию пространственного расположения объектов, целераспределение, а также реконфигурацию группы. Актуальность задачи реконфигурации группы обусловлена важностью обеспечения и сохранения целостности группы в условиях сокращения возможностей, например, по причине выхода из строя отдельных членов группы. В статье рассматривается задача реконфигурации двухуровневой группы разнородных взаимодействующих объектов киберфизической системы на примере реконфигурации двухуровневой группы беспилотных летательных аппаратов, построенной по схеме «ведущий – подчиненный». Для данной задачи предлагается подход к построению модели принятия решений, основанный на сведениях к задаче о паросочетаниях по схеме «многие к одному». Описывается способ формализации предпочтений акторов и рассматривается алгоритм формирования оптимальной конфигурации, представляющий собой модифицированный алгоритм Гейла – Шепли для модели двустороннего матч-инга с динамической вещественной квотой. Обсуждаются результаты экспериментального исследования алгоритма и пути устранения выявленных в ходе исследования недостатков. В заключении дается общая характери-

¹ Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, проект 23-19-00342, <https://rscf.ru/project/23-19-00342/>

² Александр Георгиевич Подвесовский, к.т.н., доцент (apodv@tu-bryansk.ru).

³ Александр Андреевич Филонов, аспирант (afilonovcontact@gmail.com).

⁴ Владимир Иосифович Венец, к.ф.-м.н., с.н.с. (v.venets@mail.ru).

⁵ Геннадий Николаевич Настас, к.т.н. (nastasgn@nrczh.ru).

⁶ Алёна Александровна Захарова, д.т.н., доцент (zaa@ipr.ru).

стика возможных направлений дальнейшего развития предложенного подхода к построению модели принятия решений для задачи реконфигурации.

Ключевые слова: киберфизическая система, беспилотный летательный аппарат, управление группой беспилотных летательных аппаратов, реконфигурация, матчинг, алгоритм отложенного принятия предложения.

1. Введение

В настоящее время одним из актуальных направлений инженерии киберфизических систем (КФС) является повышение уровня их адаптивности и интеллектуальности, принимая во внимание тот факт, что современная КФС, как правило, включает в себя большое число взаимодействующих объектов, как полностью автономных, так и частично автоматизированных и управляемых операторами. Анализ ряда отечественных и зарубежных работ в области прикладных аспектов использования КФС различных типов, в частности, систем беспилотной авиации и мобильных робототехнических систем и комплексов [1, 6, 7, 10, 17, 19, 20], позволяет сделать вывод, что, помимо традиционной задачи расширения спектра функциональных возможностей КФС, в последние годы наблюдается повышенный интерес к таким задачам, как:

- групповое применение объектов КФС для взаимосвязанного решения сложных масштабных задач, в том числе использование гетерогенных групп, включающих в себя объекты, разнородные по типу и функциям;

- повышение автономности функционирования КФС путем уменьшения роли человека-оператора в управлении ее объектами при обеспечении эффективного выполнения стоящих перед системой задач. При этом в условиях группового взаимодействия объектов актуальность данной задачи не только сохраняется, но и увеличивается.

Переход к практике группового применения разнородных объектов КФС приводит к необходимости управления взаимодействием объектов в группе. Такое управление включает в себя распределение задач между членами группы с учетом ее целево-

го назначения, управление информационными потоками внутри группы, координацию взаимодействий между членами группы в процессе исполнения задач и др. [1, 10, 17, 23]. При этом среди требований к системе управления важное место занимает адаптивность, т.е. способность функционировать в условиях изменяющихся условий внешней среды.

Исследованию проблемы автономности КФС различных типов – от робототехнических комплексов до беспилотных транспортных средств – посвящено множество отечественных и зарубежных работ, например [10, 13, 14, 16, 17, 26]. Отмечается, что обеспечение и повышение автономности группы объектов КФС представляет собой более сложную задачу по сравнению с обеспечением автономности отдельного объекта. При этом в контексте обеспечения автономности группы объектов КФС значительную важность приобретает обеспечение и сохранение целостности группы, под которой понимается сохранение способности эффективно выполнять свои функции.

В статье предлагается подход к построению модели принятия решений для одной из задач обеспечения целостности группы разнородных объектов КФС: реконфигурации группы в условиях временного или постоянного сокращения или деградации ее возможностей, например, при выходе из строя отдельных ее компонентов. В качестве примера рассматривается задача реконфигурации двухуровневой группы беспилотных летательных аппаратов (БЛА), построенной по схеме «ведущий – подчиненные», при выходе из строя одного или нескольких ведущих объектов.

2. Предметная область и терминология

Описание предлагаемого подхода к построению модели принятия решений для задачи реконфигурации будем вести на примере КФС, представляющих собой группы совместно действующих беспилотных мобильных средств различного уровня автономности, создаваемые для выполнения некоторой целевой задачи или комплекса задач.

Объекты КФС, задействованные в решении целевой задачи, будем называть *актерами*. Примерами акторов в контексте рассматриваемой предметной области могут являться беспилотные мобильные средства различных типов (летательные аппараты, платформы и др.), объекты инфраструктуры (погрузчики, зарядные станции) и т.д.

Объединение задач, решаемых группой акторов, по некоторому целевому признаку будем называть *миссией*. Примерами миссий могут являться:

- транспортировка разнородных грузов в транспортной сети, содержащей источники и пункты назначения, с использованием группы БЛА, различающихся по летно-техническим характеристикам [3, 5, 25, 29];

- мониторинг и картографирование местности гетерогенной группой БЛА, в состав которой входят БЛА двух типов: ведущие, которые отвечают за сбор информации и взаимодействуют с другими ведущими БЛА с целью координации предусмотренных миссией задач, а также подчиненные, имеющие меньшую степень автономности и непосредственно задействованные в решении задач (например, выполнении аэрофотосъемки), получая назначения от ведущих БЛА и используя при этом информационно-коммуникационные, энергетические и другие типы ресурсов последних [22].

Каждая миссия характеризуется своей *структурой*, которая определяется типом и характером взаимосвязи решаемых задач и *набором параметров*, которые можно задавать при планировании миссии, а также при необходимости варьировать в процессе ее исполнения.

Для исполнения миссии формируется группа акторов, одной из основных характеристик которой является *конфигурация*. Формально конфигурацию группы можно задать в виде системы, содержащей:

- 1) набор множеств, который может включать в себя множество акторов, множество задач, множество объектов внешней среды, непосредственно связанных с миссией (например, маршруты, транспортируемые грузы, объекты мониторинга и др.);

2) набор отношений, которые могут быть определены на указанных множествах. Примерами таких отношений могут быть отношения «ведущий – подчиненные» на множестве акторов, распределение акторов по маршрутам, пространственное расположение акторов и т.д.

К задачам управления конфигурацией будем относить задачи формирования, мониторинга, оценки и корректировки конфигурации в соответствии с некоторым принципом оптимальности, отражающим эффективность решения комплекса задач, с которыми связана миссия. С формальной точки зрения такие задачи относятся к классу задач принятия решений.

3. Обзор задач управления конфигурацией группы взаимодействующих объектов киберфизических систем и подходов к их решению

Рассмотрим задачи, возникающие в процессе управления исполнением миссии группой взаимодействующих объектов КФС, которые можно отнести к классу задач *управления конфигурацией* группы. Для этого воспользуемся предложенным в работах [6, 7] способом разделения общего процесса управления исполнением миссии на фазы, где каждая фаза связана с необходимостью решения некоторой крупномасштабной задачи управления поведением группы. Отметим, что в указанных работах рассматривались задачи управления группой БЛА, однако предложенный способ несложно обобщить на случай управления групповым взаимодействием более широкого класса объектов КФС, указанного в разделе 2.

Таким образом, следуя [6, 7], можно выделить следующие фазы управления группой объектов КФС в процессе исполнения миссии:

- фаза 1: определение состава группы исходя из общей цели миссии;
- фаза 2: управление формированием группы в зоне исполнения миссии;
- фаза 3: мониторинг зоны ответственности;

- фаза 4: целераспределение, под которым понимается распределение между объектами группы конкретных задач, предусматриваемых планом миссии;
- фаза 5: целеуказание по результатам целераспределения с учетом пространственного расположения объектов группы, влияния внешней среды и других факторов;
- фаза 6: оценка результативности действий группы, а также текущего технического состояния входящих в нее объектов;
- фаза 7: реконфигурация группы, предполагающая возврат к фазе 3 уже в новых текущих условиях.

К классу задач управления конфигурацией группы могут быть отнесены следующие задачи.

1. Формирование начальной конфигурации. Данная задача возникает после определения состава группы на фазе 1. Она может включать в себя подзадачи определения иерархической структуры группы, выделения лидеров и/или подгрупп с учетом информации о задачах, предусматриваемых миссией. В этом случае объектом конфигурирования являются отношения «ведущий – подчиненный» на множестве акторов. К учитываемым факторам можно отнести текущий состав группы, функции акторов, априорную информацию о целях, требования к структуре групп и составу подгрупп.

2. Управление конфигурацией группы в зоне исполнения миссии. Задача возникает при входе группы в соответствующую зону и предполагает конфигурирование пространственного расположения объектов группы, исходя из их функциональных возможностей и технических характеристик. Здесь учитываются такие факторы, как текущий состав группы, технические характеристики и функции акторов, априорная информация о целях.

3. Управление функциями акторов. Данная задача также возникает при входе группы в зону выполнения миссии на фазе 2 в том случае, если группа включает в себя объекты, способные выполнять несколько различных функций. При этом допустимость их одновременного выполнения связана со спецификой конкретных объектов и условий их функционирования. В рамках данной задачи конфигурированию подвергаются от-

ношения «исполнитель – функция». Конфигурирование может выполняться совместно с конфигурированием пространственного распределения либо на основе его результатов. К учитываемым факторам можно отнести текущий состав группы, функции акторов, априорную информацию о целях.

4. Целераспределение. Задача возникает в рамках фазы 4 и связана с распределением задач между членами группы. Таким образом, конфигурируются отношения «исполнитель – задачах». Распределение осуществляется с учетом текущего состава группы, функции акторов, уточненной информации о миссии, текущего пространственного положения акторов.

5. Реконфигурация после исполнения миссии. Задача возникает на фазе 7 после окончания процесса выполнения объектами группы назначенных им задач. По итогам оценки технического состояния группы, выполненной на предыдущей фазе 6, может отказаться целесообразной повторная реконфигурация одновременно пространственного расположения, иерархической структуры и распределения объектов по исполняемым функциям с учетом всех факторов, от которых они могут зависеть.

6. Реконфигурация в процессе исполнения миссии. Данная задача может возникать на любой из фаз исполнения миссии в ситуациях, когда группа частично утрачивает свои возможности, например, вследствие потери соединения между отдельными объектами, выхода из строя объектов и т.д. В зависимости от конкретной ситуации может требоваться реконфигурация пространственного распределения или иерархической структуры группы с учетом ее текущего состава, функций акторов, текущего пространственного положения акторов.

Таким образом, задачи 5 и 6 представляют собой специальный тип задач управления конфигурацией – задачи реконфигурации, в которых требуется по тем или иным причинам изменить сформированную ранее конфигурацию. При этом целью решения задачи 6, связанной с изменением конфигурации в процессе исполнения миссии, как правило, является обеспечение и сохранение целостности группы в условиях временного или постоянного сокращения ее возможностей. В большинстве

случаев такая задача должна решаться в оперативном режиме, в условиях реального времени.

Далее рассмотрим некоторые существующие подходы к решению задач управления конфигурацией.

В работе [24] рассматривается задача управления гетерогенными группами робототехнических систем (РТС) в рамках парадигмы «роевого интеллекта». Это предполагает отказ от создания единой информационной среды в рамках группы, а сложное поведение всей системы достигается за счет создания набора простых правил взаимодействия каждого устройства с видимыми им соседями.

При этом в рамках данной работы гетерогенный рой рассматривается как совокупность двух минимально взаимодействующих гомогенных роев. Система включает в себя большое количество взаимозаменяемых аппаратов двух типов: подвижных наземных РТС и неподвижных воздушных РТС. РТС одного типа взаимодействуют между собой свободно, передавая сообщения по цепочке. Коммуникация с РТС другого типа осуществляется только при нахождении в непосредственной близости от них. Воздушные РТС управляют формированием и перемещением групп наземных РТС, передавая отдельным аппаратам сообщения о движении и остановке. При этом команды имеют вероятностную природу.

По мнению авторов [24], в контексте управления конфигурацией такой подход позволяет добиться значительной взаимозаменяемости не только отдельных РТС, но и их групп в целом. Кроме того, организованная на этих принципах система демонстрирует адаптируемость к изменению условий выполнения миссии, например параллельному исполнению нескольких задач или работе в условиях недостатка ресурсов. Кроме того, подход подразумевает значительную децентрализацию при небольшой сложности реализации. Направлением возможного применения подобных систем авторы называют автономное строительство.

Вместе с тем, как следует из описания, основным ограничением данного подхода является его ориентированность на случай малого разнообразия как типов акторов (при большой

численности акторов внутри каждого типа), так и выполняемых в рамках миссии задач.

Другой подход к решению задач управления конфигурацией группы (в первую очередь задач формирования и корректировки конфигурации), в большей степени учитывающий гетерогенность группы как по структуре, так и по задачам, основан на применении оптимизационных моделей распределительного типа, в том числе многокритериальных. Примером такой модели является известная еще с 1970-х гг. из работ О.И. Ларичева многокритериальная задача о назначениях (МЗН) [4, 8]. Данная модель описывает формирование множества пар объектов из двух непересекающихся групп на основании оценок предпочтительности объектов друг относительно друга по некоторому набору критериев. В качестве примеров задач, для которых применение данного подхода показало свою эффективность, можно привести распределение рабочих мест между сотрудниками организации [8], распределение рукописей между рецензентами [9]. Применительно к задачам управления конфигурацией КФС имеется пример применения данного подхода для выбора состава аппаратного обеспечения системы Интернет вещей [28].

Вместе с тем, подход на основе МЗН предполагает независимость оценок по критериям от акторов, участвующих в формировании конфигурации и/или ее корректировке. Иными словами, предпочтительность акторов одного множества для акторов другого множества (например, соответствие между ведущими и подчиненными акторами по выполняемым задачам) оценивается не самими акторами, а внешним по отношению к задаче распределения управляющим звеном. Данное обстоятельство обуславливает централизованный характер управления конфигурацией, что, в свою очередь, снижает степень автономности группы.

Для реализации децентрализованного подхода к управлению конфигурацией, называемого также сетевым [14], необходимо, чтобы функции принятия решений были распределены между самими акторами. Иными словами, формирование и оперативная корректировка конфигурации должны осуществ-

ляться бортовыми системами акторов, которые объединяются в единую сеть управления, включающую в себя также внешнюю систему управления, т.е. оператора. При этом в штатном режиме работы действия оператора сводятся главным образом к заданию миссии и постановке целевой задачи для группы, а также мониторингу и контролю за ходом ее выполнения.

Одним из возможных способов реализации указанного подхода является представление задачи управления конфигурации в виде модели двустороннего матчинга [26], основанной на решении задачи о паросочетаниях с применением алгоритма отложенного принятия предложения [18]. В рамках данной постановки в роли субъектов принятия решений выступают сами участники распределения, т.е. акторы, которые самостоятельно формируют свои предпочтения, используемые далее для формирования оптимального распределения. Под оптимальностью в данном случае подразумевается назначение распределяемому наилучшей альтернативы из достижимых для него, исходя из предпочтений других участников. При этом дополнительным важным свойством является устойчивость полученного распределения, т.е. невозможность его дальнейшего улучшения.

Таким образом ключевым отличием подхода на основе матчинга от подхода на основе МЗН является участие акторов в процессе формирования предпочтений, а также децентрализованный характер сбора предпочтений. За счет этого матчинг хорошо показывает себя в задачах, в рамках которых предпочтения формируются динамически в следствие изменения среды и их централизованный сбор и обработка невозможны или нецелесообразны, – например в задачах многоагентного управления [21, 22].

Далее рассмотрим реализацию подхода на основе двустороннего матчинга для реконфигурации двухуровневой группы БЛА, построенной по схеме «ведущий – подчиненные», при выходе из строя одного или нескольких ведущих БЛА.

4. Содержательное описание задачи реконфигурации

Будем далее рассматривать конфигурацию, задаваемую в виде отношения «ведущий – подчиненный» на множестве акторов. Содержательный смысл данного отношения состоит в том, что ведущий предоставляет подчиненному в распоряжение некоторые ресурсы и курирует процесс выполнения им некоторых задач. Предполагается, что каждому ведущему актору соответствует конечное множество подчиненных, ограниченное имеющимися у него ресурсами, а каждый подчиненный актер связан с единственным ведущим. Группы, сформированные в соответствии с этим принципом, будем называть двухуровневыми.

В качестве примера можно рассмотреть комплекс задач мониторинга и картографирования местности, для выполнения которого сформирована группа, состоящая из БЛА двух типов [22]:

- ведущие – крупные БЛА, обладающие значительными сетевыми и вычислительными ресурсами, большой дальностью и автономностью работы. Функционируя в роли ретрансляторов и вычислительных центров, они способны осуществлять оперативное управление действиями других БЛА;

- подчиненные – малые БЛА, оснащенные специализированным оборудованием и предназначенные для решения прикладных задач, таких как фото- и видеосъемка местности, транспортировка грузов, обслуживание каналов связи и др. Каждый такой БЛА способен решать конкретный набор задач, обусловленных оборудованием и конструкцией.

В процессе выполнения задач подчиненный БЛА использует ресурсы, предоставляемые ведущим БЛА. На рис. 1 показан пример конфигурации группового взаимодействия, в рамках которого подгруппа ведущих БЛА (n_1, n_2, \dots, n_5) координирует сбор информации, осуществляемый множеством подчиненных БЛА. Каждый такой БЛА подчиняется одному из ведущих, выполняя назначенные задачи и используя его сетевые ресурсы. Так, ведущий БЛА n_1 имеет в подчинении два БЛА, один из которых (m_2) занимается передачей сообщений, а другой (m_2)

осуществляет фотосъемку; ведущий БЛА n_2 имеет в подчинении три БЛА, один из которых (m_3) занимается фотосъемкой, а два других (m_4, m_5) – обслуживанием каналов связи, и т.д.

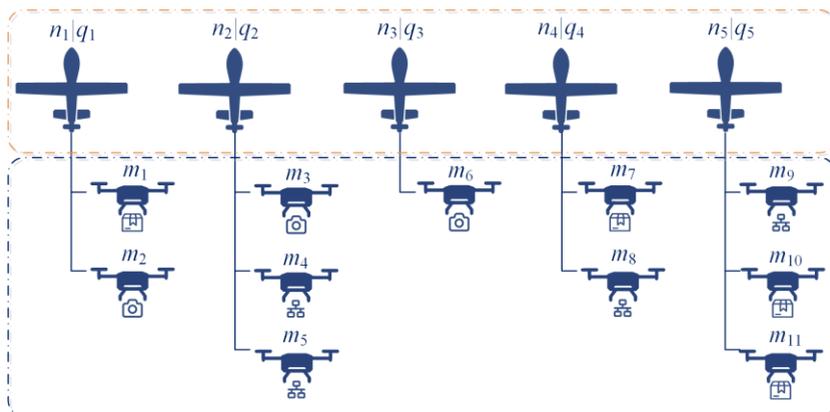


Рис. 1. Пример двухуровневого группового взаимодействия БЛА

Отметим, что описанный принцип формирования конфигурации сохраняется и для произвольной гетерогенной группы, содержащей беспилотные мобильные средства различных типов, а также объекты инфраструктуры.

Каждому ведущему актору n_j ставится в соответствие квота q_j , определяющая максимальный объем ресурсов, которые он может предоставить подчиненным акторам для выполнения назначенных им задач. В качестве примера можно привести предоставление подключения к беспроводной сети конечной пропускной способности, при этом количество подключенных устройств и выделяемая им ширина канала ограничены аппаратурой ведущего БЛА. Другими примерами могут являться предоставление портов станции зарядки аккумуляторов БЛА, а также выделение процессорного времени вычислительной системой для выполнения распределенных вычислений. В зависимости от физической природы распределяемого ресурса квота q_j может принимать целочисленные либо вещественные значения.

По характеру использования ресурсов задачи, выполняемые подчиненными акторами, можно разделить на две группы [22]:

– *задачи реального времени*, имеющие строгие требования к минимальному объему выделяемого ресурса. Примером может являться видеомониторинг в реальном времени с помощью БЛА, для реализации которого требуется выделение определенной ширины канала связи;

– *эластичные задачи*, не требующие выполнения в реальном времени. Производительность их выполнения пропорциональна выделяемым ресурсам. Примером такой задачи является передача большого массива данных фотосъемки от подчиненного БЛА к ведущему: чем шире предоставляемый канал, тем меньше времени она потребует. Требования акторов, выполняющих такие задачи, к объему выделяемых ресурсов допускается удовлетворять частично.

Возможны ситуации, когда некоторые ведущие акторы теряют свою работоспособность из-за погодных условий, нехватки электроэнергии или других факторов во время выполнения задачи. Это приводит к тому, что связанные с ними подчиненные акторы не могут получать сетевые ресурсы для выполнения своих задач. В подобных ситуациях возможны следующие способы обеспечения целостности группы:

- 1) реконфигурация группы при сохранении миссии;
- 2) изменение структуры и/или параметров миссии с целью адаптации к изменившимся возможностям группы;
- 3) некоторая комбинация указанных подходов.

В случае, если выполняется *реконфигурация группы*, подчиненные акторы получают доступ к другим ведущим акторам, сохранившим свою работоспособность. Так, в условиях рассмотренного выше примера, при выходе из строя ведущих БЛА n_1 и n_2 связанные с ними малые БЛА – m_1, m_2 (для n_1) и m_3, m_4, m_5 (для n_2) – теряют возможность получать коммуникационные ресурсы и взаимодействовать по выполнению задач, и в этой связи они должны перейти в подчинение к ведущим БЛА, сохранившим свою работоспособность, – n_3, n_4, n_5 . Отметим, что, помимо прочего, это может предполагать изменение расположения подчиненных БЛА относительно других в группе.

Возвращаясь к общей ситуации, будем называть подчиненного актора, утратившего связь с ведущим, *актором-*

кандидатом. При этом отметим, что выбор актором-кандидатом нового ведущего должен отвечать определенным требованиям рациональности. Такими требованиями могут быть:

- 1) соответствие по выполняемым задачам;
- 2) возможность ведущих акторов удовлетворить требования кандидатов к ресурсам;
- 3) минимизация «накладных расходов», связанных со сменой ведущего актора (например, расхода заряда аккумулятора на перемещение актора-кандидата в зону видимости нового ведущего актора).

5. Построение и исследование модели принятия решений

5.1. ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ РЕКОНФИГУРАЦИИ

Рассмотрим двухуровневую группу, содержащую в своем составе ведущих и подчиненных акторов, и ее состояние в некоторый момент времени. Обозначим $M = \{m_1, m_2, \dots, m_\mu\}$ – множество акторов, перешедших из статуса подчиненных в статус кандидатов, т.е. оставшихся без ведущих в результате выхода последних из строя; $N = \{n_1, n_2, \dots, n_\eta\}$ – множество ведущих акторов, сохранивших свою работоспособность. Для каждого ведущего актора $n_j \in N$ задано значение квоты q_j , определяющее максимальное число акторов-кандидатов, которых он может принять в подчинение с учетом объема имеющегося у него свободного ресурса. С другой стороны, для каждого подчиненного актора $m_i \in M$ известно пороговое значение $q(m_i)$, характеризующее объем ресурса, необходимый для выполнения возложенных на этого актора задач. Для задач реального времени данное значение будет представлять собой строгое ограничение снизу, для эластичных задач – нестрогое.

Обозначим $S \subseteq N \times M$ – отношение подчинения, представляющее собой бинарное отношение, такое что если существует пара $\langle n, m \rangle \in S$, то это означает, что подчиненный актер m назначен под управление ведущему n – ему предоставлена некоторая квота объема $q(m, n)$.

Таким образом, задача реконфигурации сводится к формированию отношения S , удовлетворяющего условиям рациональности, которые были на содержательном уровне описаны выше в разделе 4. Формально эти требования можно задать с помощью набора критериев

$$(1) C = \langle C_t, C_q, C_s \rangle,$$

который включает в себя:

1. $C_t(n, m)$ – критерий релевантности по задачам, под которым понимается степень соответствия актора-кандидата m задачам, курируемым ведущим актором n , и наоборот, $C_t(n, m)$ – критерий соответствия ведущего актора n задачам, выполняемым актором-кандидатом m ;

2. $C_q(n, m)$ – критерий предоставляемой квоты, определяет объем ресурса, выделяемого подчиненному актору m при подключении к ведущему актору n (например, это может быть ширина канала связи).

3. $C_s(n, m), C_s(m, n)$ – критерии накладных расходов соответственно актора кандидата m и ведущего актора n для установления соединения между ними. К накладным расходам могут, например, относиться затраты на перемещение актора-кандидата в зону видимости ведущего, либо на смену режимов трансляции сигнала у ведущего актора [21, 22].

В общем случае приведенные критерии могут иметь различную содержательную интерпретацию, зависящую от постановки задачи, условий выполняемой миссии и конструкции акторов. Также они могут различаться по приоритетам для подчиненных и ведущих акторов.

5.2. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЗАДАЧИ РЕКОНФИГУРАЦИИ В ВИДЕ ЗАДАЧИ О ПАРСОЧЕТАНИЯХ

Дальнейшая формализация основана на введении на множестве акторов отношений предпочтения.

Отношение предпочтения для актора-кандидата – бинарное отношение, допускающее следующую интерпретацию: $\langle n_1, m \rangle > \langle n_2, m \rangle$ тогда и только тогда, когда взаимодействие с ведущим актором n_1 более предпочтительно для актора m , чем взаимодействие с n_2 .

Отношение предпочтения для ведущего актора – бинарное отношение, допускающее следующую интерпретацию: $\langle n, m_1 \rangle \succ \langle n, m_2 \rangle$ тогда и только тогда, когда взаимодействие с актором-кандидатом m_1 более предпочтительно для ведущего актора n , чем взаимодействие с m_2 .

Один из возможных способов задания предпочтений актора может быть основан на лексикографическом порядке важности критериев [12]. Так, применительно к критериям из набора (1) лексикографический порядок для актора-кандидата может иметь вид:

$$(2) \quad C_q(m, n) \succ^L C_i(m, n) \succ^L C_s(m, n).$$

Это означает, что безусловным приоритетом для него будут пользоваться те ведущие акторы, которые обеспечивают требуемый объем квоты, и только при наличии нескольких таких акторов среди них будет выбраться тот, который имеет наибольшее значение показателя релевантности. Если же и таких акторов окажется более одного, то будет приниматься в учет наименее важный критерий, связанный с накладными расходами.

Тогда списком предпочтений подчиненного актора m будет являться множество $P_m \subseteq N$, элементы которого упорядочены по убыванию предпочтительности.

Аналогично можно задать предпочтения ведущего актора:

$$(3) \quad C_i(m, n) \succ^L C_s(m, n),$$

т.е. в первую очередь предпочтение отдается кандидатам, наиболее релевантным ведущему по задачам, а при равенстве данного показателя учитываются затраты на подключение. Соответствующим образом формируется список предпочтений ведущего актора $P_n \subseteq N$, элементы которого также упорядочиваются по убыванию предпочтительности.

Далее рассмотрим возможные формы задания критериев из набора (1).

Критерий релевантности по задачам может задаваться, исходя из следующих соображений. С точки зрения актора-кандидата m , релевантность ведущего актора n для него тем выше, чем меньшее количество типов задач он курирует в данный момент, поскольку в этом случае он может предоставить потенциально больший объем ресурса. Таким образом

$$(4) \quad C_t(m, n) = \begin{cases} \frac{1}{1 + |T_n|}, & \text{если } t \in T_n, \\ 0, & \text{если } t \notin T_n; \end{cases}$$

где T_n – подмножество задач, курируемых n ; $|T_n|$ – мощность данного множества.

В свою очередь, с точки зрения ведущего актора n , релевантность актора-кандидата m для него тем выше, чем большее число акторов, уже находящихся у него в подчинении, выполняют ту же задачу, что и m . Соответственно, можно положить

$$(5) \quad C_t(n, m) = \frac{K(n, m)}{K(n, m) + 1},$$

где $K(m, n)$ – количество акторов, находящихся в подчинении у n , которые выполняют ту же задачу, что и m .

Вернемся к рассмотренному ранее примеру с двухуровневой группой взаимодействующих БЛА. На рис. 2 показана ситуация, когда в результате выхода из строя двух других ведущих БЛА – n_1 и n_2 – связанные с ними малые БЛА – m_1, m_2 (для n_1) и m_3, m_4, m_5 (для n_2) – потеряли возможность получать коммуникационные ресурсы и взаимодействовать по выполнению задач. В этой связи они должны перейти в подчинение к работоспособным ведущим БЛА – n_3, n_4, n_5 .

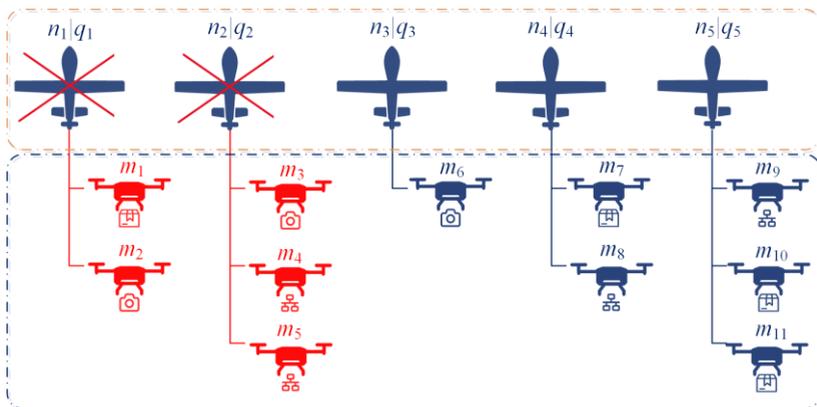


Рис. 2. Пример ситуации, порождающей необходимость реконфигурации

Вернемся к примеру конфигурации, показанному на рис. 1. Пусть в результате выхода из строя ведущих БЛА n_1 и n_2 связанные с ними малые БЛА m_1, \dots, m_5 должны перейти в подчинение к ведущим БЛА, сохранившим свою работоспособность – n_3, n_4, n_5 . В этом случае, используя формулы (4)–(5), получаем отношение релевантности, представленное в виде графа на рис. 3.

Значения в нижней части рис. 3 определяют степени предпочтительности соответствующей пары для актора-кандидата, значения в верхней части – степени предпочтительности для ведущего актора.

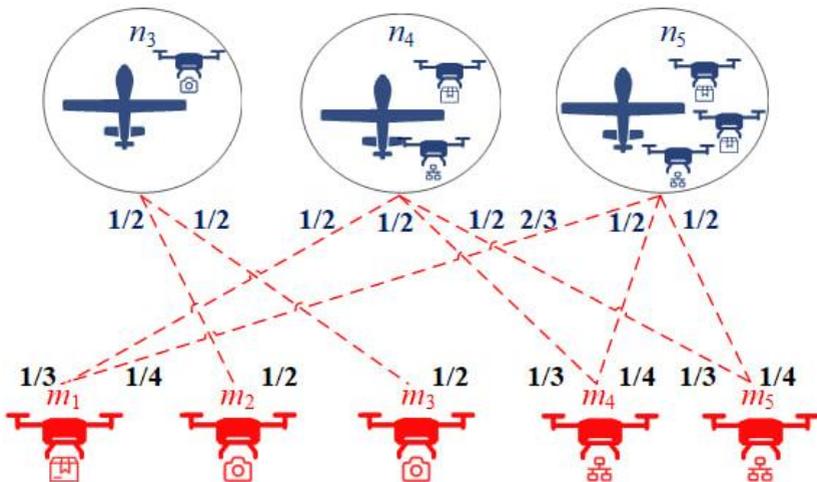


Рис. 3. Граф отношения релевантности для схемы на рис. 2

Возможный вариант задания критерия предоставляемой квоты C_q следующий. Пусть $q(m)$ – величина квоты, необходимая для выполнения подчиненным актором m задачи, назначенной ему в рамках определенной миссии. Будем считать, что вследствие пространственной удаленности акторов, часть сетевого ресурса, представляемого подчиненному актору, будет теряться вследствие помех и должна быть компенсирована выделением большего объема ресурса. С учетом этого обозначим через $w(m, n)$ эффективную квоту, под которой понимается

объем квоты, который должен выделяться подчиненному актору с учетом компенсации на дополнительные затраты сетевых ресурсов, связанные с установлением соединения с ведущим актором n :

$$(6) \quad w(m, n) = q(m) \cdot d(m, n) \cdot k_d,$$

где $d(m, n)$ – расстояние между акторами m и n ; k_d – некоторый коэффициент, обусловленный физической природой сетевого взаимодействия акторов (в рамках данной работы считаем, что он задается экспертным путем).

Ранее было приведено содержательное описание эластичных задач и задач реального времени. Определим функцию ценности для каждого из этих типов задач. Для задач реального времени функция ценности имеет вид:

$$(7) \quad u_{real-time}(m, n) = \begin{cases} 1, & \text{если } q(m, n) > w(m, n); \\ 0, & \text{если } q(m, n) < w(m, n), \end{cases}$$

где $q(m, n)$ – объем сетевого ресурса, который n может выделить для m ; $w(m, n)_{real-time}$ – некоторый минимальный порог эффективной квоты, связанный с конструкцией актора m и особенностями задачи, которую он выполняет.

Функция ценности для эластичных задач имеет вид

$$(8) \quad u_{elastic}(m, n) = \frac{q(m, n)}{w(m, n)_{elastic}},$$

где $q(m, n)$ – объем сетевого ресурса, который n может выделить для m ; $w(m, n)_{elastic}$ – минимальный порог эффективной квоты, связанный с конструкцией m и особенностями выполняемой им задачи.

Соответственно, критерий эффективной квоты может быть задан в виде

$$(9) \quad C_q(m, n) = \begin{cases} u_{elastic}(m, n), & t - \text{эластичная задача}; \\ u_{real-time}(m, n), & t - \text{задача реального времени}. \end{cases}$$

Способ задания критерия накладных расходов C_s для ведущих акторов и акторов-кандидатов зависит от того, какими показателями определяются соответствующие накладные расходы. Был предложен подход к заданию и оценке данного критерия на

примере оценки расхода заряда аккумулятора при перелете в зону действия ведущего актора. Для оценки величины расхода заряда использовалась известная из литературы аналитическая зависимость, которая уточнялась на основе обучающего набора данных о полетах с использованием методов интеллектуального анализа данных. Подробное описание данного подхода выходит за рамки данной статьи, его можно найти в работе [10].

5.3. АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

Алгоритм формирования оптимальной конфигурации является адаптированной версией алгоритма, описанного в [22], который, в свою очередь, основан на классическом алгоритме Гейла – Шепли для случая «многие к одному» [18]. Классический алгоритм использует целочисленную статическую квоту, которая, в терминологии рассматриваемой задачи, определяет максимальное количество акторов-кандидатов, которые могут быть назначены в подчинение ведущему актору (для каждого ведущего актора значение квоты может быть своим).

В рассматриваемой же ситуации речь идет о распределении некоторого ресурса, т.е. каждому актору-кандидату при распределении выделяется вещественный по своей природе объем разделяемого ресурса. При этом данный объем зависит от запросов всех акторов-кандидатов, находящихся в списке ожидания у ведущего актора на соответствующей итерации, в связи с чем процесс распределения является динамическим.

Кандидат, подающий заявку, сравнивается с наихудшим из уже назначенных ведущему подчиненных. При этом выполняется сравнение кандидатов не только по предпочтительности, но и по требуемой квоте. Если рассматриваемый актор-кандидат более предпочтителен, чем наименее предпочтительный имеющийся, и последнему выделен больший объем квоты, чем минимально необходимо кандидату, то излишек квоты предоставляется указанному актору-кандидату. После этого наименее предпочтительный подчиненный актор пересматривает свои предпочтения с учетом новой квоты. Иначе либо из сети исключается наименее предпочтительный подчиненный актор, либо

отклоняется заявка актора-кандидата. Процесс повторяется, пока есть подчиненные акторы, чье назначение можно улучшить. Алгоритм представлен в виде листинга 1.

Листинг 1. Алгоритм формирования конфигурации

```

1: Input: вводим данные необходимые для вычисления списков
    предпочтений
2: Стадия 1: формируем списки предпочтений акторов
3: Формируем списки предпочтений акторов-кандидатов
4: Формируем списки предпочтений ведущих акторов
5: Стадия 2: матчинг
6: Каждый кандидат  $m$  подает заявку на назначения наиболее
    предпочтительному ведущему актору  $n$  из списка своих предпо-
    чтений.
7: loop:
8:     Каждый ведущий  $n$  принимает заявки от кандидатов  $m$ 
    в соответствии со своими предпочтениями
9:     If оставшаяся квота  $q$  ведущего актора  $n$  со списком
    уже имеющихся у него в подчинении аторов  $M_n$  меньше
    требования актора-кандидата  $m$ , то:
10:         
$$w(m,n) = q_n - \sum_{i \in M_n} q_{n,i}$$

11:     end if
12:     If оставшихся ресурсов  $n$  недостаточно чтобы удовле-
13:     творить заявку кандидата  $m$ , то последний обновляет
    свой список предпочтений
14: end if
15:     If актор  $m$  подал заявку на
    назначение к  $n$  квота которого
    уже распределена без остатка
    then
16:         Обозначим актора в  $M_n$ 
    с наименьшей предпочтитель-
    ностью через  $m'$ 
17:         If  $m > m'$  then
18:             If  $w(m', n) > w(m, n)$  then
19:                  $n$  принимает заявку  $m$  и выделяет ему
    квоту объемом  $w(m, n)$ 
20:                 квота, которую  $n$  выделял  $m'$  уменьшается на
    величину  $w(m, n)$  т.е.  $w(m', n) = w(m', n) - w(m, n)$ ,  $m'$ 
    так же обновляет свой список предпочтений
21:             else
22:                  $n$  принимает заявку  $m$  и выделяет ему квоту
    объемом  $w(m', n)$ 
29:     end if

```

Листинг 1. Алгоритм формирования конфигурации (окончание)

```
30:           If актер m перебрал всех возможных n  
           в списке своих предпочтений, then  
31:             m идет на повторный круг обхода  
32:           end if  
33:           Каждый подчиненный актер которому были назначены  
           недостаточные сетевые ресурсы подает заявку следующему  
           ведущему актору в своем списке предпочтений.  
           Если лучшей опции нет, он остается у текущего  
           назначенного ведущего, иначе он переназначается  
           к новому ведущему.  
34:           Цикл прерывается, если не осталось подчиненных ак-  
           торов, которые способны получить ведущего, более  
           предпочтительного чем назначенный им  
35: end loop
```

5.4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА

Экспериментальное исследование алгоритма выполнялось для набора тестовых задач реконфигурации группы. В качестве примера рассмотрим одну из таких задач. Пусть требуется реконфигурация группы, представленной на рис. 1, при выходе из строя ведущих акторов n_1, n_2 , что ведет к необходимости перераспределения акторов m_1, \dots, m_5 . Пусть заданы следующие пороговые величины квоты:

- фотосъемка местности – строгий порог квоты, равный 2;
- доставка сообщений – нестрогий порог квоты, равный 4;
- обслуживание каналов связи – нестрогий порог квоты, равный 5.

Иллюстрация работы алгоритма представлена на рис. 4. Опишем основные его шаги.

Шаг 0. Формируются начальные списки предпочтений акторов. Пусть возможности ведущих акторов по предоставлению квоты с учетом акторов, уже имеющих у них в подчинении, заданы следующим образом:

$$n_3:(5/7); n_4:(7/16); n_5:(1/14),$$

где первое число обозначает свободную квоту, а второе – ее общий лимит. Тогда начальная конфигурация группы имеет следующий вид:

$$n_3 [5/7]: \{m_6\}; n_4 [7/16]: \{m_7, m_8\}; n_5 [1/14]: \{m_9, m_{10}, m_{11}\}.$$

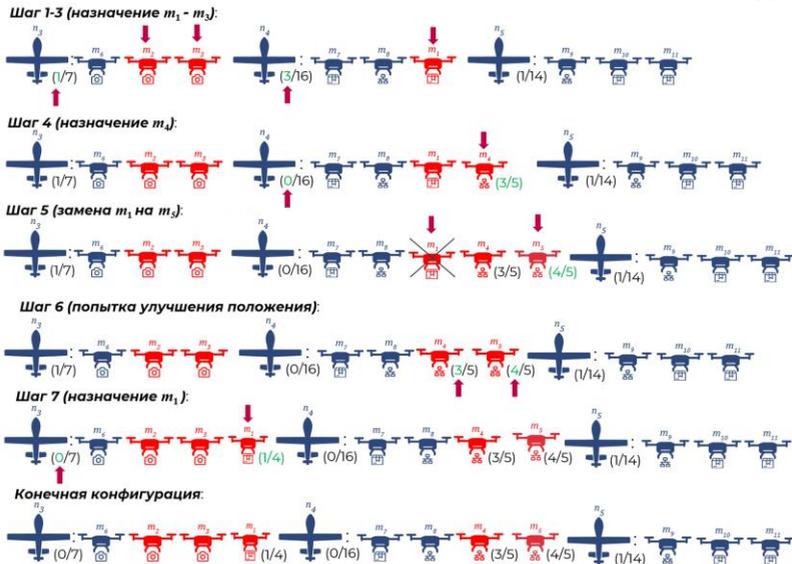


Рис. 4. Иллюстрация работы алгоритма реконфигурации

Пусть накладные расходы акторов-кандидатов были ранее вычислены и нормированы на шкалу от 0 до 1, где 1 означает минимальный расход, а 0 – максимальный, т.е. более предпочтительными являются большие значения. Остальные критерии возможно вычислить по формулам (4)–(5). С учетом этого значения критериев акторов-кандидатов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Начальные оценки критериев акторов-кандидатов

Актор-кандидат	Ведущий актер								
	n_3			n_4			n_5		
	C_q	C_l	C_s	C_q	C_l	C_s	C_q	C_l	C_s
m_1	1,25	0,5	0,75	1,75	0,33	0,88	0,25	0,25	0,60
m_2	1	0,5	0	1	0,33	0,84	0	0,25	0,63
m_3	1	0,5	0,23	1	0,33	0,88	0	0,25	0,38
m_4	1	0,5	0,25	1,4	0,33	0,81	0,2	0,25	0,63
m_5	1	0,5	0,25	1,4	0,33	0,88	0,2	0,25	0,50

Тогда начальные предпочтения акторов-кандидатов имеют вид:

$$m_1: n_4 > n_3 > n_5;$$

$$m_2: n_3 > n_4 > n_5;$$

$$m_3: n_3 > n_4 > n_5;$$

$$m_4: n_4 > n_3 > n_5;$$

$$m_5: n_4 > n_3 > n_5.$$

Аналогично оценки по критериям для ведущих акторов представлены в таблице 2.

Таблица 2. Начальные оценки критериев ведущих акторов

Ведущий актор	Актор-кандидат									
	m_1		m_2		m_3		m_4		m_5	
	C_q	C_t	C_s	C_q	C_t	C_s	C_q	C_t	C_s	C_q
n_3	0,0	0,5	0,5	1,0	0,5	0,9	0,0	0,1	0,0	0,0
n_4	0,5	0,5	0,0	0,1	0,0	0,0	0,5	1,0	0,5	0,9
n_5	0,7	0,7	0,0	0,1	0,0	0,0	0,5	0,6	0,5	0,5

Соответственно предпочтения ведущих акторов имеют вид:

$$n_3: m_2 > m_3 > m_1 > m_4 > m_5;$$

$$n_4: m_4 > m_5 > m_1 > m_2 > m_3;$$

$$n_5: m_1 > m_4 > m_5 > m_2 > m_3.$$

Наконец, в конце подготовительного шага акторы-кандидаты подают заявки в соответствии со своими предпочтениями. Заявки будут рассматриваться в порядке возрастания номеров акторов.

Шаг 1. Ведущий n_4 предварительно принимает заявку кандидата m_4 . Так как требуемая последнему квота $q(m_1)$ равна 4, а объем нераспределенной квоты актора $w(m_1, n_4)$ равен 7, то дальнейших действий не предпринимается. Тогда после назначения оставшаяся квота равна 3. Таким образом, на конец шага назначения имеют следующий вид:

$$n_3 [5/7]: \{m_6\};$$

$$n_4 [3/16]: \{m_7, m_8, m_{11}\};$$

$$n_5 [1/14]: \{m_9, m_{10}, m_{11}\}.$$

Шаги 2 и 3 выполняются аналогично. Назначения будут иметь вид:

n_3 [1/7]: $\{m_6, m_2, m_3\}$;

n_4 [3/16]: $\{m_7, m_8, m_1\}$;

n_5 [1/14]: $\{m_9, m_{10}, m_{11}\}$.

Шаг 4. Ведущий актер n_4 предварительно принимает заявку кандидата m_4 . Требуемый порог квоты $w(m_4, n_4)$ является нестрогим и равен 5. Он не может быть удовлетворен в полной мере, так как доступная квота $q(n_4)$ равна 3. В соответствии с алгоритмом, кандидат m_4 обновляет свои предпочтения с учетом текущих квот ведущих акторов. Новые значения оценок по критериям представлены в таблице 3.

Таблица 3. Предпочтения кандидата m_4 на шаге 4

Актер-кандидат	Ведущий актер								
	n_3			n_4			n_5		
	C_q	C_t	C_s	C_q	C_t	C_s	C_q	C_t	C_s
m_4	0,2	0,25	0,25	0,6	0,25	0,81	0,2	0,25	0,63

Соответственно его предпочтения имеют вид:

m_4 : $n_4 > n_3 > n_5$.

Хотя значение квоты и меньше порогового, n_4 остается для m_4 наиболее предпочтительным, а в соответствии с исходным предположением задача допускает назначение с неполным соблюдением порога. Таким образом, назначения на конец шага имеют вид:

n_3 [1/7]: $\{m_6, m_2, m_3\}$;

n_4 [3/16]: $\{m_7, m_8, m_1, m_4(3/5)\}$;

n_5 [1/14]: $\{m_9, m_{10}, m_{11}\}$.

Шаг 5. Ведущий n_4 предварительно принимает заявку кандидата m_5 . Все ресурсы n_4 уже распределены, поэтому выполняется сравнение m_5 с наименее предпочтительным для n_4 подчиненным, каковым является m_1 . Требуемый ему порог квоты $q(m_1)$, равный 4, не превышает требуемый m_5 порог $w(m_5, n_4)$, равный 5. В связи с этим n_4 выделяет кандидату m_5 объем квоты, равный 4, который ранее занимал m_1 ; m_5 обновляет свои предпочтения с учетом выделенной ему квоты; m_1 удаляется из сети ведущего актора n_4 и обновляет свои предпочтения. Новые значения оценок по критериям представлены в таблице 4.

Таблица 4. Предпочтения кандидатов m_1 и m_5 на шаге 5

Актор-кандидат	Ведущий актер								
	n_3			n_4			n_5		
	C_q	C_t	C_s	C_q	C_t	C_s	C_q	C_t	C_s
0,2	0,25	0,25	0,6	0,20	0,81	0,2	0,25	0,63	0,2
0,25	0,25	0,75	0	0,20	0,88	0,25	0,25	0,60	0,25

Тогда новые предпочтения акторов m_5 и m_1 имеют вид:

$$m_5: n_4 > n_3 > n_5;$$

$$m_1: n_3 > n_5 > n_4.$$

Таким образом, назначения на конец шага имеют вид:

$$n_3 [1/7]: \{m_6, m_2, m_3\};$$

$$n_4 [0/16]: \{m_7, m_8, m_4(3/5), m_5(4/5)\};$$

$$n_5 [1/14]: \{m_9, m_{10}, m_{11}\}.$$

Шаг 6. В конце итерации происходит пересчет предпочтений акторов, которые получили квоту, меньшую чем их порог – к ним относятся m_4 и m_5 . Значения критериев для них представлены в таблице 5:

Таблица 5. Предпочтения кандидатов m_1 и m_5 на шаге 6

Актор-кандидат	Ведущий актер								
	n_3			n_4			n_5		
	C_q	C_t	C_s	C_q	C_t	C_s	C_q	C_t	C_s
m_4	0,2	0,25	0,25	0,6	0,20	0,81	0,2	0,25	0,63
m_5	0,2	0,25	0,25	0,8	0,20	0,88	0,2	0,25	0,50

Соответственно, их предпочтения имеют вид:

$$m_4: n_4 > n_3 > n_5;$$

$$m_5: n_4 > n_3 > n_5.$$

При этом n_4 остается наиболее предпочтительным ведущим, поэтому подчиненные акторы m_4 и m_5 не могут улучшить свое положение, перейдя к другому актору. Перераспределения квот между подчиненными одного ведущего актора алгоритм не предусматривает. Таким образом, окончательные назначения на конец итерации имеют вид:

$$n_3 [1/7]: \{m_6, m_2, m_3\};$$

$$n_4 [0/16]: \{m_7, m_8, m_4(3/5), m_5(4/5)\};$$

$$n_5 [1/14]: \{m_9, m_{10}, m_{11}\}.$$

Шаг 7. Поскольку все еще имеются нераспределенные акторы-кандидаты, начинается новая итерация. По итогам первой итерации актер-кандидат m_1 остался не распределенным, поэтому он подает заявку повторно. В соответствии с его предпочтениями (шаг 5), наиболее предпочтительным для m_1 является ведущий актер n_3 . Тот предварительно принимает его заявку, но может предложить только нераспределенную квоту $w(m_1, n_3)$, равную 1. Соответственно, m_1 обновляет свои предпочтения, оценки критериям представлены в таблице 6.

Таблица 6. Предпочтения кандидата m_1 на шаге 7

Актер-кандидат	Ведущий актер								
	n_3			n_4			n_5		
	C_q	C_t	C_s	C_q	C_t	C_s	C_q	C_t	C_s
m_1	0,25	0,25	0,75	0	0,20	0,88	0,25	0,25	0,60

Соответственно его предпочтения имеют вид:

$$m_1: n_3 > n_5 > n_4.$$

Поскольку существенных изменений не произошло, заявка актера-кандидата m_1 ведущим актером n_3 принимается. Таким образом, окончательные назначения имеют вид:

$$n_3 [0/7]: \{m_6, m_2, m_3, m_1(1/4)\};$$

$$n_4 [0/16]: \{m_7, m_8, m_4(3/5), m_5(4/5)\};$$

$$n_5 [1/14]: \{m_9, m_{10}, m_{11}\}.$$

5.5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Одним из наблюдаемых свойств алгоритма является достаточно выраженная зависимость результатов распределения квоты ведущих акторов от порядка подачи заявок актерами-кандидатами с эластичными задачами, имеющими нестрогий порог квоты. В связи с этим возможно получение распределения, которое не соответствует предпочтениям участников.

Так, на шаге 6 акторы-кандидаты m_4 и m_5 пытаются улучшить свой результат путем смены ведущего актора. Поскольку n_4 уже является наиболее предпочтительным, это оказывается невозможным. С другой стороны, в соответствии с предпочте-

ниями ведущего актора n_4 кандидат m_4 более предпочтителен для него, чем m_5 . Однако, поскольку кандидат m_5 удовлетворил свой запрос по квоте, заместив собой m_1 , ему были предоставлен больший объем ресурса, чем m_1 , который изначально являлся более предпочтительным для n_4 . Решением могло бы быть изменение условий шага 33 алгоритма (см. листинг 1), если допустить, что акторы-кандидаты при улучшении своих назначений могут не только подавать заявки к другим ведущим, но и повторно подать заявку к текущему ведущему так, чтобы ресурсы ведущего перераспределились между подчиненными в соответствии с его предпочтениями. Тогда на шаге 6 примера вместо результата n_4 [0]: $\{m_7, m_8, m_4 [3/5], m_5 [4/5]\}$ был бы получен результат вида n_4 [0]: $\{m_7, m_8, m_4 [5/5], m_5 [2/5]\}$, который более точно отражает предпочтения n_4 .

Рассмотренная ситуация дает повод сформулировать более общий вопрос: хотя рассмотренный алгоритм достигает полного распределения ресурсов ведущих акторов, можно ли считать такое распределение справедливым? Например, если для ведущего актора n_4 различие по предпочтительности акторов-кандидатов m_4 и m_5 достаточно велико, то выделение соответственно 5 и 2 единиц квоты может быть оправданным. Однако при небольшом различии по предпочтительности более оправданным могли бы быть иные сочетания, вплоть до равного распределения квоты, т.е. по 3,5 единиц. Тем самым представляется целесообразным учет степени предпочтительности кандидатов при выделении квоты. Одним из возможных решений здесь может являться переход к нечеткой модели предпочтений.

Отмеченные пути совершенствования алгоритма составляют предмет дальнейших исследований.

6. Заключение

В работе рассмотрена задача реконфигурации группы взаимодействующих разнородных объектов киберфизической системы на примере двухуровневой группы БЛА различных типов, организованной по схеме «ведущий – подчиненные», в рамках которой подчиненные БЛА отвечают за выполнение

задач в рамках миссии, а ведущие курируют выполнение задач, предоставляя подчиненным сетевые ресурсы для этого. Представлен способ сведения данной задачи к задаче о паросочетаниях по схеме «многие к одному», для которой разработана модель предпочтений, и исследован алгоритм нахождения оптимальной конфигурации, в основе которого лежит модель двустороннего матчинга по схеме «многие к одному» с вещественной квотой и модифицированный алгоритм Гейла – Шепли.

Экспериментальное исследование указанного алгоритма на наборе тестовых задач позволило выявить некоторые присущие ему недостатки и в соответствии с этим определить пути его совершенствования, что может рассматриваться как одно из актуальных направлений дальнейшего развития модели принятия решений.

В дополнение к этому можно указать следующие направления развития и совершенствования модели.

Если допустить, что подчиненные акторы способны выполнять не один, а несколько типов задач (например, могут перенастраиваться с одной задачи на другую), то способ оценки релевантности по задачам усложняется и возникает необходимость использования метрик сравнения множеств. Простейшей такой метрикой является индекс Жаккара, используемый для оценки степени совпадения множеств, однако она не является единственно применимой; выбор конкретной метрики определяется содержательным смыслом, вкладываемым в понятие релевантности. Таким образом, в этом случае возникает задача формализации различных представлений релевантности. Дополнительный интерес может представлять ситуация, когда для разных акторов задачи различаются по приоритетности и это различие должно учитываться при оценке релевантности. В этом случае от традиционных метрик для сравнения множеств можно перейти к нечетким [2].

В качестве еще одного направления исследований можно указать переход от одноступенчатой схемы матчинга к двухступенчатой [15]. Например, для задачи группового взаимодействия БЛА необходимость такого перехода возникает в тех случаях, когда обмен данными между ведущими и малыми БЛА

может быть реализован с использованием различных сетевых протоколов или разных режимов приема и передачи сигналов. В этой ситуации возможно формировать распределение по схеме «ведущий БЛА – сетевые протоколы (режимы приема/передачи) – малые БЛА».

Другой пример задачи, требующей использования двухступенчатой схемы матчинга, – организация взаимодействия объектов в масштабных гетерогенных группах, когда использование двухуровневой системы взаимодействия оказывается недостаточным и требуется введение трехуровневой системы, например, «центры управления – ведущие объекты – малые объекты».

Литература

1. ДОВГАЛЬ В.А., ДОВГАЛЬ Д.В. *Анализ систем коммуникационного взаимодействия дронов, выполняющих поисковую миссию в составе группы* // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. – 2020. – №4(271). – С. 87–94.
2. ДЮБУА Д., ПРАД А. *Общий подход к определению индексов сравнения в теории нечетких множеств* // Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения / Под ред. Р.Р. Ягера. – М.: Радио и связь, 1986. – С. 9–21.
3. ЗАХАРОВА А.А., КУТАХОВ В.П., МЕЩЕРЯКОВ Р.В. и др. *Моделирование задач транспортировки грузов в беспилотной авиационной транспортной системе* // Авиакосмическое приборостроение. – 2023. – №3. – С. 3–15.
4. КОЖУХАРОВ А.Н., ЛАРИЧЕВ О.И., *Многокритериальная задача о назначениях* // Автоматика и телемеханика. – 1977. – №7 – С. 71–88.
5. КОРОСТЕЛЕВ Д.А., ПОДВЕСОВСКИЙ А.Г., ЗАХАРОВА А.А. *Организация хранения данных функционирования объектов киберфизических систем* // Программные продукты и системы. – 2024. – Т. 37, №3. – С. 334–343.
6. КУТАХОВ В.П., МЕЩЕРЯКОВ Р.В. *Принципы организации групп БЛА транспортного назначения: направления научных исследований* // Шестой Всероссийский научно-практический

- семинар «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта» (БТС-ИИ-2021): Труды семинара. – Переславль-Залесский: Российская ассоциация искусственного интеллекта, 2022. – С. 86–92.
7. КУТАХОВ В.П., МЕЩЕРЯКОВ Р.В. *Управление групповым поведением беспилотных летательных аппаратов: постановка задачи применения технологий искусственного интеллекта* // Проблемы управления. – 2022. – №1. – С. 67–74.
 8. ЛАРИЧЕВ О.И. *Объективные модели и субъективные решения*. – М.: Наука. – 1987. – 144 с.
 9. ЛАРИЧЕВ О.И., СТЕРНИН М.Ю. *Человеко-машинные методы решения многокритериальной задачи о назначениях* // Автоматика и телемеханика – 1998. – №7. – С. 135–156.
 10. МЕФЕДОВ А.В. *Алгоритм оптимального целераспределения автономной группы ударных беспилотных летательных аппаратов* // Информация и космос. – 2018. – №3. – С. 167–171.
 11. ПОДВЕСОВСКИЙ А.Г., ЛАГЕРЕВ Д.Г., ФИЛОНОВ А.А. *Применение интеллектуального анализа данных для оценки расхода заряда аккумулятора беспилотного летательного аппарата* // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. – 2024. – №2. – С. 35–44.
 12. ПОДИНОВСКИЙ В.В. *Многокритериальные задачи принятия решений: теория и методы анализа*. – М.: Изд-во Юрайт, 2022. – 486 с.
 13. ПОЛУНИН С.В. *Ключевые отличия автономных БПЛА от обычных дронов, проблемы и перспективы* [Электронный ресурс] // Военный обзор. – URL: <https://militaryarms.ru/voennaya-texnika/aviaciya/avtonomnye-bpla/> (дата обращения: 22.10.2024).
 14. ХАЛИМОВ Н.Р., МЕФЕДОВ А.В. *Распределенная сетевая система управления группой ударных беспилотных летательных аппаратов* // Системы управления, связи и безопасности. – 2019. – №3. – С. 1–13.
 15. АВРАНАМ D.J., IRVING R.W., MANLOVE D.F. *The Student-Project Allocation Problem* // Algorithms and Computation. ISAAC 2003. Lecture Notes in Computer Science. – 2003. – Vol. 2906. – P. 474–484.

16. BEKEY G. *Autonomous robots: From biological inspiration to implementation and control*. – Cambridge, MA: MIT Press – 2005. – 577 p.
17. CAMPION M., RANGANATHAN P., FARUQUE S. *UAV swarm communication and control architectures: a review* // Journal of Unmanned Vehicle Systems. – 2018. – Vol. 7, No. 2. – P. 93–106.
18. GALE D., SHAPLEY L.S. *College Admissions and the Stability of Marriage* // The American Mathematical Monthly. – 1962. – Vol. 69, No. 1. – P. 9–15.
19. DEKA L., KHAN S.M., CHOWDHURY M. et al. *Transportation Cyber-Physical System and its importance for future mobility* // Transportation Cyber-Physical Systems. – 2008. – P. 1–20.
20. JIRKOVSKÝ V., OBITKO M., MAŘÍK V. *Understanding Data Heterogeneity in the Context of Cyber-Physical Systems Integration* // IEEE Trans. on Industrial Informatics. – 2017. – Vol. 13, No. 2. – P. 660–667.
21. LEE HY., LEE HA., JUNG S. et al. *Stable Marriage Matching for Traffic-Aware Space-Air-Ground Integrated Networks: A Gale-Shapley Algorithmic Approach* // Proc. of the Int. Conf. on Information Networking (ICOIN), Jeju-si, Korea. – 2022. – P. 474–477.
22. LIU D., DU Z., LIU X. et al. *Task-Based Network Reconfiguration in Distributed UAV Swarms: A Bilateral Matching Approach* // IEEE/ACM Trans. on Networking. – 2022. – Vol. 30, No. 6 – P. 2688–2700.
23. IQBAL M., ALI Z., KHAN R. et al. *Motion Planning of UAV Swarm: Recent Challenges and Approaches* // Aeronautics – New Advances. IntechOpen. – 2022. – P. 244.
24. PINCIROLI C., O'GRADY R., CHRISTENSEN A. et al. *Coordinating Heterogeneous Swarms through Minimal Communication among Homogeneous Sub-swarms* // In: Dorigo M. et al. Swarm Intelligence. ANTS 2010 // Lecture Notes in Computer Science. – Vol. 6234. – Springer, Berlin, Heidelberg. – 2010. – P. 558–559.
25. PODVESOVSKII A., ZAKHAROVA A. *Optimization of Heterogeneous Cargo Transportation Using UAVs with Different Priority Schemes for Delivery Tasks* // In: Bolshakov A.A. (eds) Cyber-Physical Systems. Studies in Systems, Decision and Control. – Vol. 554. – Springer, Cham. – 2024. – P. 165–177.

26. RADOVIC M. *Tech Talk: Untangling The 5 Levels of Drone Autonomy* [Электронный ресурс] // Drone Industry Insights. – URL: <https://droneii.com/drone-autonomy> (дата обращения: 22.10.2024).
27. ROTH A.E., SOTOMAYOR M. *Two-Sided Matching: A Study in Game-Theoretic Modeling and Analysis* // Econometric Society Monograph Series. – 1990. – P. 225.
28. SILVA E., JARDIM-GONCALVES R. *Cyber-Physical Systems: a multi-criteria assessment for Internet-of-Things (IoT) systems* // Enterprise Information Systems. – 2019. – Vol. 15, No. 1. – P. 1–20.
29. ZAKHAROVA A., PODVESOVSKII A. *Model for Optimization of Heterogeneous Cargo Transportation Using UAVs, Taking into Account the Priority of Delivery Tasks* // In: Ronzhin A., Kostyaev A. (eds) Agriculture Digitalization and Organic Production. ADOP 2023 // Smart Innovation, Systems and Technologies. – Vol 362. – Springer, Singapore, 2023. – P. 257–268.

DECISION MAKING MODEL FOR RECONFIGURATION OF HETEROGENEOUS GROUP OF INTERACTING CYBERPHYSICAL SYSTEM OBJECTS

Aleksandr Podvesovskii, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow; Bryansk State technical Univeristy, Bryansk, Cand.Sci., Associated Professor (apodv@tu-bryansk.ru).

Aleksandr Filonov, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, postgraduate student (afilonovcontact@gmail.com).

Vladimir Venets, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Cand.Sci., Senior Researcher (v.venets@mail.ru).

Gennady Nastas, National research center "Institute named after N.E. Zhukovsky", Moscow, Cand.Sci. (nastasgn@nrczh.ru).

Alena Zakharova, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, PhD, Associated Professor (zaa@ipu.ru).

Abstract: The control of the interaction of cyberphysical system objects within a heterogeneous group necessitates the completion of a series of tasks, among which we can identify the tasks of group configuration control, including the formation of the initial configuration, the optimization of the spatial location of objects, the distribution of targets, and the reconfiguration of the group. The importance of the

task of group reconfiguration is due to the importance of ensuring and preserving the integrity of the group in conditions of reduced capabilities, for example, due to the failure of individual members of the group. This paper considers the reconfiguration of a two-level group of heterogeneous interacting objects of a cyber-physical system. It does so on the basis of the reconfiguration of a two-level group of unmanned aerial vehicles, which have been constructed according to the scheme "master-subordinate." In order to address this issue, we propose an approach for developing a decision-making model that reduces the problem to a set of pair-combinations in accordance with the "many to one" scheme. A procedure for the formalization of preferences is presented, along with an algorithm for the formation of an optimal configuration. This algorithm is a modified Gale-Shapley algorithm for a two-sided matching model with a dynamic real quota. The results of the experimental study of the algorithm, and ways to eliminate the shortcomings identified are presented and discussed. The conclusion presents a comprehensive overview of possible directions for further advancement of the proposed approach to constructing a decision-making model for the reconfiguration problem.

Keywords: cyber-physical system, unmanned aerial vehicle, control of a group of unmanned aerial vehicles, reconfiguration, matching, deferred acceptance algorithm.

УДК 519.876.2

ББК 22.18

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии А.И. Алчиновым.*

Поступила в редакцию 29.10.2024.

Опубликована 31.01.2025.