

ГИБРИДНАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ КОАЛИЦИЙ В СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ

В.А. Серов

О.В. Трубиенко

ser_off@inbox.ru

trubienko@mail.ru

РТУ МИРЭА, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Предложена гибридная модель формирования гетерогенных коалиций мобильных роботов в системе группового управления, имеющей сетецентрическую архитектуру. Гибридная модель формирования гетерогенных коалиций включает в себя графовую и игровую компоненты. Графовая компонента характеризует коммуникационные свойства мобильных роботов как объектов инфраструктуры сетецентрической системы, а игровая — возможность кооперации мобильных роботов в форме образования коалиций, объединяющих возможности отдельных мобильных роботов и обладающих набором компетенций, который необходим для выполнения поставленной задачи. Сформированы показатели эффективности объектов сетецентрической системы, для вычисления которых использовались сетевая метрика центральности по посредничеству и теоретико-игровая метрика центральности по вектору Шепли. Постановка задачи формирования гетерогенной коалиции формализована в виде задачи дискретной многокритериальной оптимизации. Для решения поставленной задачи разработаны комбинированные эволюционные процедуры вычисления показателя центральности по посредничеству для вершин взвешенного графа и формирования оптимальной гетерогенной коалиции в кооперативной игре в форме характеристической функции. Решена задача формирования гетерогенной коалиции мобильных роботов в составе сетецентрической системы для выполнения специализированной задачи

Ключевые слова

Сетецентрическая система, групповое управление, структурно-коалиционная адаптация, коалиция, многокритериальное ранжирование, вектор Шепли, центральность по посредничеству, генетический алгоритм многокритериальной оптимизации

Поступила 27.05.2024

Принята 25.09.2024

© Автор(ы), 2025

Введение. Разработка и внедрение систем группового управления (СГУ) мобильными роботами (МР) является одной из приоритетных областей исследований во всем мире. Результаты исследований [1–13], охватывающих основные актуальные аспекты проблематики группового управления, показывают, что одной из ключевых задач методологии группового управления является разработка моделей и методов ситуационного анализа и структурной адаптации СГУ, обеспечивающих возможность решения широкого класса задач в условиях неопределенности внешней среды.

Результаты анализа литературы [5, 12–16] позволяют сделать вывод о перспективности игровых подходов, позволяющих учитывать различные виды неопределенных факторов: неопределенность цели, неопределенность внешней среды и конфликтную неопределенность при разработке моделей и методов структурной адаптации СГУ в условиях неопределенности, что предопределяет их универсальный характер. В рамках игровых подходов механизмы структурной адаптации могут быть реализованы в виде моделей самоорганизации на основе формирования гетерогенных коалиций МР-игроков, входящих в состав СГУ и ориентированных на решение комплексных задач, которые соответствуют текущей ситуации. Формирование гетерогенных коалиций позволяет объединить возможности отдельных специализированных МР-игроков и получить синергетический эффект.

В настоящее время в теорию и практику решения задач группового управления активно внедряется методология сетецентрического группового управления (СЦГУ) и обработки информации [2, 8, 17–26]. Системы СЦГУ являются следующим этапом эволюции СГУ и находят все более широкое применение в таких прикладных областях, как мобильная робототехника, беспилотные летательные аппараты, системы дистанционного мониторинга, военное дело и др.

Сетецентрическая парадигма управления базируется на принципах:

- формирования единого сетевого информационно-коммуникационного пространства;
- сбора, интегрирования, поддержания в актуальном состоянии разнородной информации за счет использования максимального числа доступных источников первичной и оперативной информации;
- формирования среды ситуационного анализа, прогнозирования, принятия решений и управления в режиме реального времени.

Реализация перечисленных принципов в рамках теоретико-игрового подхода позволяет построить интеллектуальную модель структурной адаптации систем СЦГУ [1, 2, 13], которая обеспечивает возможность:

- формирования и изменения состава гетерогенных коалиций и коалиционной структуры на множестве МР-игроков на основе ситуационного анализа и онтологической модели предметной области;
- учета различных типов конфликтного взаимодействия коалиций, входящих в коалиционную структуру;
- комплексирования принципов конфликтного равновесия в целях формирования стабильно эффективных стратегий группового управления МР;
- оптимального распределения коммуникационных ресурсов между коалициями в режиме реального времени.

Задача формирования гетерогенной коалиции МР-игроков — одна из ключевых, так как ее решение позволяет реализовать механизм самоорганизации в системе СЦГУ. Оценка эффективности каждой коалиции должна учитывать функциональный и коммуникационный аспекты. Функциональный аспект характеризует специализацию коалиции и ее значимость, определяемые набором компетенций входящих в нее участников, коммуникационный — информационную связность участников коалиции и степень интеграции коалиции в информационную инфраструктуру системы СЦГУ.

Для оценки функциональных возможностей участников гетерогенной коалиции и всей коалиции в [26–35] предложена теоретико-игровая концепция центральности, основанная на представлении модели группового взаимодействия МР в виде кооперативной игры в форме характеристической функции. В качестве основных теоретико-игровых метрик центральности рассмотрены значения Шепли, Банцафа, Оуэна, Майерсона и их модификации. Коммуникационные возможности МР-объектов сетевых метрик центральности и их коалиций оценены с использованием сетевых метрик центральности. Концепция сетевых метрик центральности использует графовую модель сетевых метрик центральности системы и рассмотрена в [36–44], где в качестве основных метрик исследованы центральность по степени, собственному вектору, по Кацу (обобщенная центральность по собственному вектору), посредничеству, близости, распаду, PageRank, просачиванию. Каждая сетевая метрика центральности имеет свою интерпретацию и характеризует степень контроля МР-объекта системы СЦГУ над информационными потоками.

Результаты анализа метрик центральности показывают, что для объективной оценки эффективности гетерогенных коалиций МР необходимо использовать векторный критерий, учитывающий функциональные

и коммуникационные характеристики МР, которые входят в инфраструктуру системы СЦГУ.

Следовательно, задача формирования гетерогенной коалиции МР имеет многокритериальный характер и в таком контексте является недостаточно исследованной.

Постановка задачи формирования коалиции мобильных роботов в сетцентрической системе. Рассмотрим гибридную модель сетцентрической инфраструктуры в виде:

$$\Gamma = \langle \mathbf{N}, \mathbf{A}, \nu(\mathbf{K}) \rangle. \quad (1)$$

Свойство гибридности модели (1) означает ее двойственный характер. С одной стороны, инфраструктура Γ представляет собой неориентированный взвешенный граф, где $\mathbf{N} = \{1, n\}$ — множество вершин графа; $\mathbf{A}$ — матрица смежности графа, характеризующая взаимосвязи между вершинами графа и их интенсивность. С другой стороны, в рамках инфраструктуры (1) предполагается возможность кооперации между вершинами (участниками) в достижении общих поставленных целей за счет образования коалиций $\mathbf{K} \subset \mathbf{N}$, т. е. (1) также представляет собой кооперативную игру с характеристической функцией $\nu(\mathbf{K})$. Графовая компонента модели (1) характеризует коммуникационные возможности объектов инфраструктуры, а игровая — наличие у каждого коалиционного объединения участников $\mathbf{K}$ (игроков) набора соответствующих компетенций, необходимых для выполнения поставленных задач.

Предполагаем, что значимость каждого участника, в смысле его влияния на всю инфраструктуру Γ , оценивается векторным критерием $\mathbf{F}(i) = [f_1(i), f_2(i)]^T$, где $f_1(i)$ — компонента, характеризующая коммуникационные свойства участника $i \in \mathbf{N}$; $f_2(i)$ — компонента, характеризующая значимость участника с учетом его специализации и возможности образования коалиций с другими участниками при решении поставленной задачи.

Компонента $f_1(i)$ имеет смысл нормализованной центральности по посредничеству [44] и вычисляется по формуле:

$$f_1(i) = \frac{2}{(|\mathbf{N}|-1)(|\mathbf{N}|-2)} \left(\sum_{(k, j) \in \mathbf{S}(i)} \frac{|\mathbf{M}_{kij}|}{|\mathbf{M}_{kj}|} \right).$$

Здесь $\mathbf{S}(i)$ — множество всех возможных парных сочетаний вершин графа (1) на множестве $(\mathbf{N} \setminus i)$; $\mathbf{M}_{kij}$ — множество кратчайших маршру-

тов для парного сочетания вершин (k, j) , проходящих через вершину i ; $\mathbf{M}_{kj}$ — множество кратчайших маршрутов для парного сочетания вершин (k, j) ; $\mathbf{M}_{kij} \subseteq \mathbf{M}_{kj}$.

Компонента $f_2(i)$ имеет смысл значения Шепли [38] и вычисляется по формуле:

$$Sh(i) = \sum_{\substack{\mathbf{K} \subseteq \mathbf{N}, \\ i \in \mathbf{K}}} \frac{(|\mathbf{K}|-1)! (|\mathbf{N}|-|\mathbf{K}|)!}{|\mathbf{N}|!} (v(\mathbf{K}) - v(\mathbf{K} \setminus i)), \quad (2)$$

где $v(\mathbf{K})$ — характеристическая функция кооперативной игры в гибридной модели (1).

Построим функцию, называемую индексом эффективности участника i :

$$\Phi(i) = \frac{1}{\left(1 + \frac{b_i}{|\mathbf{N}|-1}\right)^\psi},$$

Здесь b_i — число участников $j \in \mathbf{N} \setminus i$, для которых выполняется условие $F(j) \geq F(i)$; ψ — некоторое целое положительное число.

Эффективность коалиции $\mathbf{K}$ будем оценивать векторным критерием $\mathbf{H}(\mathbf{K}) = [h_1(\mathbf{K}), h_2(\mathbf{K})]^T$, компоненты которого задаются в виде:

$$h_1(\mathbf{K}) = v(\mathbf{K}), \quad (3)$$

$$h_2(\mathbf{K}) = \sum_{i \in \mathbf{K}} \Phi(i). \quad (4)$$

Таким образом, постановка задачи формирования оптимальной коалиции $\mathbf{K}$ размерностью r_K в сетевых системах формализуется в виде дискретной задачи многокритериальной оптимизации

$$\mathbf{H}(\mathbf{K}) \rightarrow \max_{\mathbf{K} \in \mathbf{N}^{r_K}}. \quad (5)$$

В задаче (5) $h_1(\mathbf{K})$ определяется в виде (3), интерпретируется как степень готовности коалиции участников $\mathbf{K}$ к выполнению поставленной задачи и характеризует компетенции коалиции как единого игрока; $h_2(\mathbf{K})$ определяется в виде (4) и характеризует значимость коалиции $\mathbf{K}$ размерностью r_K на множестве коалиций $\mathbf{N}^{r_K}$:

$$\mathbf{N}^{r_K} = \{ \mathbf{K} \subset \mathbf{N} \mid |\mathbf{K}| = r_K \}. \quad (6)$$

Алгоритм вычисления показателя центральности по посредничеству для вершин взвешенного графа. Для расчета центральности по посредничеству требуется для каждой вершины взвешенного неориентированного графа определить число проходящих через нее кратчайших путей, построенных для всех парных сочетаний вершин графа. Для этого необходимо на множестве $\mathbf{S}$ всех парных сочетаний вершин для каждой пары $(i, j) \in \mathbf{S}$ построить множество кратчайших маршрутов $\mathbf{M}_{ij}$. Число всех возможных парных сочетаний вершин на графе

$$|\mathbf{S}| = C_n^2 = \frac{n(n-1)}{2}.$$

Поэтому необходимо решить $|\mathbf{S}|$ задач поиска кратчайшего маршрута на графе. Для ускорения вычислений предлагается на множестве всех возможных парных сочетаний $\mathbf{S}$ сформировать множество задач $\mathbf{P} = \{P_i, i = \overline{1, (n-1)}\}$. Задача P_i формулируется в следующем виде. Требуется найти все кратчайшие пути от фиксированной вершины i до вершин графа с номерами $j = \overline{(i+1), n}$, т. е. в рамках задачи P_i необходимо решить $n-i$ задач нахождения кратчайших маршрутов для соответствующих парных сочетаний вершин. Тогда число задач нахождения кратчайших маршрутов для различных парных сочетаний вершин, которое необходимо решить на всем множестве $\mathbf{P}$, вычисляется в виде:

$$L = \sum_{i=1}^n (n-i) = \frac{n(n-1)}{2} = |\mathbf{S}|.$$

Генетический алгоритм решения задачи P_i . При разработке генетического алгоритма решения задачи P_i использована библиотека генетических алгоритмов многокритериальной оптимизации (ГАМО) [45]. Каждая хромосома $\mathbf{h}(i)$ содержит возможные маршруты $(i \rightarrow j)$ от текущей вершины i до вершин графа с номерами $j = \overline{(i+1), n}$. Используется целочисленное кодирование. Структура $\mathbf{h}(i)$ (рис. 1, выделено зеленым цветом) может быть представлена в виде

$$\mathbf{h}(i) = \{\mathbf{h}_j(i) \mid j = \overline{(i+1), n}\}, \quad (7)$$

где $\mathbf{h}_j(i) = \pi_j(\mathbf{N} \setminus i)$ — перестановка элементов множества $(\mathbf{N} \setminus i)$, соответствующая участку $\mathbf{h}_j(i)$; $\Pi(\mathbf{N} \setminus i)$ — множество возможных перестановок $\pi(\mathbf{N} \setminus i)$, $|\Pi(\mathbf{N} \setminus i)| = (n-1)!$. Участок $\mathbf{h}_j(i)$ содержит возможный

маршрут $s_j = (i \rightarrow j)$ (см. рис. 1, выделено желтым цветом). Параметры хромосомы $\mathbf{h}(i)$: $l_{\mathbf{h}(i)} = (n-1)(n-i)$ — длина хромосомы; $l_{\mathbf{h}_j(i)} = (n-1)$ — длина участка $\mathbf{h}_j(i)$.

$\mathbf{h}_{i+1}(i)$			$\mathbf{h}_j(i)$			$\mathbf{h}_n(i)$		
...	$k_{r_1} = i+1$	...	...	$k_{r_j} = j$	...	...	$k_{r_n} = j$	...
Маршрут $s_1 = (i \rightarrow i+1)$			Маршрут $s_j = (i \rightarrow j)$			Маршрут $s_r = (i \rightarrow n)$		

$\mathbf{h}(i)$

Рис. 1. Структура хромосомы $\mathbf{h}(i)$ при решении задачи P_i

Хромосома $\mathbf{h}(i)$ оценивается векторной функцией

$$\mathbf{F}(\mathbf{h}(i)) = [f_j(\mathbf{h}_j(i)), j = \overline{(i+1), n}]^T \in \mathbf{E}^{n-i}. \quad (8)$$

где $f_j(\mathbf{h}_j(i))$ — компонента, значение которой характеризует длину маршрута $s_j = (i \rightarrow j)$,

$$f_j(\mathbf{h}_j(i)) = \sum_{s=1}^{(n|k_{r_1}=j)} d(i, k_s), \quad (9)$$

$d(i, k_s)$ — длина ребра $(i \rightarrow k_s)$.

Следовательно, задача P_i поиска всех кратчайших путей от фиксированной вершины i до вершин графа с номерами $j = \overline{(i+1), n}$ может быть формализована в виде задачи многокритериальной оптимизации:

$$\mathbf{F}(\mathbf{h}(i)) \rightarrow \min_{\mathbf{h}(i) \in \mathbf{H}(i)}. \quad (10)$$

Здесь множество допустимых значений хромосомы $\mathbf{h}(i)$ задано в виде декартова произведения

$$\mathbf{H}(i) = \Pi^{(n-i)}(\mathbf{N} \setminus i). \quad (11)$$

Вследствие того, что векторная целевая функция $\mathbf{F}(\mathbf{h}(i))$ имеет вид (11), множество парето-оптимальных решений задачи (10), (11) состоит из одной точки. Поэтому задача (10), (11) может быть формализована в виде задачи сепарабельного программирования

$$G(\mathbf{h}(i)) = \sum_{j=i+1}^n f_j(\mathbf{h}_j(i)) \rightarrow \min_{\mathbf{h}(i) \in \mathbf{H}(i)},$$

где $f_j(\mathbf{h}_j(i))$ — функции, заданные в виде (9); $\mathbf{H}(i)$ — множество, заданное в виде (11).

Генетический алгоритм поиска всех кратчайших маршрутов из заданной вершины i до вершин графа с номерами $j = \overline{(i+1), n}$ может быть представлен в виде следующей последовательности шагов.

Шаг 1. Генерация популяции хромосом $\tilde{\mathbf{H}}(i) \subset \mathbf{H}(i)$, где структура хромосомы $\mathbf{h}(i) \in \tilde{\mathbf{H}}(i)$ представляется в виде (7), а множество $\mathbf{H}(i)$ — в виде (11).

Шаг 2. Оценка приспособленности всех особей $\mathbf{h}^k(i) \in \tilde{\mathbf{H}}(i)$ с использованием функции пригодности

$$\Phi(\mathbf{h}^k(i)) = \frac{1}{\left(1 + \frac{b_k(i)}{|\tilde{\mathbf{H}}(i)| - 1}\right)^\psi}. \quad (12)$$

Здесь $b_k(i)$ — число особей $\tilde{\mathbf{h}}$ в популяции $\tilde{\mathbf{H}}$, для которых выполняется условие $G(\tilde{\mathbf{h}}(i)) < G(\mathbf{h}^k(i))$, ψ — параметр, который через оператор селекции влияет на скорость сходимости всего генетического алгоритма. При увеличении ψ скорость сходимости генетического алгоритма возрастает. Однако усиливается и влияние детерминированной составляющей алгоритма при одновременном ослаблении влияния стохастической составляющей. Это может привести к преждевременному завершению алгоритма и получению локальных оптимальных решений.

Шаг 3. Формирование популяции родителей. Используется оператор селекции, основанный на комбинированном применении методов турнирного отбора и рулетки.

Шаг 4. Формирование популяции потомков. При решении этой задачи высокую эффективность показал оператор PMX-кроссовера (Partially Mapped Crossover, частично отображаемый кроссовер).

Шаг 5. Формирование популяции элитных решений. Особи, для которых функция пригодности принимает значение 1, копируются в массив элитных решений.

Шаг 6. Проверка условия останова. Если условие останова выполнено, то переходим к шагу 7, иначе — к шагу 2.

Шаг 7. На основе популяции элитных решений формируем множество оптимальных маршрутов $\mathbf{M}_{ij}$, $j = \overline{(i+1), n}$.

Запишем алгоритм вычисления центральности по посредничеству вершины i .

Шаг 1. Решение множества задач $\mathbf{P} = \{P_i, i = \overline{1, (n-1)}\}$. Все оптимальные маршруты, полученные в результате решения множества оптимизационных задач $\mathbf{P} = \{P_i, i = \overline{1, (n-1)}\}$, можно представить в виде структуры данных $\mathbf{M} = \{\mathbf{M}_{kj}, (k, j) \in \mathbf{S}\}$, где $\mathbf{M}_{kj} = \{\mu_{kj}\}$ — множество кратчайших маршрутов для каждого парного сочетания вершин $(k, j) \in \mathbf{S}$. Сформированная структура данных $\mathbf{M}$ представлена в виде табл. 1.

Таблица 1

Структура данных $\mathbf{M}$

Значение	1	...	k	...	i	...	j	...	n
1	×	...	$\mathbf{M}_{1k}$	...	$\mathbf{M}_{1i}$	...	$\mathbf{M}_{1j}$	...	$\mathbf{M}_{1n}$
...	×	×	...	...	...	...	...	...	...
k	×	×	×	...	$\mathbf{M}_{ki}$	...	$\mathbf{M}_{kj}$	...	$\mathbf{M}_{kn}$
...	×	×	×	×	...	...	...	...	...
i	×	×	×	×	×	...	$\mathbf{M}_{ij}$	...	$\mathbf{M}_{in}$
...	×	×	×	×	×	×	...	...	...
j	×	×	×	×	×	×	×	...	$\mathbf{M}_{jn}$
...	×	×	×	×	×	×	×	×	...
n	×	×	×	×	×	×	×	...	×

Шаг 2. Построение множества $\mathbf{S}(i)$ всех возможных парных сочетаний на множестве вершин $(\mathbf{N} \setminus i)$ для фиксированного i :

$$|\mathbf{S}(i)| = C_{n-1}^2 = \frac{(n-1)(n-2)}{2}.$$

Множеству $\mathbf{S}(i)$ соответствует структура данных $\mathbf{M}(i) = \{\mathbf{M}_{kj}, (k, j) \in \mathbf{S}(i)\}$. Как следует из табл. 1, $\mathbf{M}(i)$ получается из $\mathbf{M}$ исключением строки и столбца с номером i (выделено серым цветом).

Шаг 3. Вычисление нормализованной степени посредничества вершины i на основе структуры данных $\mathbf{M}(i)$:

$$B(i) = \frac{1}{C_{n-1}^2} \left(\sum_{(k, j) \in S(i)} \frac{|M_{kij}|}{|M_{kj}|} \right).$$

Здесь M_{kij} — множество кратчайших маршрутов для парного сочетания вершин $(k, j) \in S(i)$, проходящих через вершину i ; $M_{kij} \subseteq M_{kj}$.

Замечание. Декомпозиция задачи поиска всех кратчайших маршрутов в виде множества задач P с последующим формированием структуры данных M является основой для построения параллельного алгоритма вычисления показателя центральности по посредничеству.

Алгоритм вычисления показателя центральности на основе вектора Шепли. Показатель центральности участника $i \in N$ на основе вектора Шепли вычисляется в виде (2). Значения компонент вектора Шепли существенно зависят от механизма вычисления характеристической функции коалиции.

Предложено интерпретировать характеристическую функцию как степень готовности коалиции к применению для решения поставленной задачи. В качестве исходных данных для определения характеристической функции коалиции будем использовать сигнатуру каждого МР-участника коалиции и матрицу смежности исходного графа. Сигнатуры содержат данные о компетенциях и технических характеристиках, определяющих индивидуальные особенности МР и всей коалиции K , и представлены в виде табл. 2.

Элементы табл. 2 имеют следующий смысл:

$$C_p^i = \begin{cases} 1, & \text{МР}_i \text{ имеет компетенцию } C_p, \\ 0 & \text{иначе.} \end{cases}$$

$$S_q^i = \begin{cases} 1, & \text{МР}_i \text{ имеет характеристику } S_q, \\ 0 & \text{иначе.} \end{cases}$$

Таблица 2

Сигнатуры МР-участников кооперативной игры

Участники $i \in N$	Компетенции					Характеристики				
	C_1^i	...	C_p^i	...	C_P^i	S_1^i	...	S_q^i	...	S_Q^i
1	0	0	...	1	1	0	...	1	...	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
i	1	...	1	...	0	1	...	0	...	1
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Участники $i \in N$	Компетенции					Характеристики				
	C_1^i	...	C_P^i	...	C_P^i	S_1^i	...	S_q^i	...	S_Q^i
n	0	...	1	...	0	1	...	0	...	1
K	C_1^K	...	C_P^K	...	C_P^K	S_1^K	...	S_q^K	...	S_Q^K

Сигнатура коалиции K представляет собой $(P+Q)$ -разрядную строку, которая формируется в соответствии с правилом $C_P^K = \sum_{i \in K} C_P^i$,

$$S_q^K = \sum_{i \in K} S_q^i.$$

Алгоритм вычисления характеристической функции включает в себя следующие шаги.

Шаг 1. Проверка выполнения условия Req 1: Req 1: $\{K$ — связный подграф. Если условие Req 1 выполняется, то переходим к шагу 2, иначе полагаем $v(K) = 0$ и переходим к шагу 4.

Шаг 2. Проверка выполнения условия Req 2:

$$\text{Req 2: } \begin{cases} C_P^K \neq 0, \forall p = \overline{1, P}; \\ S_q^K \neq 0, \forall q = \overline{1, Q}. \end{cases}$$

Если условие Req 2 выполняется, то переходим к шагу 3, иначе полагаем $v(K) = 0$ и переходим к шагу 4.

Шаг 3. Вычисление характеристической функции в виде:

$$v(K) = \sum_{p=1}^P C_P^K.$$

Переход к шагу 4.

Шаг 4. Останов алгоритма.

Генетический алгоритм формирования оптимальной коалиции. Для решения задачи формирования оптимальной коалиции (3)–(6) использована библиотека ГАМО [45]. Каждая хромосома h содержит состав коалиции K размерностью n_K :

$$h = (g_1, \dots, g_{n_K}), \quad (13)$$

где g_i — бинарный код Грея (БКГ) участника коалиции $i \in K$ (номер соответствующей вершины графа). Параметры хромосомы h : $l_h = n_K$ —

длина хромосомы, r — разрядность БКГ $\mathbf{g}_i$. Значение параметра r выбирается из условия выполнения неравенства: $|\mathbf{N}| \leq 2^r - 1$.

Хромосома (13) оценивается векторной функцией $\mathbf{H}(\mathbf{K}) = [h_1(\mathbf{K}), h_2(\mathbf{K})]^T$ с компонентами вида (3), (4), алгоритмы вычисления которых рассмотрены выше. В алгоритме вычисления вектора Шепли при проверке выполнения условия Req1 связности подграфа $\mathbf{K}$ используется дополнительное условие, упрощающее расчет характеристической функции: если после декодирования $\mathbf{g}_i$ выполняется неравенство $i > |\mathbf{N}|$, то условие связности подграфа $\mathbf{K}$ не выполняется и полагаем $v(\mathbf{K}) = 0$.

Вычислительный эксперимент и анализ результатов. Гибридная модель инфраструктуры сетевцентрической системы группового управления представлена в виде (1) графовой и игровой компонентами.

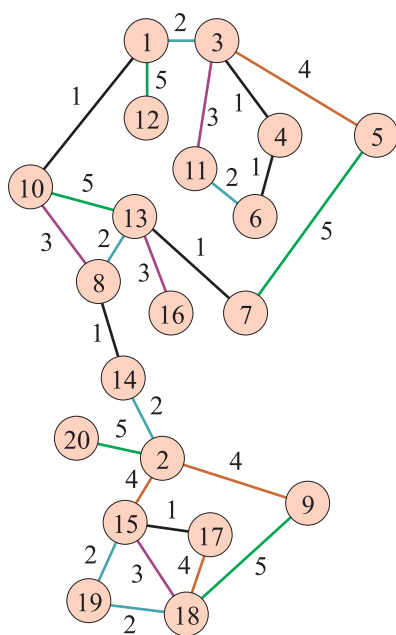


Рис. 2. Графовая модель инфраструктуры сетевцентрической системы

Графовая компонента модели сетевцентрической системы показана на рис. 2 в виде взвешенного неориентированного графа, где $|\mathbf{N}| = 20$. Игровая компонента модели сетевцентрической системы задана в виде кооперативной игры в форме характеристической функции. Онтологическая модель задачи, которую требуется решить, характеризуется сигнатурой, представленной в табл. 3 в виде набора необходимых компетенций и характеристик. Сигнатуры МР-участников приведены в табл. 4.

Требуется сформировать гетерогенную коалицию $\mathbf{K}$, $r_{\mathbf{K}} = 4$ для выполнения поставленной задачи.

Результаты вычисления вектора Шепли, центральности по посредничеству и многокритериального ранжирования МР-элементов сетевцентрической системы на основе вычисления индекса эффективности приведены в табл. 5. Далее они используются в качестве исходной информации для векторной оценки эффективности коалиций при решении задачи формирования оптимальной коалиции.

Таблица 3

Сигнатура решаемой задачи

Компетенции					Характеристики	
C_1^i	C_2^i	C_3^i	C_4^i	C_5^i	S_1^i	S_2^i
1	1	1	1	1	1	1

Таблица 4

Сигнатуры МР-участников

Участники $i \in N$	Компетенции					Характеристики	
	C_1^i	C_2^i	C_3^i	C_4^i	C_5^i	S_1^i	S_2^i
1	1	0	0	0	0	0	0
2	1	0	1	0	0	0	0
3	1	0	0	1	0	0	0
4	1	0	0	0	1	0	0
5	1	0	0	0	0	1	0
6	0	1	0	0	1	0	0
7	0	1	0	1	0	0	0
8	0	1	0	1	0	0	0
9	0	0	1	0	0	0	0
10	0	0	1	0	1	0	0
11	0	0	1	0	0	1	1
12	0	0	0	1	0	0	0
13	0	1	0	1	0	0	0
14	1	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	1	0	0
16	0	1	0	0	0	1	0
17	0	0	1	0	0	0	1
18	0	0	0	1	1	1	0
19	0	0	1	0	0	1	0
20	0	1	0	0	0	0	1

Таблица 5

Характеристики элементов сетевых систем

Номер элемента	Значение Шепли	Центральность по посредничеству	Индекс эффективности ($\psi = 2$)
2	6,222	0,491	1,0
8	0,735	0,515	1,0
1	5,659	0,339	0,903
13	6,137	0,222	0,903
3	2,193	0,310	0,819
14	0,267	0,491	0,819
10	0,733	0,339	0,746

Окончание табл. 5

Номер элемента	Значение Шепли	Центральность по посредничеству	Индекс эффективности ($\psi = 2$)
7	0,992	0,117	0,682
18	1,555	0,111	0,682
11	1,287	0,099	0,627
9	0,294	0,175	0,578
15	1,235	0,088	0,578
4	1,132	0	0,534
6	1,038		0,496
5	0,308	0,082	0,429
17	0,519	0	0,376
19	0,246		0,295
20	-0,257		0,279
16	-0,525		0,264
12	-0,771		0,250

Задача формирования оптимальной коалиции решается в виде (3)–(5) с использованием библиотеки ГАМО с учетом следующих основных параметров и характеристик генетического алгоритма: разрядность БКГ $\mathbf{g}_i$, $i = \overline{1, 4}$, $r = 5$; длина хромосомы $\mathbf{h}$ $l_h = rr_K = 20$; размер популяции хромосом $|\tilde{\mathbf{H}}| = 200$; оценка приспособленности всех особей $\mathbf{h}^k \in \tilde{\mathbf{H}}$ с использованием функции пригодности вида (12), где b_k — число особей $\tilde{\mathbf{h}}$ в популяции $\tilde{\mathbf{H}}$, для которых выполняется векторное неравенство $\mathbf{H}(\tilde{\mathbf{h}}) \geq \mathbf{H}(\mathbf{h}^k)$, параметр $\psi = 2$; тип оператора селекции — комбинирование турнирной схемы и рулетки; тип оператора кроссовера: одноточечный в границах каждого $\mathbf{g}_i$, $i = \overline{1, 4}$; вероятность кроссовера $p_c = 0,90$; вид мутации — одноточечная в пределах одного случайно выбранного $\mathbf{g}_i$; вероятность мутации $p_m = 0,05$.

Множество оптимальных по Парето решений задачи (3)–(5) $\mathbf{K} = \{\mathbf{K}_1^{\text{opt}}, \mathbf{K}_2^{\text{opt}}, \mathbf{K}_3^{\text{opt}}\}$ представлено в табл. 6.

Таблица 6

Множество оптимальных по Парето решений задачи (3)–(5)

Номер	$\mathbf{K}_i^{\text{opt}}$	$h_1(\mathbf{K}^{\text{opt}})$	$h_2(\mathbf{K}^{\text{opt}})$
1	{3, 4, 6, 11}	7	2,476
2	{2, 15, 18, 20}	6	2,539
3	{1, 2, 8, 13}	0	3,806

Решение K_3^{opt} формально является парето-оптимальным, но не удовлетворяет требованию готовности к применению, поскольку $v(K_3^{\text{opt}}) = 0$. Поэтому в качестве оптимальных решений следует рассматривать коалиции K_1^{opt} , K_2^{opt} .

Возможны другие подходы к решению задачи формирования оптимальной гетерогенной коалиции на основе гибридной модели (1). Коммуникационная и игровая кооперативная компоненты могут быть одновременно учтены в рамках следующих постановок задач.

Постановка 1. Решается задача оптимизации по критерию готовности коалиции к применению

$$v(K) \rightarrow \max_{K \subset N^K}. \quad (14)$$

В такой постановке определяющую роль играет форма характеристической функции. Оптимальным решением задачи (14) является коалиция $K^{\text{opt}1} = \{3, 4, 6, 11\}$, $v(K^{\text{opt}1}) = 7$, совпадающая с K_1^{opt} в задаче (3)–(5).

Постановка 2. Решается задача формирования коалиции из наиболее значимых МР-участников на основе ранжирования по индексам эффективности (см. табл. 5), что эквивалентно постановке задачи

$$h(K) = \sum_{i \in K} \Phi(i) \rightarrow \max_{K \subset N^K}. \quad (15)$$

Оптимальным решением задачи (15) является коалиция $K^{\text{opt}2} = \{1, 2, 8, 13\}$, $v(K^{\text{opt}2}) = 0$, совпадающая с K_3^{opt} в задаче (3)–(5).

Следует отметить, что оптимальные решения задач (14), (15) могут быть найдены при решении многокритериальной задачи (3)–(5) методом главного критерия, так как постановка (3)–(5) является более общей по сравнению с (14), (15) и всегда выполняются условия $K^{\text{opt}1} \in K$; $K^{\text{opt}2} \in K$. При этом решения $K^{\text{opt}1}$, $K^{\text{opt}2}$ являются «крайними» точками множества эффективных решений задачи (3)–(5).

Постановка 3. Формирование коалиции из наиболее значимых по вектору Шепли МР-участников инфраструктуры (1) эквивалентно постановке задачи

$$h(K) = \sum_{i \in K} Sh(i) \rightarrow \max_{K \in N^K}. \quad (16)$$

Оптимальным решением задачи (16) является коалиция $K^{\text{opt}3} = \{1, 2, 3, 13\}$, $h(K^{\text{opt}3}) = 20,211$. Однако коалиция $K^{\text{opt}3}$ неприемлема,

так как $v(K^{opt}) = 0$. Это обусловлено тем обстоятельством, что компоненты вектора Шепли характеризуют среднее значение значимости каждого МР-участника инфраструктуры (1) по всем возможным коалициям K размерностью $1 \leq |K| \leq |N|$. В рамках отдельной коалиции значимость каждого участника может оказаться минимальной, что и приводит к минимальному значению функции $v(K) = 0$ в рамках поставленной задачи.

Обобщая изложенное, можно сделать вывод, что формализация задачи формирования коалиции в виде (3)–(5) дает возможность построить множество эффективных решений, предоставляющее более содержательную информацию с позиции поддержки принятия оптимальных решений по сравнению с другими рассмотренными постановками.

Заключение. Разработана методика формирования гетерогенной коалиции МР на основе гибридной модели инфраструктуры сетецентрической системы группового управления. Гибридная модель включает в себя графовую и игровую компоненты, где графовая компонента характеризует коммуникационные возможности элементов инфраструктуры, а игровая — возможности кооперации участников за счет образования коалиций для выполнения поставленной задачи.

Сформирована система показателей эффективности элементов сетецентрической системы и их гетерогенных коалиционных объединений, для вычисления которых использована сетевая метрика центральности по посредничеству и теоретико-игровая метрика центральности по вектору Шепли. Предложена интерпретация характеристической функции как степени готовности коалиции к применению для решения поставленной задачи. В качестве исходных данных для вычисления характеристической функции коалиции использованы сигнатуры МР-участников коалиции и матрица смежности исходного графа, определяющая характеристику связности коалиции. Сигнатуры содержат данные о компетенциях и технических характеристиках, определяющих индивидуальные особенности МР и всей коалиции, что отражает свойство гетерогенности формируемой коалиции.

Постановка задачи формирования оптимальной коалиции в сетецентрической системе формализована в виде задачи дискретной многокритериальной оптимизации. Для решения поставленной задачи разработаны комбинированные эволюционные вычислительные процедуры вычисления показателя центральности по посредничеству для вершин взвешенного графа и формирования оптимальной гетерогенной коалиции в кооперативной игре в форме характеристической функции, расши-

ряющие возможности библиотеки ГАМО [45]. Предложенный подход к формированию гетерогенной коалиции можно рассматривать как один из инструментов построения моделей социального поведения МР в задачах группового управления.

Решена задача формирования гетерогенной коалиции МР в сетевых системах для выполнения специализированной задачи, определенной в виде сигнатуры, представляющей собой набор требуемых компетенций и технических характеристик МР. Показано, что разработанная методика позволяет получить более полное множество оптимальных коалиций, обладающих необходимым потенциалом работоспособности.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Gorodetskiy A., Tarasova I., eds. Smart electromechanical systems. Group interaction. In: *Studies in Systems, Decision and Control*, vol. 174. Cham, Springer, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-99759-9>
- [2] Gorodetskiy A., Tarasova I., eds. Smart electromechanical systems. Situational Control. In: *Studies in Systems, Decision and Control*, vol. 261. Springer, Cham, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-32710-1>
- [3] Gorodetskiy A., Tarasova I., eds. Smart electromechanical systems. Behavioral decision making. In: *Studies in Systems, Decision and Control*, vol. 352. Cham, Springer, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-68172-2>
- [4] Gorodetskiy A., Tarasova I., eds. Smart electromechanical systems. Recognition, identification, modeling, measurement systems, sensors. In: *Studies in Systems, Decision and Control*, vol. 419. Cham, Springer, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-97004-8>
- [5] Воронов Е.М., Микрин Е.А., Обносов Б.В., ред. Стабилизация, наведение, групповое управление и системное моделирование беспилотных летательных аппаратов. Современные подходы и методы. М., Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2018.
- [6] Пшихопов В.Х., ред. Групповое управление подвижными объектами в неопределенных средах. М., ФИЗМАТЛИТ, 2015.
- [7] Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. М., ФИЗМАТЛИТ, 2009.
- [8] Манько С.В., Лохин В.М., Диане С.К. Принципы построения и экспериментальные исследования прототипного образца многоагентной робототехнической системы для разбора завалов. *Российский технологический журнал*, 2022, №10 (6), с. 28–41. DOI: <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-6-28-41>
- [9] Navarro I., Matha F. A survey of collective movement of mobile robots. *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, 2013, vol. 10, no. 1. DOI: <https://doi.org/10.5772/54600>

- [10] Bertuccelli L., Choi H.-L., Cho P., et al. Real-time Multi-UAV task assignment in dynamic and uncertain environments. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conf.*, 2009, no. AIAA-2009-5776. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2009-5776>
- [11] Xu D., Zhang X., Zhu Z., et al. Behavior-based formation control of swarm robots. *Math. Probl. Eng.*, 2014, vol. 2014, art. 205759. DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/205759>
- [12] Ungureanu V. Pareto-Nash-Stackelberg game and control theory. In: *Smart Innovation, Systems and Technologies*, vol. 89. Cham, Springer, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-75151-1>
- [13] Серов В.А., Бабинцев Ю.Н., Кондаков Н.С. Нейроуправление многокритериальными конфликтными системами. М., МосГУ, 2011.
- [14] Смирнов А.В., Шереметов Л.Б. Модели формирования коалиций между кооперативными агентами: состояние и перспективы исследований. *Искусственный интеллект и принятие решений*, 2011, № 1, с. 36–48. EDN: OZQUQX
- [15] Klusch M., Gerber A. Dynamic coalition formation among rational agents. *IEEE Intell. Syst.*, 2002, vol. 17, iss. 3, pp. 42–47. DOI: <https://doi.org/10.1109/MIS.2002.1005630>
- [16] Romero Cortés J., Sheremetov L. Model of cooperation in multi agent systems with fuzzy coalitions. In: Dunin-Keplicz B., Nawarecki E. (eds). *From Theory to Practice in Multi-Agent Systems. CEEMAS 2001. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 2296. Berlin, Heidelberg, Springer, pp. 263–272. DOI: https://doi.org/10.1007/3-540-45941-3_28
- [17] De Cristofaro M., Lansdowne C., Schlesinger A. Heterogeneous wireless mesh network technology evaluation for space proximity and surface applications. *SpaceOps Conference*, 2014, art. AIAA 2014-1600. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2014-1600>
- [18] Goforth M., Ratliff J., Barton R., et al. Avionics architectures for exploration: wireless technologies and human spaceflight. *IEEE WiSEE*, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1109/WiSEE.2014.6973073>
- [19] Диане С.А.К., Исаков А.Ю., Исакова А.О. Алгоритм сетецентрического управления движением группы мобильных роботов. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*, 2022, т. 10, № 1. DOI: <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2022.36.1.026>
- [20] Мулюха В.А., Гук М.Ю., Заборовский В.С. Система супервизорного сетецентрического управления робототехническими объектами. *Робототехника и техническая кибернетика*, 2016, № 3, с. 42–47. EDN: YVRNVZ
- [21] Макаренко С.И., Олейников А.Ю., Черницкая Т.Е. Модели интероперабельности информационных систем. *Системы управления, связи и безопасности*, 2019, № 4, с. 215–245. EDN: NACKGD
- [22] Steel J., Drogemuller R., Toth B. Model interoperability in building information modelling. *Softw. Syst. Model.*, 2012, vol. 11, no. 1, pp. 99–109. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10270-010-0178-4>

- [23] New European Interoperability Framework. Promoting seamless services and data flows for European public administrations. Luxembourg, Publications Office of the European Union, 2017.
- [24] Sahingoz O.K. Networking models in flying ad-hoc networks (FANETs): concepts and challenges. *J. Intell. Robot. Syst.*, 2014, vol. 74, no. 1-2, pp. 513–527. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10846-013-9959-7>
- [25] Wang J., Jiang C., Han Z., et al. Taking drones to the next level: Cooperative distributed unmanned-aerial-vehicular networks for small and mini drones. *IEEE Veh. Technol. Mag.*, 2017, vol. 12, iss. 3, pp. 73–82. DOI: <https://doi.org/10.1109/MVT.2016.2645481>
- [26] Мартынова Л.А., Розенгауз М.Б. Определение эффективного поведения группы АНПА в сетевых системах освещения подводной обстановки. *Информационно-управляющие системы*, 2017, no. 3, pp. 47–57. EDN: YSLPUL
- [27] Skibski O., Michalak T.P., Rahwan T., et al. Algorithms for the Shapley and Myerson values in graph-restricted games. *AAMAS*, 2014, vol. 1, pp. 197–204.
- [28] Michalak T., Aadithya K., Szczepański P., et al. Efficient computation of the shapley value for game-theoretic network centrality. *J. Artif. Intell. Res.*, 2013, vol. 46, pp. 607–650. DOI: <https://doi.org/10.1613/jair.3806>
- [29] Van Campen T., Hamers H., Husslage B., et al. A new approximation method for the Shapley value applied to the WTC 9/11 terrorist attack. *Soc. Netw. Anal. Min.*, 2017, vol. 8, no. 1, art. 3. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13278-017-0480-z>
- [30] Lindelauf R., Hamers H., Husslage B. Game theoretic centrality analysis of terrorist networks: the cases of Jemaah Islamiyah and Al Qaeda. *CentER Discussion Paper*, 2011, no. 107. DOI: <https://doi.org/10.2139/ssrn.1934726>
- [31] Algaba E., Prieto A., Saavedra-Nieves A. Rankings in the Zerkani network by a game theoretical approach. *arXiv:2202.07730*. DOI: <https://arxiv.org/abs/2202.07730v1>
- [32] Algaba E., Prieto A., Saavedra-Nieves A., et al. Analyzing the Zerkani network with the Owen value. In: Kurz S., Maaser N., Mayer A. (eds). *Advances in Collective Decision Making. Studies in Choice and Welfare*. Cham, Springer, 2023, pp. 225–242. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-21696-1_14
- [33] Myerson R.B. Graphs and cooperation in games. *Math. Oper. Res.*, 1977, vol. 2, no. 3, pp. 209–296. DOI: <https://doi.org/10.1287/moor.2.3.225>
- [34] Amer R., Giménez J.M. A connectivity game for graphs. *Math. Meth. Oper. Res.*, 2004, vol. 60, no. 3, pp. 453–470. DOI: <https://doi.org/10.1007/s001860400356>
- [35] Narayanam R., Narahari Y. A Shapley value-based approach to discover influential nodes. *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, 2011, vol. 8, iss. 1, pp. 130–147. DOI: <https://doi.org/10.1109/TASE.2010.2052042>
- [36] Перова Ю.П., Григорьев В.Р., Жуков Д.О. Модели и методы анализа сложных сетей и социальных сетевых структур. *Российский технологический журнал*, 2023, № 11 (2), с. 33–49. DOI: <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-2-33-49>

- [37] Newman M.E.J. Finding community structure in networks using the eigenvectors of matrices. *Phys. Rev. E*, 2006, vol. 74, iss. 3, art. 036104.
DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.74.036104>
- [38] Miegheem P.V. Graph spectra for complex networks. Cambridge Univ. Press, 2011.
- [39] Borgatti S.P., Everett M.G. A graph-theoretic perspective on centrality. *Soc. Networks*, 2005, vol. 28, iss. 4, pp. 466–484.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.socnet.2005.11.005>
- [40] Rochat Y. Closeness centrality extended to unconnected graphs: the harmonic centrality index. *ASNA*, 2009.
URL: <https://infoscience.epfl.ch/entities/publication/7864800f-6d09-4bb4-bb09-f12a335fca92> (дата обращения: 15.02.2025).
- [41] Boldi P., Vigna S. Axioms for centrality. *Internet Math.*, 2014, vol. 10, iss. 3–4.
DOI: <https://doi.org/10.1080/15427951.2013.865686>
- [42] Piraveenan M., Prokopenko M., Hossain L. Percolation centrality: quantifying graph-theoretic impact of nodes during percolation in networks. *PLOS ONE*, 2013, vol. 8, no. 1, art. e53095. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0053095>
- [43] Szczepański P., Michalak T., Rahwan T. A new approach to betweenness centrality based on the Shapley value. *Proc. 11th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, 2012, vol. 1, pp. 239–246.
- [44] Brandes U. A faster algorithm for betweenness centrality. *J. Math. Sociol.*, 2001, vol. 25, iss. 2, pp. 163–177. DOI: <https://doi.org/10.1080/0022250X.2001.9990249>
- [45] Серов В.А. Генетические алгоритмы оптимизации управления многокритериальными системами в условиях неопределенности на основе конфликтных равновесий. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2007, № 4 (69), с. 70–80. EDN: IJDHED

Серов Владимир Александрович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Информационно-аналитические системы кибербезопасности» РТУ МИРЭА (Российская Федерация, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Трубиенко Олег Владимирович — канд. техн. наук, заведующий кафедрой «Информационно-аналитические системы кибербезопасности» РТУ МИРЭА (Российская Федерация, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Серов В.А., Трубиенко О.В. Гибридная модель формирования коалиций в сетевых системах группового управления. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2025, № 1 (150), с. 137–161. EDN: VMUSGV

HYBRID MODEL OF COALITION FORMATION IN NETWORK-CENTRIC SYSTEMS

V.A. Serov
O.V. Trubienko

ser_off@inbox.ru
trubienko@mail.ru

RTU MIREA, Moscow, Russian Federation

Abstract

The article proposes a hybrid model for the formation of heterogeneous mobile robot coalitions in a group management system with a network-centric architecture. The hybrid model of heterogeneous coalition formation includes graph and game components. The graph component characterizes the communication properties of mobile robots as infrastructure objects of a network-centric system, and the game component characterizes the possibility of cooperation between mobile robots in the form of coalitions that combine the capabilities of individual mobile robots and possess a set of competencies necessary to complete the task. Indicators of the effectiveness of network-centric system objects are formed, for which the network metric of centrality by mediation and the game-theoretic metric of centrality by the Shapley vector were used to calculate. The formulation of the task of forming a heterogeneous coalition is formalized as a discrete multi-criteria optimization problem. To solve this problem, combined evolutionary computational procedures are being developed for calculating the centrality index by mediation for the vertices of a weighted graph and for forming an optimal heterogeneous coalition in a cooperative game in the form of a characteristic function. The problem of forming a heterogeneous coalition of mobile robots as part of a network-centric system to perform a specialized task is being solved

Keywords

Network-centric system, group control, structural-coalition adaptation, coalition, multicriteria ranking, Shapley vector, betweenness centrality, genetic algorithm of multicriteria optimization

Received 27.05.2024

Accepted 25.09.2024

© Author(s), 2025

REFERENCES

- [1] Gorodetskiy A., Tarasova I., eds. Smart electromechanical systems. Group interaction. In: *Studies in Systems, Decision and Control*, vol. 174. Cham, Springer, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-99759-9>
- [2] Gorodetskiy A., Tarasova I., eds. Smart electromechanical systems. Situational Control. In: *Studies in Systems, Decision and Control*, vol. 261. Springer, Cham, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-32710-1>

- [3] Gorodetskiy A., Tarasova I., eds. Smart electromechanical systems. Behavioral decision making. In: *Studies in Systems, Decision and Control*, vol. 352. Cham, Springer, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-68172-2>
- [4] Gorodetskiy A., Tarasova I., eds. Smart electromechanical systems. Recognition, identification, modeling, measurement systems, sensors. In: *Studies in Systems, Decision and Control*, vol. 419. Cham, Springer, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-97004-8>
- [5] Voronov E.M., Mikrin E.A., Obnosov B.V., eds. Stabilizatsiya, navedenie, gruppovoe upravlenie i sistemnoe modelirovanie bespilotnykh letatelnykh apparatov. Sovremennye podkhody i metody [Stabilization, guidance, group control, and system modeling of unmanned aerial vehicles. Modern approaches and methods]. Moscow, BMSTU Publ., 2018.
- [6] Pshikhopov V.Kh., ed. Gruppovoe upravlenie podvizhnymi obektami v neopredelennykh sredakh [Group control of moving objects in uncertain environments]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2015.
- [7] Kalyaev I.A., Gayduk A.R., Kapustyan S.G. Modeli i algoritmy kolektivnogo upravleniya v gruppakh robotov [Models and algorithms of collective control in groups of robots]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2009.
- [8] Manko S.V., Lokhin V.M., Diane S.K. Prototype multi-agent robotic debris removal system: principles of development and experimental studies. *Russian Technological Journal*, 2022, vol. 10 (6), pp. 28–41 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-6-28-41>
- [9] Navarro I., Matha F. A survey of collective movement of mobile robots. *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, 2013, vol. 10, no. 1. DOI: <https://doi.org/10.5772/54600>
- [10] Bertuccelli L., Choi H.-L., Cho P., et al. Real-time Multi-UAV task assignment in dynamic and uncertain environments. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conf.*, 2009, no. AIAA-2009-5776. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2009-5776>
- [11] Xu D., Zhang X., Zhu Z., et al. Behavior-based formation control of swarm robots. *Math. Probl. Eng.*, 2014, vol. 2014, art. 205759. DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/205759>
- [12] Ungureanu V. Pareto-Nash-Stackelberg game and control theory. In: *Smart Innovation, Systems and Technologies*, vol. 89. Cham, Springer, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-75151-1>
- [13] Serov V.A., Babintsev Yu.N., Kondakov N.S. Neyroupravlenie mnogokriterialnymi konfliktnymi sistemami [Neurocontrol of multicriteria conflict systems]. Moscow, MSU Publ., 2011.
- [14] Smirnov A.V., Sheremetov L.B. Models of coalition formation among cooperative agents: The current state and prospects of research. *Sci. Tech. Inf. Proc.*, 2012, vol. 39, no. 5, pp. 283–292. DOI: <https://doi.org/10.3103/S014768821205005X>
- [15] Klusch M., Gerber A. Dynamic coalition formation among rational agents. *IEEE Intell. Syst.*, 2002, vol. 17, iss. 3, pp. 42–47. DOI: <https://doi.org/10.1109/MIS.2002.1005630>

- [16] Romero Cortés J., Sheremetov L. Model of cooperation in multi agent systems with fuzzy coalitions. In: Dunin-Keplicz B., Nawarecki E. (eds). *From Theory to Practice in Multi-Agent Systems. CEEMAS 2001. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 2296. Berlin, Heidelberg, Springer, pp. 263–272.
DOI: https://doi.org/10.1007/3-540-45941-3_28
- [17] De Cristofaro M., Lansdowne C., Schlesinger A. Heterogeneous wireless mesh network technology evaluation for space proximity and surface applications. *SpaceOps Conference*, 2014, art. AIAA 2014-1600. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2014-1600>
- [18] Goforth M., Ratliff J., Barton R., et al. Avionics architectures for exploration: wireless technologies and human spaceflight. *IEEE WiSEE*, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.1109/WiSEE.2014.6973073>
- [19] Diane S.A.K., Iskhakov A.Yu., Iskhakova A.O. Network-centric motion control algorithm for a group of mobile robots. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii* [Modeling, Optimization and Information Technology], 2022, vol. 10, no. 1 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2022.36.1.026>
- [20] Mulyukha V.A., Guk M.Yu., Zaborovskiy V.S. Supervisory network-centric control system for robotic objects. *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and Technical Cybernetics], 2016, no. 3, pp. 42–47 (in Russ.). EDN: YVRNVZ
- [21] Makarenko S.I., Oleynikov A.Y., Chernitskaya T.E. Models of interoperability assessment for information systems. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti* [Systems of Control, Communication and Security], 2019, no. 4, pp. 215–245 (in Russ.).
EDN: NACKGD
- [22] Steel J., Drogemuller R., Toth B. Model interoperability in building information modelling. *Softw. Syst. Model.*, 2012, vol. 11, no. 1, pp. 99–109.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10270-010-0178-4>
- [23] New European Interoperability Framework. Promoting seamless services and data flows for European public administrations. Luxembourg, Publications Office of the European Union, 2017.
- [24] Sahingoz O.K. Networking models in flying ad-hoc networks (FANETs): concepts and challenges. *J. Intell. Robot. Syst.*, 2014, vol. 74, no. 1-2, pp. 513–527.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10846-013-9959-7>
- [25] Wang J., Jiang C., Han Z., et al. Taking drones to the next level: Cooperative distributed unmanned-aerial-vehicular networks for small and mini drones. *IEEE Veh. Technol. Mag.*, 2017, vol. 12, iss. 3, pp. 73–82. DOI: <https://doi.org/10.1109/MVT.2016.2645481>
- [26] Martynova L.A., Rozengauz M.B. Efficient operation of a group of standalone unmanned submersibles in a network-centric system of underwater illumination. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2017, no. 3, pp. 47–57 (in Russ.). EDN: YSLPUL
- [27] Skibski O., Michalak T.P., Rahwan T., et al. Algorithms for the Shapley and Myerson values in graph-restricted games. *AAMAS*, 2014, vol. 1, pp. 197–204.

- [28] Michalak T., Aadithya K., Szczepański P., et al. Efficient computation of the shapley value for game-theoretic network centrality. *J. Artif. Intell. Res.*, 2013, vol. 46, pp. 607–650. DOI: <https://doi.org/10.1613/jair.3806>
- [29] Van Campen T., Hamers H., Husslage B., et al. A new approximation method for the Shapley value applied to the WTC 9/11 terrorist attack. *Soc. Netw. Anal. Min.*, 2017, vol. 8, no. 1, art. 3. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13278-017-0480-z>
- [30] Lindelauf R., Hamers H., Husslage B. Game theoretic centrality analysis of terrorist networks: the cases of Jemaah Islamiyah and Al Qaeda. *CentER Discussion Paper*, 2011, no. 107. DOI: <https://doi.org/10.2139/ssrn.1934726>
- [31] Algaba E., Prieto A., Saavedra-Nieves A. Rankings in the Zerkani network by a game theoretical approach. *arXiv:2202.07730*. DOI: <https://arxiv.org/abs/2202.07730v1>
- [32] Algaba E., Prieto A., Saavedra-Nieves A., et al. Analyzing the Zerkani network with the Owen value. In: Kurz S., Maaser N., Mayer A. (eds). *Advances in Collective Decision Making. Studies in Choice and Welfare*. Cham, Springer, 2023, pp. 225–242. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-21696-1_14
- [33] Myerson R.B. Graphs and cooperation in games. *Math. Oper. Res.*, 1977, vol. 2, no. 3, pp. 209–296. DOI: <https://doi.org/10.1287/moor.2.3.225>
- [34] Amer R., Giménez J.M. A connectivity game for graphs. *Math. Meth. Oper. Res.*, 2004, vol. 60, no. 3, pp. 453–470. DOI: <https://doi.org/10.1007/s001860400356>
- [35] Narayanam R., Narahari Y. A Shapley value-based approach to discover influential nodes. *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, 2011, vol. 8, iss. 1, pp. 130–147. DOI: <https://doi.org/10.1109/TASE.2010.2052042>
- [36] Perova J.P., Grigoriev V.P., Zhukov D.O. Models and methods for analyzing complex networks and social network structures. *Russian Technological Journal*, 2023, vol. 11, no. 2, pp. 33–49. DOI: <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-2-33-49>
- [37] Newman M.E.J. Finding community structure in networks using the eigenvectors of matrices. *Phys. Rev. E*, 2006, vol. 74, iss. 3, art. 036104. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.74.036104>
- [38] Miegheem P.V. Graph spectra for complex networks. Cambridge Univ. Press, 2011.
- [39] Borgatti S.P., Everett M.G. A graph-theoretic perspective on centrality. *Soc. Networks*, 2005, vol. 28, iss. 4, pp. 466–484. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.socnet.2005.11.005>
- [40] Rochat Y. Closeness centrality extended to unconnected graphs: the harmonic centrality index. ASNA, 2009. Available at: <https://infoscience.epfl.ch/entities/publication/7864800f-6d09-4bb4-bb09-f12a335fca92> (accessed: 15.02.2025).
- [41] Boldi P., Vigna S. Axioms for centrality. *Internet Math.*, 2014, vol. 10, iss. 3–4. DOI: <https://doi.org/10.1080/15427951.2013.865686>
- [42] Piraveenan M., Prokopenko M., Hossain L. Percolation centrality: quantifying graph-theoretic impact of nodes during percolation in networks. *PLOS ONE*, 2013, vol. 8, no. 1, art. e53095. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0053095>

[43] Szczepański P., Michalak T., Rahwan T. A new approach to betweenness centrality based on the Shapley value. *Proc. 11th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, 2012, vol. 1, pp. 239–246.

[44] Brandes U. A faster algorithm for betweenness centrality. *J. Math. Sociol.*, 2001, vol. 25, iss. 2, pp. 163–177. DOI: <https://doi.org/10.1080/0022250X.2001.9990249>

[45] Serov V.A. Genetic algorithms of optimizing control of multi- objective systems under condition of uncertainty based on conflict equilibrium. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2007, no. 4 (69), pp. 70–80 (in Russ.). EDN: IJDHED

Serov V.A. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Cybersecurity Information and Analytical Systems, RTU MIREA (Vernadskogo prospekt 78, Moscow, 119454 Russian Federation).

Trubienko O.V. — Cand. Sc. (Eng.), Head of the Department of Cybersecurity Information and Analytical Systems, RTU MIREA (Vernadskogo prospekt 78, Moscow, 119454 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Serov V.A., Trubienko O.V. Hybrid model of coalition formation in network-centric systems. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2025, no. 1 (150), pp. 137–161 (in Russ.). EDN: VMUSGV