

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.3.4>

УДК: 621.391.1, 519.1

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОГНИТИВНОЙ РАДИОСИСТЕМЫ

В.А. Головской

Краснодарское высшее военное училище
350090, Россия, г. Краснодар, ул. Красина, 4

Статья поступила в редакцию 25 января 2024 г.

Аннотация. В работе рассматривается функционирование перспективной когнитивной радиосистемы в условиях радиоэлектронного конфликта. Представлено выявленное в результате анализа литературы соответствие требуемых интеллектуальных способностей радиосистемы, решаемых за их счет задач и предлагаемых исследователями интеллектуальных алгоритмов для реализации этих способностей. Цель работы – разработать математическую модель, позволяющую описывать адаптацию конфликтно-устойчивой когнитивной радиосистемы и оценивать сложность соответствующих алгоритмов. Используются как общенаучные методы – абстрагирование, обобщение, анализ, синтез, так и методы теории графов, теории важности критериев, теории алгоритмов и теории множеств. Представлены две разработанные математические модели, первая из которых с комбинаторных позиций описывает состояние абонента когнитивной радиосистемы, вторая – обобщая первую модель, описывает функционирование конфликтно-устойчивой когнитивной радиосистемы в условиях радиоэлектронного конфликта. Последняя модель формализована с использованием теории графов – построен r -взвешенный мультиграф, вершины которого отождествлены с состояниями абонентов радиосистемы, а ребрам назначены соответствующие векторы весов.

Элементы каждого такого вектора качественно характеризуют функционирование системы по выбранным показателям. Приведен пример, в котором выбраны обобщенно характеризующие функционирование радиосистемы показатели – скрытность, помехоустойчивость, энергоэффективность и скорость передачи информации. Предложенная графовая модель позволяет обобщать описание различных методов получения знаний о среде и управления ресурсами когнитивной радиосистемы, а также позволяет оценивать вычислительную сложность алгоритмов адаптации. Также графовая модель позволяет описывать интеллектуальные способности радиосистемы как с позиций продукционного подхода, так и с позиций обучения с подкреплением. Приведенные оценки вычислительной сложности некоторых задач позволяют разделить задачи на две группы: решаемые абонентами и подсистемой управления. Показана согласованность предложений по разделению вычислительных задач с принципами трансферного обучения.

Ключевые слова: граф, модель, когнитивное радио, конфликтная устойчивость, критерий, оптимальность по Парето, радиоэлектронная обстановка.

Автор для переписки: Головской Василий Андреевич, golovskoy_va@mail.ru

Введение

Телекоммуникации, как и другие технологические отрасли экономики, в настоящее время являются объектом интеллектуализации в предположении, что последняя обеспечит повышение эффективности их функционирования [1]. Одним из подходов к интеллектуализации сферы телекоммуникаций является реализация концепции когнитивного радио.

Под когнитивной радиосистемой (КРС) понимают радиосистему [2], обладающую интеллектуальными способностями C_p , $p = \overline{1,3}$, обеспечивающими адаптацию КРС к изменяющимся условиям среды. Наличие совокупности указанных способностей отличает КРС от других современных

радиосистем. В настоящее время можно выделить следующие крупные направления исследований, соответствующие основным задачам КРС, по реализации способностей C_1 - C_3 :

- 1) анализ радиоэлектронной обстановки (РЭО) [3-8];
- 2) оптимизация управления ресурсами КРС [3, 7-12];
- 3) построение многорежимных аппаратных средств [13-15];
- 4) разработка алгоритмов трансферного обучения [16-18].

На рис. 1 приведено выявленное в результате анализа соответствие приведенных выше задач КРС, способностей C_p и реализующих их алгоритмов. Однако для существующего многообразия методов управления и формирования знаний о среде, в том числе интеллектуальных, отсутствует общая модель, позволяющая с единых позиций описывать управление и оценивать эффективность решений. Термин «Машинное обучение» на рис. 1 обобщает группу алгоритмов, относимых к интеллектуальным, таких как [3, 6, 16, 17]: Q-обучения, DQN, машины опорных векторов, вывод на основе прецедентов, сверточные нейронные сети и другие.

СПОСОБНОСТИ	АЛГОРИТМЫ	ЗАДАЧИ
C_3 : Учиться на основе полученных результатов	МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ	1, 2, 4
C_2 : Динамически и автономно корректировать свои эксплуатационные параметры и протоколы, согласно полученным знаниям, для достижения заранее поставленных целей	Светлячка, кукушки, пчелиной колонии, генетические, роя частиц, гравитационного поиска, инвазивных сорняков	2, 4
C_1 : Получать знания о своей среде эксплуатации и географической среде, об установившихся правилах и о своем внутреннем состоянии	Кукушки, пчелиной колонии, роя частиц, опыления, инвазивных сорняков	1,4

Рис. 1. Потенциальные способности КРС, алгоритмы и решаемые задачи.

Интеллектуальные вопросы являются по своей природе вычислительными задачами [1], причем, несмотря на увеличивающиеся доступные вычислительные мощности и отдельные успехи в повышении эффективности машинного обучения [18, 19], вопросы оптимизации алгоритмов стоят достаточно остро, особенно для мобильных абонентов [12, 16, 17, 20, 21].

Можно сделать вывод о необходимости создания модели, обеспечивающей конструктивное описание функционирования КРС с позиций вычислимости, позволяющей формулировать многокритериальные оптимизационные задачи, отражающие реализацию C_2 и формирование оснований для C_3 .

1. Постановка задачи.

Декларируемые [2] потенциальные способности перспективных КРС уже более 15 лет являются объектом исследований, проводимых в интересах потребителей, критически зависимых от качества предоставляемых телекоммуникационных услуг [7, 8, 11, 12, 15, 22-24]. Причина такого внимания – потенциальная возможность обеспечения электромагнитного превосходства КРС в условиях радиоэлектронного конфликта (РЭК) [8]. Приведенные выше факторы способствовали активизации исследований в представленных выше проблемных областях, направленных на использование принципов когнитивного радио для обеспечения связи робототехнических средств [24-26]. При этом существует тенденция к постоянному обострению указанного конфликта, обусловленная как усложнением содержания РЭК, так и увеличением его динамических характеристик [27-31].

Ранее автором [25, 26, и др.] предлагались решения по реализации описанных выше потенциальных способностей КРС, обеспечивающих им возможность осуществлять адаптацию, в том числе превентивную, к условиям конфликтной среды, однако не были сформулированы правила адаптации, обеспечивающие конфликтную устойчивость КРС. Под конфликтной устойчивостью понимают свойство системы определять оптимальное поведение с учетом возможных действий противостоящих сторон [28]. В монографии [8] описывается многофакторная абонентская адаптация КРС, которая обеспечивается возможностью смены всех составляющих радиопотокола, при этом отсутствует общая модель, позволяющая описывать условия и конкретное содержание такой адаптации.

Цель настоящей работы – разработать математическую модель, позволяющую описывать адаптацию конфликтно-устойчивой КРС робототехнического комплекса и оценивать сложность соответствующего алгоритма.

В качестве объекта исследования определено устойчивое функционирование абонента КРС в условиях РЭК. Предмет исследования – адаптация КРС, обеспечивающая конфликтную устойчивость ее абонентов при требуемой скорости передачи информации. Конфликтная устойчивость радиосистемы является системной характеристикой ее подсистем и методов управления [27] и может быть оценена различными показателями, среди которых существенное место занимает радиоэлектронная защищенность [28, 29], определяемая в свою очередь, скрытностью функционирования [12] и помехоустойчивостью [20, 21].

2. Построение модели.

В работах [26, 32] был развит предложенный ранее подход [25] к описанию функционирования s -го абонента КРС с использованием множества образов его потенциально возможных состояний $T^s = \{T_k^s\}, k = \overline{1, N_K}$, каждый из которых описывает состояние телекоммуникационного оборудования абонента КРС в фиксированный момент времени [32]. Множество T^s формализуется декартовым произведением множеств $M_q, q = \overline{1, N_Q}$, задающих наборы возможных значений q -й характеристики телекоммуникационного оборудования s -го абонента КРС

$$T^s = \prod_{q=1}^{N_Q} M_q = \left\{ (m_{1,l}, m_{2,v}, \dots, m_{N_Q,h}) / m_{1,l} \in M_1, \dots, m_{N_Q,h} \in M_{N_Q} \right\}. \quad (1)$$

В фиксированный момент времени конкретный образ абонента КРС $T_k \in T$ в соответствии с (1) при $N_Q = 4$ и фиксированных индексах l, v, g и h может быть описан [32], например, кортежем $T_k^s = \langle f_l, c_v, b_g, P_h \rangle$, где $f_l = m_{1,l}, m_{1,l} \in M_1$, – l -е значение центральной частоты из набора M_1 , $c_v = m_{2,v}, m_{2,v} \in M_2$, – v -я

сигнально-кодовая конструкция, $b_g = m_{3,g}$, $m_{3,g} \in M_3$, – полоса частот сигнально-кодовой конструкции, $P_h = m_{4,h}$, $m_{4,h} \in M_4$, – h -е значение мощности излучения.

Описательная модель (1) согласована с предложенным в [8] неформализованным описанием КРС, где множества M_q названы факторами, T^s – пространством адаптации, а смена s -м абонентом КРС образов в T^s с целью оптимизации показателей – параметрической многофакторной адаптацией. В пользу предлагаемого подхода к рассмотрению режимов работы КРС как результата комбинаторных операций над M_q также свидетельствует переход от использования уже ставших традиционными сигнально-кодовых конструкций к исследованиям и внедрению распределенных кодовых структур, реализующих совместное кодирование источника и канала [33].

Исходя из принятого подхода (1) к описанию состояний КРС необходимо построить математическую модель, описывающую переход КРС от образа T_k^s к образу T_j^s , обеспечивающему устойчивость КРС в условиях конфликта, в предположении существования $T_j^s = \arg \max W_{KV}$ [8], где W_{KV} – показатель конфликтной устойчивости КРС.

В работе [32] с использованием аппарата теории графов была представлена модель функционирования КРС общего пользования, однако она не учитывает аспекты антагонистической электромагнитной деятельности. Предлагается на основе результата работы [32] построить модель, адекватно описывающую устойчивое функционирование разрабатываемой КРС в условиях сложного РЭЖ.

Допущенное при описании вида (1) абстрагирование от конкретной аппаратной реализации объясняется тем, что концепция когнитивного радио базируется на технологии программно-определяемого радио, вследствие чего в составе КРС могут функционировать абоненты, использующие телекоммуникационное оборудование, реализованное на различных аппаратных платформах и имеющее различающиеся наборы M_q .

Определим общее для всех N_S абонентов КРС множество образов

$$\mathfrak{T} = \bigcap_{s=1}^{N_S} T^s, \quad s = \overline{1, N_S}. \quad (2)$$

Далее будет подразумеваться, что $T_k^s \in \mathfrak{T}$ и использоваться запись T_k вместо T_k^s , однако необходимо отметить, что содержание множества (2) может не быть фиксированным во времени ввиду возможности включения в КРС новых и исключения из нее существующих абонентов!

Переход некоторой подгруппы абонентов КРС от использования образа T_k к использованию образа T_j с учетом принятого смысла M_q согласно [8] будет являться абонентской адаптацией.

Введем в рассмотрение множество $\Theta_i \subseteq \mathfrak{T}$ пораженных образов, такое что $\Theta_i = \emptyset$ при отсутствии в i -й момент времени конфликтных воздействий, т.е. наличии у КРС возможности для взаимодействия абонентов использовать любой образ $T_k \in \mathfrak{T}$, $k = \overline{1, |\mathfrak{T}|}$, и $\Theta_i = \mathfrak{T}$ при полном поражении всех образов в \mathfrak{T} . Поставим в соответствие множеству Θ_i пустой граф $O_{i,n}$ с количеством вершин n , $n = \overline{0, |\mathfrak{T}|}$.

Будем описывать КРС в i -й момент времени конечным помеченным ориентированным мультиграфом, формализованным тройкой

$$G_i = (V, E, W), \quad (3)$$

где V – конечное множество вершин, определяемое условием

$$\forall j \exists V_j \Leftrightarrow \exists T_j : T_j \in \mathfrak{T}, T_j \notin \Theta_i, j = \overline{1, |\mathfrak{T}|};$$

E – множество ребер, определяемое условием

$$\forall j, k \exists E_{jk} \Leftrightarrow \exists V^{jk} : V^{jk} = \{V_j, V_k\}, V^{jk} \subset V, V^{jk} \not\subset O_{i,n}, j = \overline{1, |\mathfrak{T}|}, k = \overline{1, |\mathfrak{T}|};$$

$W = \{W_{i,kj}\}$ – множество векторов весов всех ребер, описывающих G_i ,

$$W_{i,kj} = [w_{i,r}(E_{kj})], \quad r = \overline{1, N_R}, \quad (4)$$

где $w_{i,r}(E_{kj})$ – r -й вес ребра E_{kj} в i -й момент времени, $|W| = |E|$. В работе [32]

было принято $N_R = 3$, в настоящей работе примем $N_R = 4$. Множество W будем строить в предположении адекватности обобщенного описания и вычислимости функций следующего семейства [32]:

$$\begin{cases} g_{i,1}(D_R, D_{ENW}, EW_I) = w_{i,1}(E_{kj}), w_{i,1}(E_{kj}) \sim K_C, \\ g_{i,2}(D_R, D_{ENW}, EW_S) = w_{i,2}(E_{kj}), w_{i,2}(E_{kj}) \sim K_{DR}, \\ g_{i,3}(D_R, D_{ENW}, EW_S) = w_{i,3}(E_{kj}), w_{i,3}(E_{kj}) \sim K_V, \\ g_{i,4}(D_R, D_{ENW}) = w_{i,4}(E_{kj}), w_{i,4}(E_{kj}) \sim K_{EE}, \end{cases} \quad (5)$$

где D_R – данные о состоянии ресурсов робототехнического средства – абонента КРС; D_{enw} – описание состояния среды, учитывающее параметры распространения радиоволн, радиоэлектронную обстановку и другие [32]; EW_I – составляющая конфликта, отвечающая за радиомониторинг; EW_S – составляющая конфликта, отвечающая за создание радиопомех для КРС. Запись $w_{i,r}(E_{kj}) \sim K_r$ означает, что величина $w_{i,r}(E_{kj})$ характеризует качественно значение показателя функционирования КРС K_r , $r = \overline{1,4}$, обеспечиваемое при переходе от вершины V_k к вершине V_j . Приняты следующие показатели: K_C – скрытность, K_V – скорость передачи информации, K_{DR} – помехоустойчивость; K_{EE} – энергетическая эффективность. Здесь и далее используется термин вершина V_k для описания состояния абонента КРС, соответствующего образу T_k . Выбраны именно указанные показатели, поскольку они являются наиболее информативными при оценивании эффективности функционирования КРС в условиях сложного РЭК [12, 20, 21, 28]. Необходимо отметить, что показатели K_r описывают обобщенно с соответствующих сторон характеристики функционирования подгруппы абонентов КРС, использующих образ $T_k \in \mathfrak{Z}$. Например, K_V характеризует именно оцениваемую скорость передачи информации по каналам подгруппы абонентов КРС с учетом текущих условий и РЭО. Описание системы (5) является предметом отдельной статьи, отметим лишь, что K_V может быть получен с использованием подхода [3],

а K_{EE} – на основе подхода [34].

Также необходимо отметить следующие важные моменты:

- в общем случае $W_{i,kj} \neq W_{i,jk}$ при $k \neq j$;
- при рассмотрении динамики РЭК $O_{i,n} \neq O_{l,n}$ и $W_{i,kj} \neq W_{l,kj}$ при $i \neq l$, что объясняется изменением РЭО ввиду активной электромагнитной деятельности сторон, адаптации сторонних радиосистем, движения абонентов, периодичностью работы некоторых радиосистем и другими факторами [32];
- даже при отсутствии конфликтных воздействий движение абонентов оказывает существенное влияние на качество связи [20].

Наличие ряда требований к качеству функционирования КРС, иногда противоречивых, приводит к необходимости решения многокритериальной оптимизационной задачи в условиях неопределенности. Проверенным инструментом для эффективного решения задач данного класса является нахождение Парето-оптимальных решений [35-37 и др.].

В целях обеспечения конфликтной устойчивости КРС будем находить решение r -критериальной задачи для r -взвешенного графа (3), под которой понимается [37] задача отыскания оптимального допустимого подграфа $H_k \in \Gamma$

$$\Pi = (f_1(H_k), \dots, f_r(H_k)), \quad (6)$$

где $f_r(H_k)$, $r = \overline{1,4}$, – вычислимые функции, определенные на множестве допустимых подграфов Γ , называемые критериями оптимальности [37].

Будем по аналогии с [37] считать, что f_r , $r = \overline{1,4}$, являются максимизируемыми.

Допустимость подграфа будет пониматься согласно [37]. Оптимальным по Парето называют не мажорируемый строго никаким другим допустимым подграфом графа G_i допустимый подграф $H_k = (\{V_j, V_k\}, E_{jk}, W_{jk})$ графа G_i [37],

где $\{V_j, V_k\} \subset V$, $E_{jk} \in E$, $W_{jk} \in W$. Понятия мажорируемости, несравнимости и оптимальности по Парето переносятся и на индикаторы качества допустимых

подграфов [37]. Любой допустимый подграф H_k имеет вектор положительных числовых характеристик $\{f_r(H_k)\}$, $r = \overline{1,4}$, называемый [37] *индикатором качества* подграфа $H_k \in \Gamma$.

Рассмотрим нахождение H_k на следующем примере, для которого задача (6) имеет тривиальный вид

$$\Pi_1 = (\max(w_{i,1}), \max(w_{i,2}), \max(w_{i,3}), \max(w_{i,4})). \quad (7)$$

Пусть состояние КРС в i -й момент времени соответствует вершине V_i . Ребро E_{12} характеризуется вектором $W_{1,2} = (2, 2, 4, 4)$, а ребра E_{11} , E_{13} и E_{15} – векторами $W_{1,1} = (4, 1, 1, 2)$, $W_{1,3} = (1, 4, 1, 3)$ и $W_{1,5} = (1, 1, 4, 4)$, которые являются индикаторами соответствующих подграфов $H_{12} = (\{V_1, V_2\}, E_{12}, W_{12})$, $H_{11} = (\{V_1\}, E_{11}, W_{11})$, $H_{13} = (\{V_1, V_3\}, E_{13}, W_{13})$ и $H_{15} = (\{V_1, V_5\}, E_{15}, W_{15})$.

Рисунок 2 имеет целью визуализировать предложенное описание КРС вида (3) с помощью размещения вершин 4-взвешенного графа G_i в трехмерном пространстве, сформированном шкалами K_V , K_{DR} и K_C . Для визуализации G_i выбраны именно этот набор показателей и представленное взаимное расположение согласованных с ними шкал, т.к., по мнению автора, они обеспечивают наибольшую наглядность. Петля, соответствующая ребру E_{11} , не представлена на рисунке ввиду особенностей используемой для написания программы и визуализации графа среды MATLAB.

При введении важности критериев [35] используют отношения безразличия I и предпочтения P^0 (P_0) между индикаторами (альтернативами). В рассматриваемом примере имеем: $W_{1,1}P^0W_{1,3}$, $W_{1,2}P^0W_{1,5}$ и $V_1P_0V_3$, $V_2P_0V_5$. Вершины V_1, V_2 и V_8 являются недоминируемыми или не мажорируемым строго вариантами, так как не существует, например, инцидентного V_1 ребра V_x , вектор весов которого бы обеспечивал $W_{1,x}P^0W_{1,1}$. Индикаторы $W_{1,1}, W_{1,2}, W_{1,8}$ несравнимы по отношению P^0 , следовательно, искомым подграф H_k может быть выбран из

$$\{H_{11}, H_{12}, H_{18}\}.$$

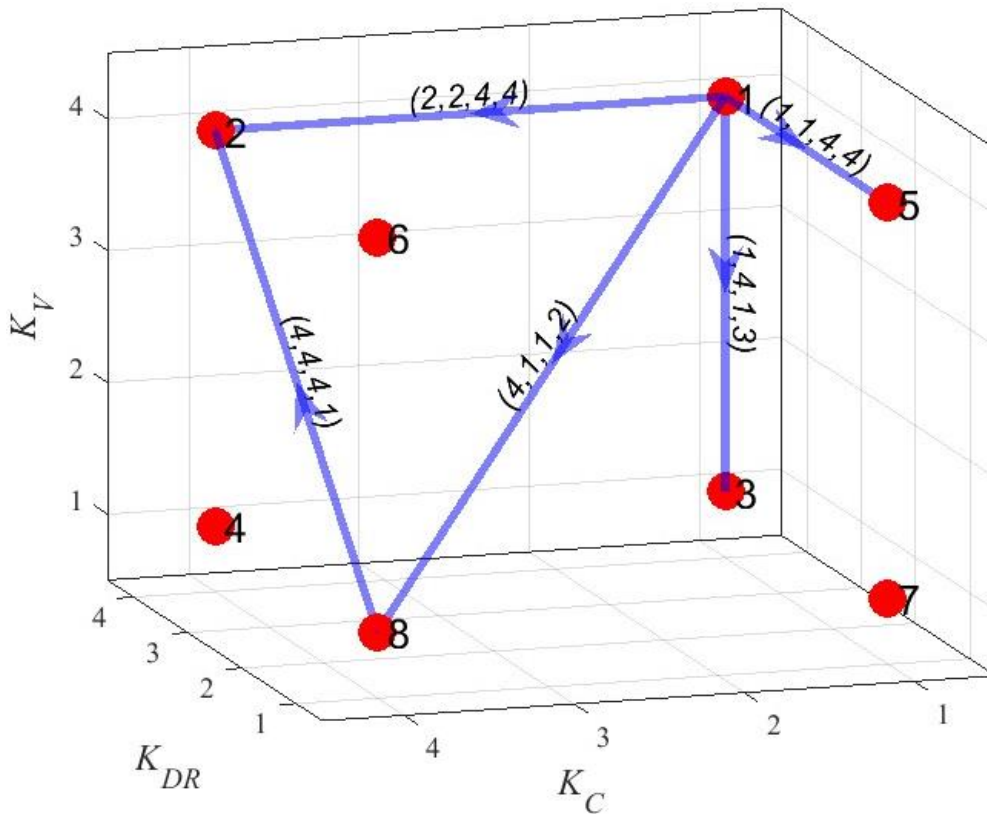


Рис. 2. Графовая модель КРС с $|\mathfrak{S}| = 8$.

Рассмотрим влияние важности критериев на сравнение векторных оценок вариантов. Пусть дана информация о важности критериев вида $\Omega_1 = \{4 \succ 2, 2 \succ 1, 1 \sim 3\}$, где запись $i \succ j$ обозначает доминирование критерия i над j , а запись $i \sim j$ – равную важность критериев i и j .

Проведем анализ многокритериальной задачи Π_1 с учетом Ω_1 . Для сравнения $W_{1,1}$ и $W_{1,8}$ построена следующая объясняющая цепочка [35]: $(1,4,4,3)I^{1\sim 3}(4,4,1,3)P^0(4,1,1,2)$, т.е. $W_{1,1}P_{\Omega}W_{1,8}$. Индикаторы $W_{1,1}$ и $W_{1,2}$ являются несравнимыми. Тогда альтернативы – вершины V_1 и V_2 – являются недоминируемыми вариантами. Искомым решением задачи (7) с учетом Ω_1 является один из подграфов $H_{11} = (\{V_1, V_1\}, E_{11}, W_{11})$ и $H_{12} = (\{V_1, V_2\}, E_{12}, W_{12})$, образующих полное множество альтернатив $A_1 = \{H_{11}, H_{12}\}$, $A_1 \subseteq \Gamma$.

Множество вершин полного множества альтернатив $A_l = \{H_k\}$, образованного с учетом Ω_l , предлагается называть кластером. Другими словами,

кластер – подмножество вершин $K_l \subset V_i$, объединенных набором предпочтений, формализуемым Ω_l . Под качеством кластера K_l будет пониматься некоторое свойство, обусловленное содержанием Ω_l , приписываемое каждой вершине множества K_l .

Кроме рассмотренного набора Ω_1 могут быть сформированы наборы $\Omega_2 = \{1 \succ 4, 1 \sim 2, 2 \sim 3\}$, $\Omega_3 = \{3 \succ 4, 4 \succ 2, 1 \sim 2\}$, $\Omega_4 = \{1 \sim 2, 1 \sim 3, 1 \sim 4\}$, $\Omega_5 = \{1 \sim 3, 1 \succ 2, 2 \sim 4\}$, $\Omega_6 = \{2 \succ 4, 4 \succ 3, 1 \sim 3\}$ и другие, отличающиеся количеством критериев и отношениями между ними. Потенциально используемые в КРС наборы объединим в эффективно нумерованное множество $\{\Omega_l\}$, $l = \overline{1, N_\Omega}$. Рисунок 3 иллюстрирует примеры кластеров, образованных приведенными выше наборами $\Omega_2 - \Omega_6$ для гипотетической КРС с $|\mathfrak{S}| = 64$.

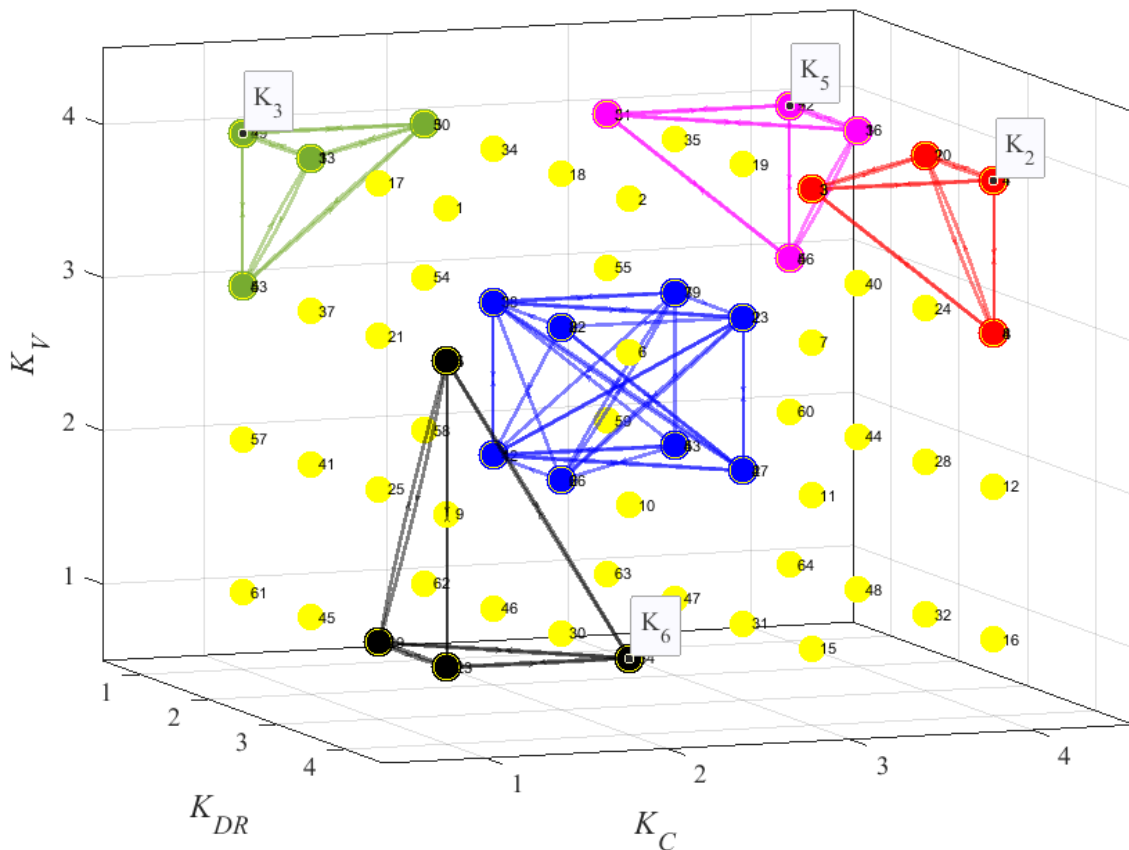


Рис. 3. Примеры кластеров.

Задача (7) вместе с Ω_1 описывают правила параметрической адаптации КРС. Предложенная в работе [26] превентивная адаптация может быть описана с помощью термина сценарий, под которым предлагается понимать направление

адаптации КРС, учитывающее приоритеты текущие и перспективные. Под приоритетом с учетом принятого подхода понимается набор Ω_l частных отношений между критериями K_r . Приоритеты и их изменения могут быть обусловлены текущими и перспективными задачами, текущими и прогнозными оценками РЭО, а также другими факторами. С учетом изложенного, сценарий предлагается описывать вектором

$$S = [k_d], d = \overline{1, N_D}, \quad (8)$$

где $k \in \overline{1, N_\Omega}$ – номер кластера в общей для \mathfrak{Z} нумерации кластеров, d – порядковый номер элемента в векторе (8). К примеру, вектор $S = [3, 1, 2, 4]$ обозначает, что КРС необходимо реализовать на графе G_i путь через кластеры $K_3 K_1 K_2 K_4$, сформированные с учетом $\Omega_3, \Omega_1, \Omega_2, \Omega_4$.

3. Обсуждение результатов.

При $|K_l| > 1$ путей на графе (3) при реализации сценария (8) может быть несколько, следовательно, реализация сценария является экземпляром массовой задачи отбора представителей кластеров, которая при $r > 1$ является NP-трудной задачей поиска Парето-оптимальных решений [38], получаемых на основе векторной целевой функции вида

$$\bar{f}(V) = \left(\sum_{d=1}^{N_D} (w_{i,1}(E_{kj}))_d, \sum_{d=1}^{N_D} (w_{i,2}(E_{kj}))_d, \sum_{d=1}^{N_D} (w_{i,3}(E_{kj}))_d, \sum_{d=1}^{N_D} (w_{i,4}(E_{kj}))_d \right).$$

Если в ограничениях задачи реализации сценария присутствует ограничение на величину r -го критерия, то будут находиться Парето-эффективные решения многокритериальной блочной задачи о рюкзаке [38], являющейся также NP-трудной. Например, при имеющем существенное значение [20] ограничении на энергетику вида $\sum_{d=1}^{N_D} (w_{i,4}(E_{kj}))_d x_d \geq N_D C$ векторная целевая функция будет иметь вид

$$\bar{f}(V) = \left(\sum_{d=1}^{N_D} (w_{i,1}(E_{kj}))_d x_d, \sum_{d=1}^{N_D} (w_{i,2}(E_{kj}))_d x_d, \sum_{d=1}^{N_D} (w_{i,3}(E_{kj}))_d x_d \right),$$

где $x_d \in \{0,1\}$, $\sum_{d \in N_D} x_d = b$, C – некоторая константа, обусловленная решаемой

КРС задачей, b – количество вхождений K_l в S .

При отсутствии антагонистической деятельности, как например в работах [3, 5, 6 и др.], за счет исключения критерия $w_{i,1}(E_{kj}) \sim K_C$ задача (6) вырождается в трехкритериальную, для которой решение будет заключаться в нахождении конкретных значений l, g для кортежа $T_k = \langle f_l, c_v, b_g, P_h \rangle$ при фиксированных v и h , т.е. при $|M_2| = |M_4| = 1$.

Приведенные NP-трудные и другие сложные в вычислительном плане задачи возможные задачи должны решаться интеллектуальной подсистемой управления КРС [26], а сформированные эвристики будут уже передаваться абонентам для нахождения частных решений, что согласуется с концепцией трансферного обучения [16, 17].

При использовании обучения с подкреплением функция ценности, стратегии и сигналы вознаграждения могут быть построены с использованием графа (3) и элементов матрицы (4).

Заключение

Предложена математическая модель функционирования КРС в условиях РЭК, согласованная, как с продукционным подходом [38], так и с парадигмой обучения с подкреплением [17, 18]. Модель (3) может быть преобразована в нечеткую путем перехода к нечеткой порядковой шкале при формировании вектора весов $w_{i,r}(E_{kj})$. При этом выбор значений нечетких квантификаторов является предметом отдельного исследования.

Модель позволяет формализовывать понятия кластер и сценарий, а также позволяет оценивать эффективность предложенных решений. Наличие сценариев обеспечивает возможность информированного поиска конкретного

решения из нескольких возможных, а также позволяет прогнозировать поведение КРС в динамике РЭЖ.

Развитие исследований представляется в доказательстве вычислимости системы (5), построении интеллектуальной системы КРС, обеспечивающей предварительное решение представленных NP-трудных задач, выбор архитектуры искусственной нейронной сети и построение функции награды для обучения с подкреплением, формирование алгоритмов трансферного обучения.

Литература

1. Hilal W., Gadsden S.A., Yawney J. Cognitive Dynamic Systems: A Review of Theory, Applications, and Recent Advances // Proceedings of the IEEE. – 2023. Vol. 111. – №. 6. – P. 575-622. <http://doi.org/10.1109/JPROC.2023.3272577>
2. Report ITU-R SM.2152. Definitions of Software Defined Radio (SDR) and Cognitive Radio System (CRS). [Электронный ресурс]. URL: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2152-2009-PDF-e.pdf (дата обращения: 11.12.2023)
3. Benmammar B. Recent Advances on Artificial Intelligence in Cognitive Radio Networks // International Journal of Wireless Networks and Broadband Technologies. – 2020. – Vol. 9. – №. 1. – P. 27-42. <http://doi.org/10.4018/IJWNBT.2020010102>
4. Голубинский А. Н. Применение искусственной нейронной сети в виде многослойного персептрона для формирования рейтинга частотных каналов в системе когнитивного радио // Теория и техника радиосвязи. – 2020. – №. 2. – С. 64-73.
5. Адамовский Е. Р., Чертков В.М., Богущ Р. П. Модель формирования карты радиосреды для когнитивной системы связи на базе сотовой сети LTE // Компьютерные исследования и моделирование. – 2022. – Т. 14. – №. 1. – С. 127-146. <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2022-14-1-127-146>

6. Kandaurova E. O., Chirov D. S. Neural Network Algorithm for Predicting Spectrum Occupancy in Cognitive Radio Systems // 2023 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), Pskov, Russian Federation. 2023. P. 1-5.
<http://doi.org/10.1109/SYNCHROINFO57872.2023.10178650>
7. Bharti B., Thakur P., Singh G. A framework for spectrum sharing in cognitive radio networks for military applications // IEEE Potentials. – 2021. – Vol. 40. – № .5. P. 39–47. <http://doi.org/10.1109/MPOT.2017.2751656>
8. Артемов М. Л., Борисов В. И., Маковий В. А., Сличенко М. П. Автоматизированные системы управления, радиосвязи и радиоэлектронной борьбы. Основы теории и принципы построения. Под. ред. М.Л. Артемова. – Москва : Радиотехника, 2021. С. 556.
9. Abdullah H. M., Kumar A., Qasem Ahmed A. A., Saeed Mosleh M. A. Hybrid Optimization Based on Spectrum Aware Opportunistic Routing for Cognitive Radio Ad Hoc Networks // Informatics and Automation. – 2023. – Vol. 22. – №. 4. – P. 880-905. <http://doi.org/10.15622/ia.22.4.7>
10. Сенин О. Г. Модель системы управления ресурсами радиолинии с применением математического аппарата нечеткой логики // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2021. – №. 9. – С. 236-242. <http://doi.org/10.24412/2071-6168-2021-9-236-242>
11. Генов А. А., Слепых А. А., Сухов А. В., Филатов В. И. Оценка воздействий случайных и преднамеренных помех на систему передачи данных с когнитивным псевдослучайным переключение рабочих частот // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №. 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.11.7>
12. Батулин А. С. Хворенков В. В., Шишаков К. В. Современные решения по повышению энергоэффективности радиолиний для технического обновления радиостанций интегрированных систем связи // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2022. – Т. 25. – №. 4. – С. 47-62. <http://doi.org/10.22213/2413-1172-2022-4-47-62>

13. Mourougayane K., Srikanth S. A tri-band full-duplex cognitive radio transceiver for tactical communications // *IEEE Communications Magazine*. – 2020. – №. 58. P. 61–65. <http://doi.org/10.1109/MCOM.001.1900329>
14. Jain P., Jaiswal R. K., Srivastava K. V., Ghosh S. An Improved Four-Port Multifunctional MIMO Antenna for Integrated Cognitive Radio System // *IEEE Access*. – 2023. – Vol. 11. – P. 66201-66211. <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3289843>
15. Борисов В. И., Вилков С. В. Технологическая платформа развития систем управления, связи и радиоэлектронной борьбы // *Теория и техника радиосвязи*. – 2023. – №. 1. – С. 5-11.
16. Nguyen C. T., Van Huynh N., Chu N. H., Saputra Y. M., Hoang D. T, Nguyen D. N., Pham Q.-V., Niyato D., Dutkiewicz E., Hwang W.-J. Transfer Learning for Wireless Networks: A Comprehensive Survey // *Proceedings of the IEEE*. – 2022. – Vol.110. – №. 8. – P. 1073-1115. <http://doi.org/10.1109/JPROC.2022.3175942>
17. Rapetswa K., Cheng L. Towards a multi-agent reinforcement learning approach for joint sensing and sharing in cognitive radio networks // *Intelligent and Converged Networks*. – 2023. – Vol. 4. – №. 1. – P. 50-75. <http://doi.org/10.23919/ICN.2023.0005>
18. Nagib A. M., Abou-Zeid H., Hassanein H. S. Accelerating Reinforcement Learning via Predictive Policy Transfer in 6G RAN Slicing // *IEEE Transactions on Network and Service Management*. – 2023. – Vol. 20. – №. 2. – P. 1170-1183. <http://doi.org/10.1109/TNSM.2023.3258692>
19. Belcak P., Wattenhofer R. Exponentially Faster Language Modelling // <https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.10770>
20. Казаков Л. Н., Кубышкин Е. П., Палей Д. Э. Построение оптимальной схемы информационного обмена системы адаптивного управления движением группы беспилотных летательных аппаратов // *Моделирование и анализ информационных систем*. – 2023. – Т. 30. – №. 1. – С. 16-26. <http://doi.org/10.18255/1818-1015-2023-1-16-26>

21. Манаенко С. С., Дворников С. В., Пшеничников А. В. Теоретические аспекты формирования сигнальных конструкций сложной структуры // Информатика и автоматизация. – 2022. – Т. 21. – №. 1. – С. 68-94. <https://doi.org/10.15622/ia.2022.21.3>
22. Cognitive Radio in NATO. STO technical report IST077/RTG-035. 2014 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.sto.nato.int/publications/STO%20Technical%20Reports/STO-TR-IST-077/STO-TR-IST-077-ALL.pdf> (дата обращения: 11.01.2024)
23. Suchański M., Kaniewski P., Romanik J., Golan E., Zubel K. Radio environment maps for military cognitive networks density of small-scale sensor network vs. map quality // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. – 2020. – Vol. 2020. – №. 1. – P. 1-20. <https://doi.org/10.1186/s13638-020-01803-4>
24. Гудков М. А., Дворников А. С., Сорокин К. Н. Применение когнитивных радиосистем для обеспечения связи с роботизированными платформами военного назначения // Труды II Военно-научной конференции «Роботизация Вооруженных Сил Российской Федерации». – М., 2017. – С. 440-444.
25. Головской В. А., Филинов В. С. Предложения по созданию когнитивных систем передачи данных для робототехнических комплексов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2019. – Т. 13. – №. 9. – С. 22–29. <http://doi.org/10.24411/2072-8735-2018-10306>
26. Головской В.А. Функциональная модель подсистемы управления ресурсами когнитивной радиосистемы робототехнического комплекса // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2023. – №. 1(231). – С. 241-251. <http://doi.org/10.18522/2311-3103-2023-1-241-251>
27. Астапенко Ю.А. и др. Конфликтно-устойчивые радиоэлектронные системы. Методы анализа и синтеза. Под ред. С.В. Ягольников. М.: Радиотехника, 2015. – С. 312.
28. Ельцов О. Н., Крутских П. П., Радзиевский В. Г. Конфликтная устойчивость роботизированных систем / под ред. В.Г. Радзиевского. М.: Радиотехника, 2023. – С. 352.

29. Сахнин А. А. Комплексная оценка радиоэлектронной защищенности военных систем связи. Монография. М.: Радиотехника, 2022. – С. 312
30. Haigh K. Z., Andrusenko J. Cognitive Electronic Warfare: An Artificial Intelligence Approach. Boston: ARTECH HOUSE, 2021. – P.288
31. Головской В. А., Чернуха Ю. В., Семенюк Д. Б. Формализация задачи построения системы передачи данных робототехнического комплекса, функционирующего в условиях антагонистической киберэлектромагнитной деятельности // Вопросы кибербезопасности. – 2019. – №. 6(34). – С.113-122. <http://doi.org/10.21681/2311-3456-2019-6-113-122>
32. Головской В. А., Влох Д. Д. Графовая модель функционирования когнитивной радиосистемы // Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. – 2023. – №. 1. – С. 11-17.
33. Балунин Е. И., Ратушин А. П., Храпков Д. С., Власов М. В. Процедура формирования и декодирования кодовых слов совместного низкоплотностного кода источника и канала // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2023. – Т. 28. – №. 3. – С. 28-37. <http://doi.org/10.18127/j5604128-202303-04>
34. Копкин Е. В., Кобзарев И. М. Использование меры ценности информации Стратоновича для оптимизации гибких программ диагностирования технических объектов // Труды СПИИРАН. – 2019. – Т. 18. – №. 6. – С. 1434-1461. <http://doi.org/10.15622/sp.2019.18.6.1434-1461>
35. Подиновский В. В. Идеи и методы теории важности критериев в многокритериальных задачах принятия решений // Монография. – М.: Наука, 2019. – С. 103.
36. Мищенко С. Е., Шацкий В. В., Землянский С. В., Литвинов А. В., Безуглов А. А. Метод амплитудно-фазового синтеза оптимальной по Парето плоской антенной решетки // Радиотехника и электроника. – 2018. – Т. 63. – №. 1. – С. 38-46. <http://doi.org/10.7868/S0033849417010053>

37. Визинг В. Г. Многокритериальные задачи на графах с максиминным критерием // Дискретный анализ и исследование операций. – 2011. – Т. 18. – №. 5 – С. 3-10.
38. Левин М. Ш. Комбинаторная оптимизация при построении конфигураций систем // Информационные процессы. – 2008. – Т. 8. – №. 4. – С. 256-300.

Для цитирования:

Головской В.А. Математическая модель функционирования когнитивной радиосистемы. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 3. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.3.4>