

Научная статья
УДК 519.87, 355.433
DOI: [10.34759/trd-2022-127-15](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-15)

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОГО СОСТАВА ГРУППЫ РАДИОИНФОРМАЦИОННЫХ СЕНСОРОВ ПРОСТРАНСТВЕННО-РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА

**Андрей Михайлович Казанцев^{1✉}, Марина Владимировна Кныш²,
Максим Кириллович Макаров³**

¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)
Москва, Россия

^{2,3} Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны,
Ярославль, Россия

¹kazantsev.andrei@gmail.com✉

²mariku2713@mail.ru

³mr.pnsh@mail.ru

Аннотация. В статье предложен новый методический подход к выбору рационального состава группы радиоинформационных сенсоров пространственно-распределенной системы мониторинга. В основу предлагаемого решения положены методы теории динамических графов и методов векторной дискретной оптимизации. Рассмотрены особенности формирования вариантов состава группы радиоинформационных сенсоров.

Предложен алгоритм, позволяющий на основе минимального набора признаков деятельности системы с антагонистической целевой функцией выбрать рациональный

состав группы радиоинформационных сенсоров в соответствии с иерархией связей «признаки деятельности антагонистической стороны – этапы подготовки к применению подвижных воздушных объектов – варианты применения подвижных воздушных объектов».

Ключевые слова: система мониторинга, радиоинформационные сенсоры, рациональный состав, иерархический граф, приближенное решение, признаковое пространство

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-19-00481

Для цитирования: Казанцев А.М., Кныш М.В., Макаров М.К. Выбор рационального состава группы радиоинформационных сенсоров пространственно-распределенной системы мониторинга // Труды МАИ. 2022. № 127. DOI: [10.34759/trd-2022-127-15](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-15)

Original article

SELECTION OF THE RATIONAL COMPOSITION OF THE RADIO INFORMATION SENSOR GROUP OF A SPATIALLY DISTRIBUTED MONITORING SYSTEM

Andrey M. Kazantsev¹, Marina V. Knysh², Maksim K. Makarov³

¹Moscow Aviation Institute (National Research University),
Moscow, Russia

^{2,3}Yaroslavl Higher Military School of Air Defense,
Yaroslavl, Russia

¹kazantsev.andrei@gmail.com✉

²mariku2713@mail.ru

³mr.pnsh@mail.ru

Abstract. In many application domains, group control problems arise under counteracting conditions. Examples are interaction processes of systems with conflicting and sometimes antagonistic target functions, such as a spatially distributed monitoring system (SDMS) and mobile airborne objects (MAO) penetrating into the system's area of responsibility.

However, in practice the resource of the SDMS, which determines the space review capabilities, can be limited, including due to low efficiency of ground-based radio information sensors (RIS) in detecting moving air objects at low altitudes. The specified problem can be solved by inclusion into the SDMS of mobile airborne RIS and joint application of airborne and ground-based RIS under unified control.

Thus one of the most important tasks is the fullest realization of information possibilities of all RIS for the purpose of the maximum coverage of their working zones of airspace. The solution of this problem is possible at the expense of estimation of composition and forecasting of ways of actions and tactics of application of MAO with the purpose of definition of rational structure of heterogeneous grouping of RIS of SDMS.

In the article a new methodical approach to the choice of rational composition of heterogeneous grouping of RIS of SDMS is proposed. In a basis of the offered decision methods of the theory of dynamic graphs and methods of vector discrete optimization are put. Features of formation of variants of structure of grouping of RIS are considered. An algorithm is offered, allowing on the basis of the minimum set of attributes of the adversary to choose a rational composition of heterogeneous grouping of RIS in accordance with the

hierarchy of links "attributes of the of the opposing side's activity - stages of preparation for use of MAO - variants of use of MAO".

Keywords: monitoring system, radio information sensors, rational composition, hierarchical graph, approximate solution, feature space

Funding: This work has been supported by the grants the Russian Science Foundation, RSF No. 21-19-00481

For citation: Kazantsev A.M., Knysh M.V., Makarov M.K. Selection of rational composition of heterogeneous grouping of radio information means of spatially distributed monitoring system. *Trudy MAI*. 2022, no. 127. DOI: [10.34759/trd-2022-127-15](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-15)

Введение

Во многих прикладных областях возникают задачи группового управления в условиях противодействия. Примерами могут служить процессы взаимодействия систем с конфликтными, а иногда и антагонистическими целевыми функциями. Например, взаимодействие пространственно-распределенной системы мониторинга (ПРСМ) с подвижными воздушными объектами (ВО), проникающими в зону ответственности системы мониторинга.

Очевидно, что рассмотрение такого рода систем ведется с позиции двух вариантов постановки задач и поиска их решений:

- задачи скрытного преодоления ВО зоны ответственности ПРСМ [1-7];
- задачи обнаружения ВО ПРСМ, проникающих в зону ее ответственности [8-14].

Анализ показал, что основными задачами первого типа являются задачи по оптимизации управления параметрами перемещения ВО для минимизации их обнаружения как по вероятностному [1-4], так и детерминированному

пространственно-энергетическому [1, 5-7] критериям, которые выбираются в свою очередь на основе анализа процедур обнаружения сенсорами ПРСМ.

Задачи второго типа – это задачи по управлению структурой и составом ПРСМ, оптимизация процессов пространственного размещения, выбора типов и интеграции радиоинформационных сенсоров (РИС) в систему для получения максимальной вероятности обнаружения ВО.

Однако на практике ресурс ПРСМ, определяющий возможности обзора (число сенсоров, объем рабочей зоны отдельного сенсора, общий объем рабочей зоны системы мониторинга и т.д.) может быть ограничен, в том числе из-за низкой эффективности РИС наземного базирования по обнаружению ВО на определенных высотах, их ограниченными возможностями по созданию сплошной зоны покрытия в любой точке местности и т.д. Данные обстоятельства создают благоприятные условия для проникновения ВО в зону ответственности ПРСМ.

Указанную проблему возможно решить за счет включения в состав ПРСМ подвижных РИС воздушного базирования и совместного применения РИС воздушного и наземного базирования под единым управлением. При этом, одной из важнейших задач является наиболее полная реализация информационных возможностей всех РИС с целью максимального покрытия их рабочими зонами пространства, в идеальном случае полное покрытие [9,10,15].

Это возможно за счет:

– оценки состава и прогнозирования способов действий и вариантов применения ВО с целью определения рационального состава группы РИС ПРСМ;

– оперативного управления РИС с целями создания сплошной зоны покрытия целевой зоны и его восстановления в случае внешних или внутренних воздействий на РИС.

Подготовка и применение ВО, как правило, проводится по ограниченному количеству сценариев. Идентификация конкретного сценария, как совокупности действий системы с антагонистической целевой функцией по отношению к ПРСМ, может быть проведена на основе выявленных признаков, характеризующих процесс функционирования антагонистической стороны. Но возможность их «разветвления» требует формализованного описания и изучения соответствия признаков различным сценариям действия антагонистической стороны [16,17].

Возможным вариантом решения указанной ситуации является разработка нового подхода, использующего для моделирования пространственно-распределенных и разнотипных РИС методы и теорию динамических графов [18,19] и позволяющего оценить способы и варианты действий антагонистической стороны с целью определения рационального состава группы РИС ПРСМ. Решению этого вопроса посвящена статья.

Постановка задачи определения вариантов состава группы РИС ПРСМ

Варианты применения ВО во многом определяются их готовностью к выполнению задач по предназначению, решенных в период заблаговременной подготовки. При этом, наиболее точная информация о процессах функционирования антагонистической стороны, ее отдельных средств, позволяет выделить минимальное количество вариантов применения ВО при проникновении в зону ответственности

ПРСМ из всего множества. «Сужение» множества прогнозируемых вариантов действий ВО целесообразно осуществлять на основе методов математического моделирования. Ключевым параметром для моделирования являются признаки предполагаемых действий антагонистической стороны. При этом, признаки данные могут формироваться как отдельными РИС, так и на основе обобщенной информации с нескольких РИС.

Признаки, объединенные в признаковое пространство, являются основой для разработки программно-алгоритмического обеспечения рационального выбора состава группы РИС наземного и воздушного базирования. Вместе с тем, следует отметить, что оценки признаков могут принимать как качественные (относительные, дискретные, бинарные) значения, так и количественные. Такое представление признаков позволяет расширить «спектр» используемого математического инструментария для формализации задачи определения рационального состава группы РИС ПРСМ.

Качественное описание признаков целесообразно использовать для построения дискретной признаковой модели состава группы РИС и формализации задачи рационального выбора.

Данная модель должна отражать иерархию связей «признаки деятельности антагонистической стороны – этапы подготовки к применению ВО – варианты применения ВО». При этом, определенная совокупность признаков деятельности антагонистической стороны определяет конкретный этап подготовки к применению ВО, совокупность этапов формирует определенный вариант применения ВО, а совокупность вариантов, в свою очередь, определяет варианты состава группы РИС ПРСМ.

В общем виде данное утверждение может быть представлено в виде статического графа $G = (V_1, V_2, V_3, V_4, E)$, множество вершин $V_1 = \{v_{1i}\}$ которого соответствуют множеству вариантов состава группы РИС, $i = \overline{1, I}$; $V_2 = \{v_{2j}\}$ – множеству вариантов применения ВО, $j = \overline{1, J}$; $V_3 = \{v_{3k}\}$ – множеству этапов подготовки к применения ВО, $k = \overline{1, K}$; $V_4 = \{v_{4d}\}$ – множеству признаков деятельности антагонистической стороны, $d = \overline{1, D}$. На рисунке 1 представлено схематически изображение графа $G = (V_1, V_2, V_3, V_4, E)$.

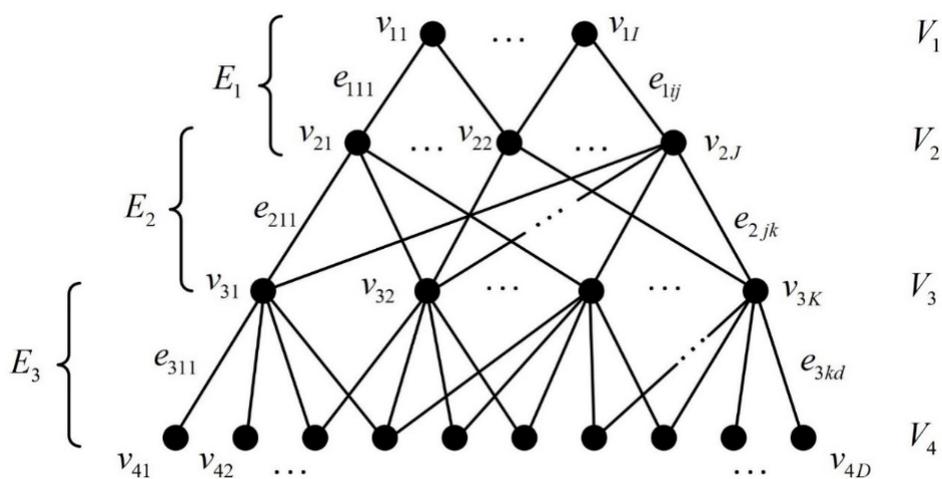


Рисунок 1. Граф взаимосвязей множества признаков деятельности антагонистической стороны, этапов подготовки к применению ВО, вариантов применения ВО и вариантов состава группы РИС ПРСМ

Множество ребер $E = \{E_1 = \{e_{1ij} = (v_{1i}, v_{2j})\}, E_2 = \{e_{2jk} = (v_{2j}, v_{3k})\},$

$E_3 = \{e_{3kd} = (v_{3k}, v_{4d})\}$ графа определяет взаимосвязи между признаками, этапами подготовки, вариантами применения и составом группы РИС. При этом ребра

характеризуют информативность (значимость вклада) признаков [20] деятельности антагонистической стороны в определенный этап подготовки к применению ВО (этапов подготовки в вариант применения ВО и т.д.) за счет весов $w(e_{1ij})$, $w(e_{2jk})$ и $w(e_{3kd})$ соответственно.

Исходя из этого формализация задачи будет представлять собой многокритериальную постановку (векторно-целевую функцию):

$$F(x) = (F_1(x), F_2(x), F_3(x)) \quad (1)$$

с частными критериями:

$$F_1(x) = \sum_{e_{1ij} \in E_{v_i}} w(e_{1ij}) + \sum_{e_{2jk} \in E_{v_i}} w(e_{2jk}) + \sum_{e_{3kd} \in E_{v_i}} w(e_{3kd}) \rightarrow \max \quad (2)$$

критерий $F_1(x)$ ориентирован на использование максимального суммарного вклада выбранных признаков при формировании состава группы РИС.

$$F_2(x) = \sum_i |V_{v_i}| \rightarrow \min \quad (3)$$

критерий $F_2(x)$ ориентирован на использование минимального количества признаков и формируемых на их основе этапов подготовки и вариантов применения ВО при формировании состава группы РИС.

$$F_3(x) = \bigcap_i V_{v_i} \rightarrow \max \quad (4)$$

критерий $F_3(x)$ ориентирован на использование в группировке максимально возможного пересечения признаков (по сенсорам) и вариантов применения ВО по различным вариантам состава группы РИС.

На рисунке 1 схематически представлен вариант решения многокритериальной задачи (1). Каждому цвету соответствует вариант состава группы РИС ПРСМ.

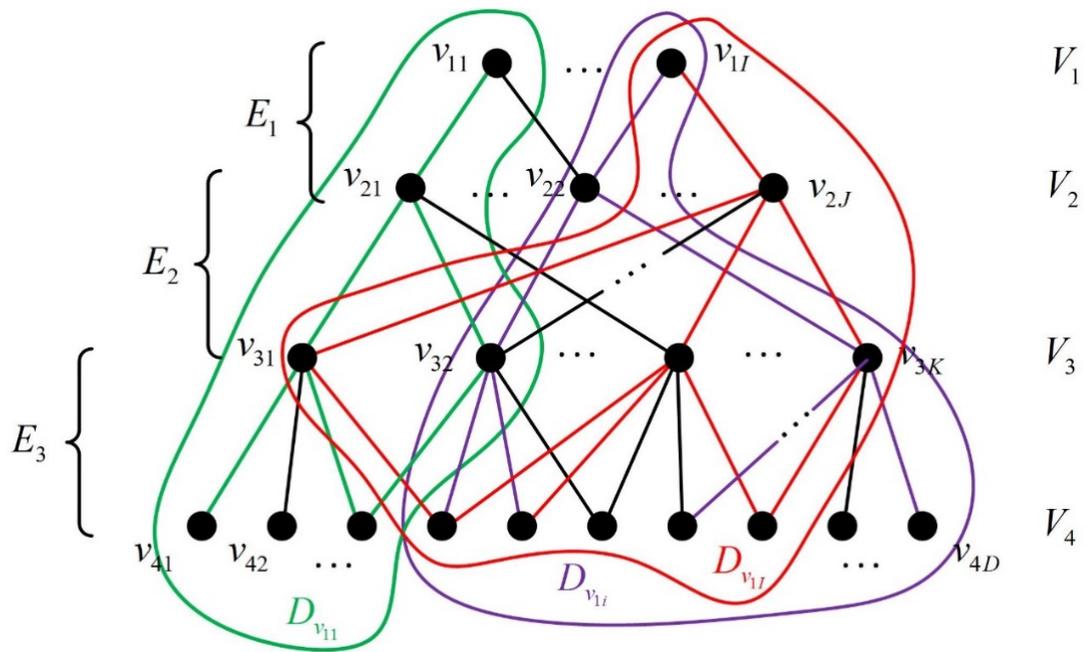


Рисунок 4. Вариант решения задачи определения рационального состава группы
РИС ПРСМ

Особенности формирования вариантов состава группы РИС ПРСМ

Предложенная постановка задачи (1)-(4) определяет ряд особенностей формирования вариантов состава группы РИС ПРСМ, которые влияют на применяемый математический аппарат при выборе рационального из них:

1. Использование в качестве источников информации о функционировании ВО различных систем и РИС требует выбора меры информативности признаков, полученных на их основе.

2. Подграф $x = \{D_{v_i} : i = \overline{1, I}\}$ графа G в общем случае [21] не является вершинным покрытием, т.е. выделяемое решение в соответствии с (2) не должно содержать всевозможные признаки деятельности антагонистической стороны, этапы

подготовки к применению ВО и варианты применения ВО, а значит для формирования варианта состава группы РИС в целом не обязательно использование всех доступных РИС.

3. Подграфы $D_{v_{i_i}} : i = \overline{1, I}$ являются связными графами, что не позволяет выделять в возможные рациональные варианты состава группы РИС те, которые не учитывают одновременно и варианты применения ВО, и этапы подготовки к применению ВО, и признаки их формирующие.

4. Для всякого решения $x = \{D_{v_{i_i}} : i = \overline{1, I}\} \in X$ подграфы $D_{v_{i_i}} : i = \overline{1, I}$ могут представлять собой непересекающиеся деревья, т.е. $\bigcap_i D_{v_{i_i}} = \emptyset$, а именно, каждый вариант применения ВО $v_{2_j} \in V_{v_{i_i}}, j = \overline{1, J}$, используется в формировании только одного варианта состава группы РИС $v_{1_i} \in V_{v_{i_i}}, i = \overline{1, I}$, как и каждый этап подготовки $v_{3_k} \in V_{v_{i_i}}, k = \overline{1, K}$ участвует в формировании одного варианта применения ВО $v_{2_j} \in V_{v_{i_i}}$ (каждый признак $v_{4_d} \in V_{v_{i_i}}, d = \overline{1, D}$ – в формировании одного этапа $v_{3_k} \in V_{v_{i_i}}$, соответственно).

Алгоритм определения рационального варианта состава группы РИС ПРСМ

Возможным вариантом решения данной задачи является применение алгоритмов дискретной оптимизации, что предполагает этапность:

Этап 0. Формирование исходных данных.

– Формирование множества признаков деятельности антагонистической стороны, этапов подготовки к применению ВО, вариантов применения ВО и вариантов

состава группы РИС ПРСМ.

– Определение вариантов взаимосвязей множества признаков деятельности, этапов подготовки, вариантов применения ВО и состава группы РИС.

Этап 1. Формирование множества векторно-несравнимых вариантов состава группы РИС ПРСМ.

1.1. Постановка многокритериальной задачи поиска рационального состава группы РИС (1) - (4).

1.2. Расчет информативности признаков деятельности антагонистической стороны, этапов подготовки, вариантов применения ВО. Для решения может быть использованы как методы Шеннона и Кульбака [22-26], так и метод, предложенный в [27].

1.3. Применение базовых алгоритмов дискретной оптимизации для построения вариантов решения $x = \{D_{v_i} = (V_{v_i}, E_{v_i}) \subseteq G : i = \overline{1, I}\} \in X$ задачи определения состава группы РИС.

Этап 2. Оценка вариантов состава группы РИС ПРСМ.

2.1. Использование трех разнотипных критериев приводит к необходимости поиска приближенных решений для определения вариантов состава группы РИС. Приближенное решение задачи с векторно-целевой функцией (1) подразумевает в общем случае определенное подмножество $X^* \subseteq X = \{x\}$ такое, что его мощность $|X^*| = |F(x)| = 3$. В таком случае абсолютная оценка (погрешность) решения X^* представляет собой вектор вычисляемых оценок:

$$\Delta(X^*) = (\Delta_1(X^*), \Delta_2(X^*), \Delta_3(X^*)),$$

$$\text{где } \Delta_{\mu}(X^*) = \max_{x^* \in X^*} \min_{\tilde{x} \in \tilde{X}} |F_{\mu}(x^*) - F_{\mu}(\tilde{x})|, \mu = 1, \overline{|F(x)|}.$$

Для разработки алгоритмов с оценками следует провести анализ целевых функций задачи (2-4) в части достижимости ими оптимальных значений на множестве допустимых решений X , характеризующих варианты состава группы РИС ПРСМ.

Суммарный вклад признаков деятельности антагонистической стороны, этапов подготовки к применению ВО и вариантов применения ВО в определение всех вариантов состава группы РИС, в соответствии с критерием (2), достигает своего максимального значения на множестве всех допустимых значений $x' \in X$, если $x' = D_{v_i} = G$. Так же, следует отметить, что решение $x' = G$ является оптимальным и для критерия (4), по требованиям которого, необходимо использовать максимальное количество признаков деятельности антагонистической стороны. Таким образом, решение $x' = G$ является оптимальным по критериям (2) и (4), т.е.

$$F_1(x') = \sum_{e_{1ij} \in E_{v_i}} w(e_{1ij}) + \sum_{e_{2jk} \in E_{v_i}} w(e_{2jk}) + \sum_{e_{3kd} \in E_{v_i}} w(e_{3kd}) = opt \text{ и } F_3(x') = V_1 = opt. \text{ При этом,}$$

учитывая, что для формирования варианта состава группы РИС должен быть использован хотя бы один признак деятельности антагонистической стороны, то для критерия (2) можно получить точную оценку при $F_2(x') = |V_1|$; $\Delta_2(x') = |V_1| - 1$.

По этой же причине критерий (2) достигает своего оптимального значения, когда для определения вариантов состава РИС используется только один признак, т.е.

$$F_2(x'') = 1 = opt, \text{ где } x'' \in X. \text{ В таком случае абсолютные оценки по двум другим}$$

критериям для решения x'' можно представить следующим образом:

$$\Delta_1(x''') = \min_{e_{1ij} \in E_1} w(e_{1ij}) + |V_1| \min_{e_{2jk} \in E_2} w(e_{2jk}) + |V_1| \min_{e_{3kd} \in E_3} w(e_{3kd}) \leq F_1(x''') \leq \\ \leq |V_2| \max_{e_{1ij} \in E_1} w(e_{1ij}) + |V_1| \max_{e_{2jk} \in E_2} w(e_{2jk}) + |V_1| \max_{e_{3kd} \in E_3} w(e_{3kd})$$

$$\Delta_3(x''') = V_1 / v, v \in V_4$$

Если же рассматривать каждое решение $x''' = \{D_{v_i} : i = \overline{1, I}\} \in X$, где подграфы D_{v_i} являются непересекающимися деревьями, то такое решение соответствует рациональному варианту взаимно-однозначного соответствия набора признаков – этапа подготовки к применению ВО – варианта применения ВО – варианта состава группы РИС ПРСМ.

Алгоритм выделения такого решения состоит из трех основных этапов, которые могут выполняться параллельно на заданном иерархическом двудольном графе G .

На первом этапе выделяется покрытие x_1''' непересекающимися звездами для двудольного графа $G_3 = (V_3, V_4, E_3)$, центрами которых являются все вершины множества V_3 . На втором этапе, аналогично, выделяется покрытие x_2''' непересекающимися звездами для двудольного графа $G_2 = (V_2, V_3, E_2)$, а на третьем x_3''' – для графа $G_1 = (V_1, V_2, E_1)$. В итоге $x''' = x_1''' \cup x_2''' \cup x_3''' = \{D_{v_i}\}$, при этом условие непересечения деревьев, $\bigcap_i D_{v_i} = \emptyset$, обеспечивается непересечением звезд в каждом покрытии x_1''', x_2''', x_3''' .

В случае, если покрытия x_1''', x_2''', x_3''' выделяются максимального веса с учетом ранжирования весов (от наибольших к наименьшим) ребер, то покрытие типа x''' можно получить следующие точные абсолютные оценки:

$$\Delta_1(x''') = 0, F_1(x''') = opt$$

$$\Delta_2(x''') = |V_1| - 1$$

Для критерия $F_3(x''')$ оценка не имеет прикладного практического значения, поскольку для решения x''' , выставлено противоположное условие по непересечению признаков при идентификации вариантов применения ВО. Но при этом рассмотрение данного случая важно для достижения понимания результатов работы алгоритмов с оценками в части поиска рационального варианта состава группы РИС ПРСМ.

2.2. Определение рационального вариантов состава группы РИС в соответствии с выбранным критерием (2) – (4).

Этап 3. Обработка информации и оценка изменений признакового пространства действий противоборствующей стороны.

Этап 4. Повторение этапов 1-2 в случае изменения признакового пространства, в противном случае применение по назначению выбранного состава группы РИС.

Таким образом, предложенный алгоритм позволяет на основе минимального набора признаков деятельности антагонистической стороны выбрать рациональный состав группы РИС ПРСМ в соответствии с иерархией связей «признаки деятельности антагонистической стороны – этапы подготовки к применению ВО – варианты применения ВО». При этом решения многокритериальной задачи выбора рационального состава формируются за счет применения алгоритмов с оценками для построения приближенных решений в связи с разнотипностью применяемых критериев.

Заключение

В настоящей работе предложен подход, основанный на использовании теории динамических графов и методов векторной дискретной оптимизации для выбора рационального состава группы РИС ПРСМ: предложенная признаково-событийная модель, позволяет на основе минимального набора признаков деятельности антагонистической стороны выбрать рациональный состав группы РИС ПРСМ в соответствии с иерархией связей признаков деятельности антагонистической стороны, этапов подготовки к применению ВО и вариантов применения ВО. Данная модель ориентирована на определение состава группы РИС на ранних этапах антагонистического взаимодействия.

Представленные в статье результаты позволяют сформулировать направления дальнейших исследований: программно-алгоритмическая реализация представленных аналитических структур признаково-событийной модели и модели антагонистического взаимодействия ПРСМ и ВО, позволяющие за счет анализа данных, генерируемых моделями, разработать методический аппарат для повышения точности оценок признакового пространства ВО.

Список источников

1. Галяев А.А., Маслов Е.П., Яхно В.П., Абрамянц Т.Г. Уклонение подвижного объекта от обнаружения в конфликтной среде // Управление большими системами. 2019. № 79. С. 112-184. DOI: [10.25728/ubs.2019.79.5](https://doi.org/10.25728/ubs.2019.79.5)

2. Zhang Z., Wu J., Dai J., He C. A Novel Real-Time Penetration Path Planning Algorithm for Stealth UAV in 3D Complex Dynamic Environment // IEEE Access, 2020, vol. 8, pp. 122757-122771. DOI: [10.1109/ACCESS.2020.3007496](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3007496)
3. Сысоев Л.П. Критерий вероятности обнаружения на траектории в задаче управления движением объекта в конфликтной среде // Проблемы управления. 2010. № 6. С. 64–70.
4. Соколов С.В., Сахарова Л.В., Манин А.А. Стохастическое управление маневром обхода группы подвижных пространственных областей // Проблемы управления. 2018. № 6. С. 73–82.
5. Корепанов В.О., Новиков Д.А. Задача о диффузной бомбе // Проблемы управления. 2011. № 5. С. 66–73.
6. Корепанов В.О., Новиков Д.А. Модели стратегического поведения в задаче о диффузной бомбе // Проблемы управления. 2015. № 2. С. 38–44.
7. Арапов О.Л., Зуев Ю.С. Формирование опорной траектории, обеспечивающей преодоление опасной зоны // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2015. № 3. С. 14–22.
8. Ефремов А.Ю., Легович Ю.С. Стайное управление малыми беспилотными летательными аппаратами в среде с препятствиями // Проблемы управления. 2019. № 3. С. 72–80. DOI: [10.25728/ru.2019.3.8](https://doi.org/10.25728/ru.2019.3.8)
9. Волхонский В.В., Малышкин С.Л. Методика анализа эффективности обнаружения нарушителя средствами системы физической защиты // Информационно-управляющие системы. 2015. № 3. С. 70–76.

10. Fan F., Ji Q., Wu G., Wang M., Ye X., Mei Q. Dynamic Barrier Coverage in a Wireless Sensor Network for Smart Grids // *Sensors*, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 41. DOI: [10.3390/s19010041](https://doi.org/10.3390/s19010041)
11. Liu B., Dousse O., Wang J., Saipulla A. Strong barrier coverage of wireless sensor networks // *Proceedings of the 9th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, 2008, pp. 411-420. DOI: [10.1145/1374618.1374673](https://doi.org/10.1145/1374618.1374673).
12. Luo J., Zou S. Strong -Barrier Coverage for One-Way Intruders Detection in Wireless Sensor Networks // *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2016, vol. 12, no. 6, pp. 16. DOI: [10.1155/2016/3807824](https://doi.org/10.1155/2016/3807824)
13. Тяпкин В.Н., Фомин А.Н., Гарин Е.Н. и др. Основы построения радиолокационных станций радиотехнических войск. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2011. - 536 с.
14. Бакулев П.А. Радиолокационные системы. – М.: Радиотехника, 2015. - 440 с.
15. Zeng X.L. Coverage-Optimized Deployment Research for Maximizing the Sensor Network Coverage // *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 713–715, pp. 1137–1140. DOI: [10.4028/www.scientific.net/amm.713-715.1137](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.713-715.1137).
16. Серебряков Ю.И., Сагаев Н.К., Ганиев А.Н., Сагаев Н.Н. Пути и способы повышения оперативности мониторинга военных конфликтов на основе ситуационного анализа // *Научная мысль*. 2020. Т. 12. № 2-1(36). С. 71-75.
17. Сагаев Н.К., Бойко С.В., Тамп Н.В., Сагаев Н.Н. Особенности методических подходов к функциональному моделированию систем (объектов) // *Научная мысль*. 2021. Т. 17. № 3-1(41). С. 106-112.

18. Кочкаров А.А., Кочкаров Р.А., Малинецкий Г.Г. Некоторые аспекты динамической теории графов // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2015. № 55(9). С. 1623–1629. DOI [10.7868/S0044466915090094](https://doi.org/10.7868/S0044466915090094)
19. Harary F., Gupta G. Dynamic Graph Models // Mathematical and Computer Modelling, 1997, vol. 25, no. 7, pp. 79–87. DOI: [10.1016/S0895-7177\(97\)00050-2](https://doi.org/10.1016/S0895-7177(97)00050-2)
20. Алдохина В.Н., Демьянов А.В., Гудаев Р.А., Бык В.С., Викулова Ю.М. Способ распознавания типа объекта в воздушно-космическом пространстве на основе анализа радиотехнических характеристик с учетом информативности признаков // Труды МАИ. 2017. № 93. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=80373>
21. Корте Б., Фиген Й. Комбинаторная оптимизация. Теория и алгоритмы. – М.: МЦНМО, 2015. – 720 с.
22. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. - М.: Иностранная литература, 1963. - 832 с.
23. Быкова В.В., Катаев А.В. Методы и средства анализа информативности признаков при обработке медицинских данных // Программные продукты и системы. 2016. № 2. С. 172–178. DOI: [10.15827/0236-235X.114.172-178](https://doi.org/10.15827/0236-235X.114.172-178)
24. Кульбак С. Теория информации и статистика. - М.: Наука, 1967. - 408 с.
25. Колесникова С.И. Методы анализа информативности разнотипных признаков // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. Обработка информации. 2009. № 1(6). С 69-80.

26. Корневский Н.А., Аксенов В.В., Родионова С.Н., Гонтарев С.Н., Лазурина Л.П., Сафронов Р.И. Метод комплексной оценки уровня информативности классификационных признаков в условиях нечеткой структуры данных // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12. № 3. С. 80–96. DOI: [10.21869/2223-1536-2022-12-3-80-96](https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-3-80-96).
27. Голомазов А.В. Метод информационной поддержки принятия решений реализуемый в среде мультиагентной системы // Труды МАИ. 2019. № 106. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=105738>

References

1. Galyaev A.A., Maslov E.P., Yakhno V.P., Abramyants T.G. *Upravlenie bol'shimi sistemami*, 2019, no. 79, pp. 112-184. DOI: [10.25728/ubs.2019.79.5](https://doi.org/10.25728/ubs.2019.79.5)
2. Zhang Z., Wu J., Dai J., He C. A Novel Real-Time Penetration Path Planning Algorithm for Stealth UAV in 3D Complex Dynamic Environment, *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 122757-122771. DOI: [10.1109/ACCESS.2020.3007496](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3007496)
3. Sysoev L.P. *Problemy upravleniya*, 2010, no. 6, pp. 64–70.
4. Sokolov S.V., Sakharova L.V., Manin A.A. *Problemy upravleniya*, 2018, no. 6, pp. 73–82.
5. Korepanov V.O., Novikov D.A. *Problemy upravleniya*, 2011, no. 5, pp. 66–73.
6. Korepanov V.O., Novikov D.A. *Problemy upravleniya*, 2015, no. 2, pp. 38–44.
7. Arapov O.L., Zuev Yu.S. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Priborostroenie*, 2015, no. 3, pp. 14–22.

8. Efremov A.Yu., Legovich Yu.S. *Problemy upravleniya*, 2019, no. 3, pp. 72–80. DOI: [10.25728/pu.2019.3.8](https://doi.org/10.25728/pu.2019.3.8)
9. Volkhonskii V.V., Malyshev S.L. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy*, 2015, no. 3, pp. 70–76.
10. Fan F., Ji Q., Wu G., Wang M., Ye X., Mei Q. Dynamic Barrier Coverage in a Wireless Sensor Network for Smart Grids, *Sensors*, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 41. DOI: [10.3390/s19010041](https://doi.org/10.3390/s19010041)
11. Liu B., Dousse O., Wang J., Saipulla A. Strong barrier coverage of wireless sensor networks, *Proceedings of the 9th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, 2008, pp. 411-420. DOI: [10.1145/1374618.1374673](https://doi.org/10.1145/1374618.1374673)
12. Luo J., Zou S. Strong -Barrier Coverage for One-Way Intruders Detection in Wireless Sensor Networks, *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2016, vol. 12, no. 6, pp. 16. DOI: [10.1155/2016/3807824](https://doi.org/10.1155/2016/3807824)
13. Tyapkin V.N., Fomin A.N., Garin E.N. et al. *Osnovy postroeniya radiolokatsionnykh stantsii radiotekhnicheskikh voisk* (Fundamentals of Construction of Radar Stations of Radio Engineering Forces), Krasnoyarsk, Sibirskii federal'nyi universitet, 2011, 536 p.
14. Bakulev P.A. *Radiolokatsionnye sistemy* (Radar systems), Moscow, Radiotekhnika, 2015, 440 p.
15. Zeng X.L. Coverage-Optimized Deployment Research for Maximizing the Sensor Network Coverage, *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 713–715, pp. 1137–1140. DOI: [10.4028/www.scientific.net/amm.713-715.1137](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.713-715.1137)
16. Serebryakov Yu.I., Sagaev N.K., Ganiev A.N., Sagaev N.N. *Nauchnaya mysl'*, 2020, vol. 12, no. 2-1(36), pp. 71-75.

17. Sagaev N.K., Boiko S.V., Tamp N.V., Sagaev N.N. *Nauchnaya mys'*, 2021, vol. 17, no. 3-1(41), pp. 106-112.
18. Kochkarov A.A., Kochkarov R.A., Malinetskii G.G. *Zhurnal vychislitel'noi matematiki i matematicheskoi fiziki*, 2015, no. 55(9), pp. 1623–1629. DOI [10.7868/S0044466915090094](https://doi.org/10.7868/S0044466915090094)
19. Harary F., Gupta G. Dynamic Graph Models, *Mathematical and Computer Modelling*, 1997, vol. 25, no. 7, pp. 79–87. DOI: [10.1016/S0895-7177\(97\)00050-2](https://doi.org/10.1016/S0895-7177(97)00050-2)
20. Aldokhina V.N., Dem'yanov A.V., Gudaev R.A., Byk V.S., Vikulova Yu.M. *Trudy MAI*, 2017, no. 93. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=80373>
21. Korte B., Figen I. *Kombinatornaya optimizatsiya. Teoriya i algoritmy* (Combinatorial optimization. Theory and algorithms), Moscow, MTsNMO, 2015, 720 p.
22. Shannon K. *Raboty po teorii informatsii i kibernetike* (Works on information theory and cybernetics), Moscow, Inostrannaya literatura, 1963, 832 p.
23. Bykova V.V., Kataev A.V. *Programmnye produkty i sistemy*, 2016, no. 2, pp. 172–178. DOI: [10.15827/0236-235X.114.172-178](https://doi.org/10.15827/0236-235X.114.172-178)
24. Kul'bak S. *Teoriya informatsii i statistika* (Information Theory and Statistics), Moscow, Nauka, 1967, 408 p.
25. Kolesnikova S.I. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika. Obrabotka informatsii*, 2009, no. 1(6), pp. 69-80.
26. Korenevskii N.A., Aksenov V.V., Rodionova S.N., Gontarev S.N., Lazurina L.P., Safronov R.I. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie*, 2022, vol. 12, no. 3, pp. 80–96. DOI: [10.21869/2223-1536-2022-12-3-80-96](https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-3-80-96)

27. Golomazov A.V. *Trudy MAI*, 2019, no. 106. URL:
<https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=105738>

Статья поступила в редакцию 27.11.2022

Статья после доработки 29.11.2022

Одобрена после рецензирования 05.12.2022

Принята к публикации 14.12.2022

The article was submitted on 27.11.2022; approved after reviewing on 05.12.2022; accepted for publication on 14.12.2022