

ОПЕРАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ КОГНИТИВНОЙ РАДИОСИСТЕМЫ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

DOI: 10.36724/2072-8735-2024-18-5-12-20

Manuscript received 12 April 2024;
Accepted 05 May 2024

Головской Василий Андреевич,
Краснодарское высшее военное училище им. генерала армии
С.М. Штеменко (КВВУ), г. Краснодар, Россия,
golovskoy_va@mail.ru

Ключевые слова: абстракция, алгоритм, знание, когнитивное радио, массовая проблема, модель, радиосистема, радиоэлектронный конфликт, разрешимость, робототехнический комплекс

Исследование посвящено построению когнитивной конфликтно-устойчивой радиосистемы передачи данных (РС) робототехнического комплекса (РТК). Современные и перспективные требования к характеристикам РС РТК, являющиеся достаточно часто противоречивыми, обосновывают актуальность научно-технической проблемы создания эффективной унифицированной РС РТК, отвечающей всем предъявляемым требованиям. Результаты многочисленных исследований в этом направлении, направленных на решение разрозненных частных задач, в настоящее время не обеспечивают возможность их совместного использования из-за отсутствия согласованности. Настоящая работа представляет один из результатов исследований по наделению РС РТК когнитивными способностями, призванными обеспечить конфликтную устойчивость РС. Целью работы является разработка модели функционирования когнитивной РС (КРС), обеспечивающей раскрытие функционала системы через совокупность алгоритмически описанных операций. Класс моделей, к которым относится требуемая, называют операционными, а для их построения и анализа используют аппарат и абстракции теории алгоритмов. Такое абстрагирование позволяет проводить анализ функционирования системы путем декомпозиции массовой проблемы, которую призван разрешить общий алгоритм функционирования КРС, на ряд частных массовых проблем, подлежащих разрешению. Предлагаемый взгляд на функционирование с позиций вычислимости позволяет рассматривать алгоритм функционирования КРС как "конструктор" и оптимизировать распределенную разработку, анализ и испытания КРС, позволяет также выбирать различные алгоритмы и их композиции для эффективного разрешения частных проблем. В работе потенциальные способности КРС сформулированы как нетривиальные семантические свойства соответствующих алгоритмов, образующих при композиции алгоритм функционирования КРС. Сформулирована основная массовая проблема и гипотеза о её разрешимости. С целью проверки гипотезы сформулирована теорема и доказана путем декомпозиции основной массовой проблемы на частные и доказательства разрешимости каждой из них. Предложенная модель позволяет обосновывать разделение между подсистемами КРС задач обработки информации на основании их вычислительной сложности, выявлять места реализации потенциальных угроз безопасности информации, доказывать совместную эффективную реализуемость различных методов обработки информации. Вследствие этого использование разработанной операционной модели представляется целесообразной в составе соответствующего полимодельного комплекса при дальнейших исследованиях когнитивных радиосистем. Методы исследования – анализ, декомпозиция, абстрагирование, моделирование, сведение массовых проблем.

Информация об авторе:

Головской Василий Андреевич, докторант, к.т.н., доцент, Краснодарское высшее военное училище им. генерала армии С.М. Штеменко (КВВУ), г. Краснодар, Россия

Для цитирования:

Головской В.А. Операционная модель когнитивной радиосистемы робототехнического комплекса // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Том 18. №5 С. 12-20.

For citation:

Golovskoy V.A. (2024) An operational model of the cognitive radio system of a robotic complex. *T-Comm*, vol. 18, no.5, pp. 12-20. (in Russian)

Введение

Развитие телекоммуникаций вместе с интеллектуализацией автоматизированных систем и роботизацией различных сфер деятельности в настоящее время рассматриваются экспертами в качестве основных катализаторов экономического развития, социального прогресса и национального лидерства [1-4]. Исследования в указанных направлениях также являются научными основаниями реализуемого в настоящее время объединения космического, воздушного, наземного и водного пространств с кибернетическим в единое надпространство разведки, децентрализованного управления и ведения противоборства [4-7].

Существенный прогресс в указанных направлениях обусловил увеличение доли робототехнических комплексов (РТК) среди средств вооруженной борьбы и расширил перечень выполняемых РТК задач [4, 5, 8-10].

Под РТК далее понимается киберфизическая система, включающая в себя [11]:

группу робототехнических средств (РТС), в общем случае гетерогенных;

радиосистему передачи данных (РС) и подсистему обеспечения, выделяемые на логическом уровне, а не на структурном;

пункт управления, выполняющий для РС роль мастер-системы.

Разнообразие применяемых РТК обусловило востребованность создания унифицированной сетевориентированной конфликтно-устойчивой РС РТК, при этом существенным фактом является рассмотрение РТС в качестве изделия «разового» применения, ввиду чего претерпевают изменения технико-экономические требования к их подсистемам. Достоинства и недостатки унификации подсистем РТК, приведенные в [12], также относятся и к РС РТК, однако вынесены за границы исследований.

Одним из возможных направлений унификации является использование программно-определяемых платформ [11, 13-15]. При этом конфликтная устойчивость (КУ) РС РТК может быть обеспечена за счет интеллектуализации подсистемы управления этой РС, формирующей оптимальные решения в условиях радиоэлектронного конфликта (РЭК) [5, 6, 11, 14-18], который становится все более динамичным и непредсказуемым [6, 19]. Интеллектуализация изделий и автоматизированных систем, как и многие технологические революции, привела к формированию новых вызовов для исследователей. Примерами таких вызовов сейчас являются критическое усложнение задачи моделирования отклика интеллектуальной системы на взаимодействия с реальной недетерминированной средой [7, 19, 20], обуславливающее необходимость качественного пересмотра методологии испытаний таких систем, а также возникновение новых угроз, таких как атаки на модели машинного обучения [21].

В контексте когнитивного радио просматривается особенно интересное противоречие: когнитивные способности РС могут быть отнесены к некриптографическим методам защиты информации в соответствии с предложенным в работе [22] классификационным признаком, при этом для когнитивной радиосистемы (КРС) модель угроз расширяется за счет относительно новой угрозы безопасности передаваемой в РС информации – состязательных атак [21] на алгоритмы классификации.

Разнородные математические модели, соответствующие различным этапам обработки информации в КРС, модульный принцип разработки вычислительных и радиоэлектронных систем выводят на первый план требования к адекватности модели КРС, так как последняя будет реализовываться в большей степени программно. Недостаточный учет вопросов вычислительной эффективности алгоритмов приведет, например, к предложениям внедрения крайне ресурсозатратной технологии блокчейн в подсистему информационной безопасности комплекса с беспилотными летательными аппаратами [23], функционирующими в условиях критических ресурсных ограничений [2, 8].

Постановка задачи

Под КРС понимают радиосистему [24], использующую технологию, обеспечивающую следующие способности, в совокупности отличающие КРС от других современных радиосистем [15, 25]: C_1 – получать знания как о среде эксплуатации, так и о своем состоянии; C_2 – динамически и автономно корректировать свои эксплуатационные параметры согласно формируемым знаниям для достижения целей функционирования КРС; C_3 – учиться на основе полученных результатов. В работах [11, 18] предлагались подходы к наделению КРС способностью прогнозирования динамики РЭК, которая в настоящей работе будет обозначаться C_{1P} и далее считается включенной в способность C_1 .

Решению подзадач КРС в рамках реализации способностей C_1 – C_3 посвящено достаточно много исследований [3, 5, 6, 11, 14-18, 20, 21, 25-30 и др.], однако остается открытым вопрос о потенциальной возможности интеграции результатов указанных исследований в единую эффективную вычислительную систему, основанную на знаниях. Ответ на этот важный для практики вопрос сможет дать общая модель, позволяющая [2, 15]:

анализировать функционирование КРС с позиций вычислимости, что объясняется эволюцией знаний, являющейся вычислительным процессом;

обосновывать разделение между подсистемами КРС задач обработки информации на основании их вычислительной сложности;

выявлять места реализации потенциальных угроз безопасности обрабатываемой в КРС информации;

доказывать совместную эффективную реализуемость различных методов обработки информации.

Рассматривать вычислительный процесс как конструктивный объект и проводить анализ его характеристик позволяет алгоритмический подход, используемый при исследованиях алгоритмов и построении операционных моделей. Под операционной моделью принято понимать [31] раскрытие функционала моделируемой системы через совокупность алгоритмически описанных операций, в системе реализуемых.

Цель работы – разработать операционную модель конфликтно-устойчивой КРС, определенной в качестве объекта исследования. Предмет исследования – вычислительные процессы в подсистеме управления КРС, обеспечивающие КУ КРС при требуемой скорости передачи в ней информации.

ЭЛЕКТРОНИКА. РАДИОТЕХНИКА

Под КУ понимают [9] свойство системы определять свое оптимальное поведение с учетом возможных действий противостоящих в конфликте сторон.

С методологических позиций операционная модель призвана согласовать [31] между собой известные функциональную [11] и структурно-функциональную модели [18] КРС РТК, в результате анализа которых сформулирована **Гипотеза:** конфликтно-устойчивая КРС РТК со способностями C_1-C_3 реализуема. Ввиду условности деления вычислительных систем на аппаратные и программные абстрагируемся от их материального воплощения и будем на основании тезиса Тьюринга считать КРС реализуемой, при существовании машины Тьюринга (МТ), моделирующей работу КРС. Тогда данная МТ будет требуемой операционной моделью, и модель будет разрешимой [31] при вычислении ею значений целевой функции КРС, а способности C_1-C_3 будут нетривиальными семантическими свойствами этой МТ. Подтверждение выдвинутой гипотезы обеспечит положительный ответ на сформулированный выше вопрос о возможности интеграции результатов разрозненных исследований в единую КРС. С учетом принятой абстракции в работе не рассматриваются важные и актуальные задачи создания антенных и приемо-передающих систем для КРС, являющиеся объектами современных исследований [32, 33 и др.].

При использовании ставшего традиционным формализма МТ будут необходимы следующие обозначения, принятые в теории алгоритмов [34]: $code(X) \in \Sigma^*$ – слово, кодирующее объект X в алфавите Σ рассматриваемой МТ; $A(x, y) = z$ – алгоритм A останавливается на входе x, y с результатом z ; записи $A_1 \circ A_2 = A_3, A_1 \circ A_2 = A_4$ обозначают, что A_3 и A_4 являются результатами соответственно последовательной и параллельной композиции алгоритмов A_1 и A_2 ; $P_1 \leq P_2$ – сводимость известной массовой проблемы P_1 к проблеме P_2 . Под массовой проблемой принято понимать набор однотипных задач, предназначенных для программного разрешения. Алгоритмы предназначены для разрешения массовых проблем, формализуемых языками – множествами слов, достаточно подробно описывающими проблему [34]. При этом вопрос о разрешимости массовой проблемы сводится к существованию алгоритма, отвечающего на вопрос принадлежности любого слова языку проблемы.

Результаты исследования

Формализация массовых проблем. Применительно к предмету исследования описание массовой проблемы, подлежащей разрешению алгоритмом со свойствами C_1-C_3 , представимо языком

$$L_{CRS} = \{ (code(R_l), code(ENW_l))_n, code(Q_{l+\Delta}), code(Z_{l+\Delta}) \}, \quad (1)$$

где $code(R_l) = code(Q_l) \Phi_f code(Z_l)$; R_l – данные о состоянии ресурсов РТС абонентов КРС, $l = \overline{1, N_L}$; $\Phi \in \Sigma^*$; ENW_l – данные о состоянии среды, учитывающие распространение радиоволн и радиоэлектронную обстановку, в том числе и радиоэлектронное противоборство – ведение

радиомониторинга и постановку помех противостоящей стороной РЭК; Q_l – описание l -го набора эксплуатационных параметров КРС, обеспечивающего её КУ при состоянии ресурсов R в условиях среды ENW ; $Z_l, Z_{l+\Delta}$ – текущие знания и сформированные КРС на следующем шаге работы, соответственно, сущность которых будет пояснена ниже.

С целью проверки выдвинутой гипотезы сформулирована следующая **теорема:** массовая проблема (1) разрешима алгоритмом A_{CRS} управления конфликтно-устойчивой КРС РТК со способностями C_1-C_3 . Конструктивное доказательство предложенной теоремы будет заключаться в построении МТ, разрешающей L_{CRS} . Для рассмотрения и анализа функционирования КРС предлагается использовать построенную графовую модель [15].

В работе [11] было предложено описывать смену рабочих параметров КРС как переход между образами T_k и T_j в еди-

ном для N_s абонентов КРС множестве образов $\mathfrak{T} = \prod_{s=1}^{N_s} T^s,$

$s = \overline{1, N_s}$. Дальнейшие исследования [15, 25] по развитию этого подхода, являющегося естественным обобщением описаний функционирования РС с использованием сигнально-кодовых конструкций и распределенных кодовых структур [35], позволили построить следующее компактное комбинаторное описание набора доступных состояний радиооборудования s -го абонента $T^s = \{T_k\}$, называемого множеством образов:

$$T^s = \prod_{q=1}^{N_Q} M_q = \left\{ (m_1^1 m_1^2 \dots m_n^{N_Q}) / m_l^1 \in M_1, \dots, m_n^{N_Q} \in M_{N_Q} \right\},$$

$$q = \overline{1, N_Q}, \quad (2)$$

где m_l^q – l -е значений q -й характеристики радиооборудования абонента КРС.

Модель (2) позволила адекватно описывать функционирование КРС следующим мультиграфом [15], где каждому её образу $T_k \in T^s, k = \overline{1, N_K}$, поставлена в соответствие вершина $V_k \in V$ при введенном отображении $T^s \rightarrow V$:

$$G_i = (V, E, W), \quad (1)$$

где $V = \{V_j\} : \forall j \exists V_j \Leftrightarrow \exists T_j : T_j \in \mathfrak{T}, T_j \notin \Theta_i$ – множество вершин, $j = \overline{1, |\mathfrak{T}|}$; $E = \{E_{jk}\} : \forall j, k \exists E_{jk} \Leftrightarrow \exists V^{jk} : V^{jk} = \{V_j, V_k\}$ – множество ребер, $V^{jk} \subset V, V^{jk} \not\subset O_{i,n}$; $W = \{W_{i,kj}\}$ – множество векторов весов ребер, называемых также индикаторами образованных на соответствующих парах вершин подграфов, $j = \overline{1, |\mathfrak{T}|}, k = \overline{1, |\mathfrak{T}|}$,

$$W_{i,kj} = [w_{i,r}(E_{kj})], r = \overline{1, 4}, j = \overline{1, |\mathfrak{T}|}, k = \overline{1, |\mathfrak{T}|}, \quad (2)$$

где $w_{i,r}(E_{kj}) = h_{i,r}(R, ENW)$ – r -й вес ребра E_{kj} .

Для формализации графа (1) с использованием следующих правил было построено вспомогательное множество $\Theta_i \subseteq \mathfrak{Z}$ пораженных образов [15]: $\Theta_i = \emptyset$ при наличии в момент времени i у КРС возможности использовать любой образ $T_k \in \mathfrak{Z}$, $k = \overline{1, |\mathfrak{Z}|}$; $\Theta_i = \mathfrak{Z}$ при полном поражении всех $T_k \in \mathfrak{Z}$. Множеству Θ_i поставлен в соответствие пустой граф $O_{i,n}$, $n = \overline{0, |\mathfrak{Z}|}$.

Рисунок 1, полученный в результате моделирования, иллюстрирует граф G_i , до поражения образов имеющий $|V| = 64$, и сформированный в результате поражения образов граф $O_{i,10}$. Шкалы, формирующие координатное пространство для оценивания соответствующих образам вершин $V_k \in V$, являются порядковыми.

Принято, что $w_{i,r}(E_{kj}) \sim K_r$, т.е. величина K_r характеризует качественно значение r -го показателя функционирования КРС [15, 25], обеспечиваемое при переходе от V_k к вершине V_j . Выбраны наиболее информативные при оценивании КУ РС показатели [9, 15, 17]: K_{DR} – помехоустойчивости при $r = 1$, K_V – скорости передачи информации при $r = 2$, K_C – скрытности при $r = 3$, K_{EE} – энергетической эффективности.

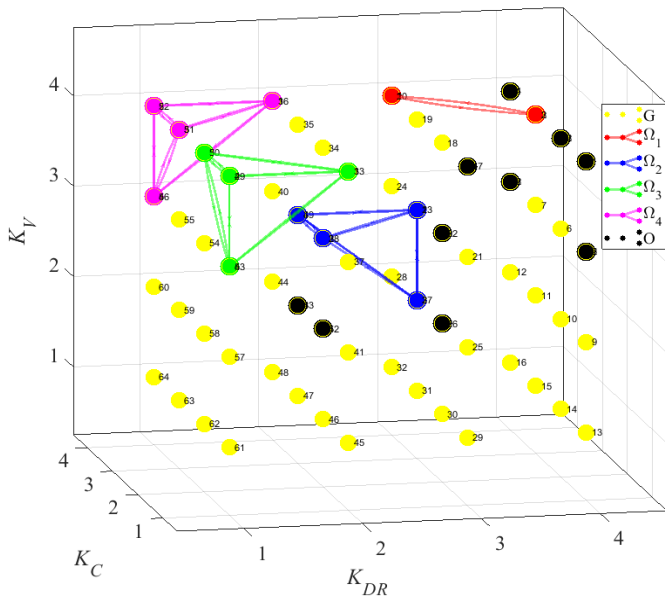


Рис. 1. Граф G_i и пустой граф $O_{i,10}$

Адаптация ресурсов КРС обеспечивает её КУ путем нахождения оптимального состояния КРС [15] как решения r -критериальной задачи $\Theta = [f_r(H_k)]$, где $f_r(H_k)$ – критерий оптимальности, т.е. такая вычисляемая функция, что $\forall r \exists k : f_r(H_k) = \max$, $r = \overline{1, 4}$. Решением задачи Θ является конечная вершина ориентированного подграфа $H_k \in G_i$.

Как указывалось выше, в работах [11, 15, 18] было предложено наделяние КРС способностью превентивной

адаптации ресурсов, обусловленной стоящими задачами и оценками C_{1P} перспектив развития РЭК. Превентивная адаптация может быть описана с использованием графа (1) и информации о принятой для решения задачи важности критериев, данные о которой традиционно [15] представлены набором вида $\Omega_i = \{i \succ j, k \sim j\}$, где запись $i \succ j$ обозначает доминирование i -го критерия над j -м, а запись $i \sim j$ – равную важность указанных критериев. С использованием Ω_i могут быть сформированы кластеры вершин $\{H_k\}_l$ и сравнены их индикаторы, а также сформированы сценарии работы КРС – направления превентивной параметрической адаптации КРС [15], формализованные векторами вида:

$$S = [q_d], q \in \overline{1, N_\Omega}, d = \overline{1, |S|}, \quad (3)$$

где q – номер кластера в общей для \mathfrak{Z} нумерации кластеров. Например, вектор $S = [4, 2, 3, 1]$ означает, что КРС для адаптации, обеспечивающей достижение цели, необходимо пройти путь через кластеры, приведенные на рисунке 1 и образованные наборами $\Omega_4, \Omega_2, \Omega_3, \Omega_1$, $\Omega_1 \neq \Omega_2 \neq \Omega_3 \neq \Omega_4$.

На основании знаний КРС будет находиться оптимальное решение, описывающее новое оптимальное состояние КРС, описываемое вершиной V_j . Сформируем массовые проблемы, разрешаемые алгоритмами с нетривиальными свойствами $C_1 - C_3$. Предлагается рассматривать обеспечивающие $C_1 - C_3$ алгоритмы, начиная с наиболее отработанных практически.

Доказательство теоремы.

Проблема параметрической адаптации КРС, обеспечиваемой способностью C_2 , формализуется языком

$$L_{C_2} = \left\{ \left(\Phi_f, \Gamma_{m,x}, \Gamma_m^\Delta, code(Z_l), \Upsilon_k \right)_l, \Upsilon_j \right\}, \quad (4)$$

где $\Gamma_{m,x} = code(EW_m) \delta_x$, $\Gamma_m^\Delta \in \{ \lambda, code(EW_m^\Delta) \}$, EW_m , EW_m^Δ – знания о РЭК и его прогнозе соответственно, λ – пустое слово, необходимое для учета возможности отсутствия прогноза РЭК; $\Upsilon_k = code(V_k)$; δ_x – знания об условиях распространения радиоволн, содержание которых будет пояснено ниже.

Для проверки проблемы (4) на разрешимость сформулирована **Лемма 1**: Проблема параметрической адаптации КРС, описываемая языком L_{C_2} , алгоритмически разрешима.

Доказательство Леммы 1. Вычисление конкретных значений сценария (3), в зависимости от дополнительных условий, является экземпляром массовой проблемы отбора представителей или многокритериальной блочной задачи о рюкзаке, которые при $r > 1$ являются NP-трудными [15, 36], описываемыми языком

$$L_{C_{2S}} = \left\{ \left(\Phi_f, \Gamma_{m,x}, \Gamma_m^\Delta, code(Z_l), \Upsilon_k \right)_l, \Pi \right\}, \quad (5)$$

где $\Pi = code(S)$.

ЭЛЕКТРОНИКА. РАДИОТЕХНИКА

Проблема (4) является при $|S|=1$ частным случаем проблемы (5), откуда следует, что $L_{C_{2S}} \leq L_{C_2}$, следовательно проблема параметрической адаптации КРС (4) алгоритмически разрешима известными алгоритмами [36]. Тогда существует разрешающий массовую проблему L_{C_2} алгоритм A_{C_2}

$$A_{C_2}(\Phi_f, \Gamma_{m,x}, \Gamma_m^\Delta, code(Z_l), Y_k) = Y_j. \quad (6)$$

Лемма 1 доказана.

Формирование знаний. Несмотря на отсутствие консенсуса в научных кругах относительно содержания термина «знание», множество подходов к его определению [37-41] объединяет взгляд на «систему, основанную на знаниях» как на формальную систему, реализующую рекурсивный вычислительный процесс по обработке некоторых конструктивных объектов. Такие объекты могут интерпретироваться как данные, информация, знания или алгоритмы, и если эти алгоритмы позволяют системе решать новые для неё задачи, то рассматриваемая «система, основанная на знаниях» относится к «сильному» искусственному интеллекту согласно предложенной в [42] дихотомии.

Исходя из цели настоящей работы под знаниями понимаются осознанные связи между зарегистрированными данными и имеющейся информацией, позволяющие осуществлять информированный поиск оптимального решения, а формирование новых знаний характеризует развитие системы, обеспечивающее снижение вычислительной сложности алгоритмически реализованных процедур указанного поиска. Анализ содержания способностей $C_1 - C_3$ позволяет отнести КРС к «слабому» искусственному интеллекту, поскольку она предназначена для решения фиксированного класса задач.

Предлагается проблему формирования знаний КРС с учетом принятых в (1) обозначений описать языком вида

$$L_{C_1} = \{ (code(R_l), code(ENW_l))_k, code(Z_{l+\Delta}) \}. \quad (7)$$

Для проверки проблемы (7) на разрешимость сформулирована **Лемма 2:** Проблема формирования знаний КРС, описываемая языком L_{C_1} , алгоритмически разрешима.

Доказательство Леммы 2. Рассмотрение предлагаемых алгоритмов работы КРС со знаниями, способствующих разрешению L_{C_1} , начнем со способности получения знаний о среде эксплуатации.

О сложности алгоритмов можно говорить только в контексте класса решаемых ими задач, поэтому необходимо понимание природы РЭК для описания знаний и алгоритмов работы с ними. При этом для корректного учета всех типов конфликтных информационных взаимодействий, характеризующих принятую модель РЭК [11, 15], необходима адекватная изменяющимся условиям среды модель распространения радиоволн [43].

Алгоритм полиномиальной сложности, формирующий знания об условиях распространения радиоволн на основании предложенного ранее метода идентификации моделей ослабления при распространении [43], разрешает массовую проблему идентификации моделей ослабления, формализуемую языком

$$L_{C_{1E}} = \{ (T_u, P_y)_l, \delta_x \}, \quad (8)$$

где $T_u = code(Pt_i)$; $P_y = code(Pr_{s,i})$; $\delta_x = code(L_x)$; Pt_i – данные о мощности излучения фиксированной антенны из состава КРС в момент времени i , дБмВт; $Pr_{s,i}$ – набор данных о принимаемой s -м абонентом мощности радиосигналов, дБмВт, и удалении РТС от фиксированной антенны, м; L_x – данные о x -й модели ослабления при эффективно заданной нумерации моделей. При использовании δ_x в (6) они интерпретируются как знания с учетом принятого определения этого термина. Разрешающий $L_{C_{1E}}$ алгоритм, описываемый как

$$A_{C_{1E}}(T_u, P_y) = \delta_x, \quad (9)$$

при необходимости может быть комплексирован с известным [41] полиномиальным алгоритмом формирования гипотез. В результате такой композиции будет получен также алгоритм полиномиальной сложности.

Наибольший вклад в усложнение прогнозирования РЭК вносит антагонистическое взаимодействие, что обусловлено, во-первых, выбранной лицом, принимающим решения, тактикой применения систем радиоэлектронного противоборства, являющейся элементом военного искусства, во-вторых, внедрением сетевидного управления и интеллектуализацией указанных систем [5-7, 9, 19]. Тем не менее, тактика применения систем радиоэлектронного противоборства может быть описана и формализована, как и почти любая человеко-машинная активность. Существующим инструментом для решения задач прогнозирования состояния среды в условиях неопределенности является обучение с подкреплением [26, 27], методология которого позволяет осуществлять прогнозирование даже без модели противника, и его гибридизация с системой нечеткого логического вывода [44].

В работе [26] приведен обзор подходов к обучению с подкреплением и показано, что сложность задач прогнозирования, решаемых при наиболее неблагоприятных данных и условиях, может находиться в классе NP-трудных задач или даже в классе PSPACE. Тогда разрешимая методами обучения с подкреплением проблема прогнозирования РЭК может быть описана языком

$$L_{C_{1P}} = \{ (\Phi_f, \Psi_h, \Gamma_{m,x})_l, \Gamma_m^\Delta \}, \quad (10)$$

где $\Psi = code(VL)$, VL – данные о носителях средств радиоэлектронного противоборства, поступающие от коалиционных систем; Γ_m^Δ – слова, отражающие вычисленные знания, которые будут отвергнуты как несостоятельные или будут использоваться как эффективные, т.е. будут участвовать в формировании весов (4), графа $O_{i,n}$ и поступят на вход (6).

Прогноз РЭК может быть вычислен алгоритмом вида

$$A_{C_{1P}}(\Phi_f, \Psi_h, \Gamma_{m,x}) = \Gamma_m^\Delta, \quad (11)$$

например, использующим логический вывод для ускорения обучения [44].

Проблема формирования знаний о состоянии РТС является более простой в комбинаторном плане, чем (10). Это

объясняется конечностью как \mathfrak{Z} , так и множеств информативных для решения задачи датчиков РТС и пространств их сигналов, что позволяет предварительно исследовать энергоэффективность всех элементов \mathfrak{Z} и ее влияние на ресурсы РТС. Данная проблема может быть формализована языком

$$L_{C_{1R}} = \{(\Phi_f, Y_k)_l, B_m\}, \quad (12)$$

где $B \in \Sigma^*$ – слово, кодирующее знания о текущем и перспективном состоянии ресурсов абонентов и V_k , которые качественно характеризуют состояние абонентов, является подсловом $code(Z)$ в (1) и (8) используются для вычисления K_{EE} в (2). Проблема (14) разрешима известными и практически отработанными алгоритмами диагностирования и прогнозирования состояния технических систем [9, 19, 20] вида

$$A_{C_{1R}}(\Phi_f, Y_k)_l = B_m. \quad (13)$$

С учетом рассмотренного содержания способности C_1 предлагается рассматривать обеспечивающий её алгоритм, как параллельную композицию алгоритмов (9) и (13)

$$A_{C_1} = A_{C_{1R}} \circ A_{C_{1E}}. \quad (14)$$

Из существования алгоритмов $A_{C_{1R}}, A_{C_{1E}}$, составляющих композицию (14) и разрешающих соответствующие проблемы (12) и (8), следует разрешимость массовой проблемы (7).

Лемма 2 доказана.

Условия функционирования налагают ряд ограничений на характеристики ресурсов КРС, одним из которых является вычислительная эффективность реализованных в ней алгоритмов [2, 8, 15]. С учетом этого предлагается следующее разделение между подсистемами КРС задач на основании их вычислительной сложности: на стороне РТС должны выполняться алгоритмы сложности, не выше полиномиальной, т.е. алгоритмы (13) и использующий сформированные в мастер-системе эвристики (6), остальные алгоритмы должны выполняться в мастер-системе на пункте управления, для чего на последний должны передаваться для агрегации телеметрируемые параметры РТС, данные VL и $Pr_{s,i}$, а также результаты анализа радиочастотного спектра. Отметим, что почти все указанные данные передаются или обрабатываются в современных РС.

Периодически получая указанные выше наборы данных, будут пересчитываться выходы A_{C_1} и A_{C_2} , обеспечивая требуемую рекурсивность формирования знаний [38-40], что обеспечит ключевую способность C_3 . Требуемая для вычисления знаний рекурсивность адекватно описывается следующей композицией МТ, разрешающих рассмотренные ранее массовые проблемы:

$$A_{C_3}(A_{C_2}(A_{C_1})) = A_{C_3}(\Phi_f, \Psi_h, T_u, P_y, code(Z_l), Y_k) = \langle code(Z_{l+\Delta}), Y_j \rangle.$$

Необходимо отметить, что в последнем выражении умышленно не учтена конкретизация знаний, используемых при первичном описании проблемы (1), так как в зависимости от

содержания проблемы использовались различные обозначения знаний: в (5) и (10) они обозначались $\Gamma_{m,x}, \Gamma_m^\Delta$, а в выражении (8) – δ_x .

С учетом сформулированных массовых проблем и разрешающих их алгоритмов интересующий алгоритм A_{CRS} , разрешающий проблему (1), представим следующей композицией алгоритмов, соответствующих способностям $C_1 - C_3$ КРС:

$$A_{CRS} = A_{C_1} \circ A_{C_2} \circ A_{C_3} = A_{C_3}(A_{C_2}(A_{C_{1R}} \circ A_{C_{1E}})).$$

Из доказанной разрешимости массовых проблем (7) и (5) соответствующими алгоритмами A_{C_1} и A_{C_2} , а также из показанного выше существования алгоритма формирования знаний A_{C_3} следует разрешимость массовой проблемы (1).

Теорема доказана.

Доказанная теорема подтвердила выдвинутую гипотезу о возможности построения КРС, обладающей указанными способностями.

Выводы

Алгоритмический подход к описанию функционирования КРС, использованный для построения операционной модели КРС, обеспечил инвариантность конкретной реализации соответствующих алгоритмов подходу к формализации и содержанию знаний. Операционная модель согласована как с подходом, использующим обучение с подкреплением [26], так и с продукционным подходом [11] к построению КРС.

Предложенная модель за счет рассмотрения общего алгоритма как композиции позволяет разделять алгоритмы в зависимости от сложности на реализуемые локально, т.е. на РТС-агентах, и реализуемые на стороне мастер-системы на пункте управления. Не рассмотрены такие частные моменты, как протоколы передачи телеметрируемых параметров, правила и методы формирования вектора (2) и эвристик для конкретных реализаций (5) и (6), которые будут решены в последующих работах.

Литература

1. Chafii M., Bariah L., Muhaidat S., Debbah M. Twelve Scientific Challenges for 6G: Rethinking the Foundations of Communications Theory // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2023. Vol. 25. Iss. 2, pp. 868-904.
2. Wang X., Guo Y., Gao Y. Unmanned Autonomous Intelligent System in 6G Non-Terrestrial Network // Information. 2024. vol. 15. No. 1:38. URL: <https://doi.org/10.3390/info15010038>.
3. Mikhaylov V.Yu., Mazepa R.B. Application of cognitive radio technologies for bus travel information support // T-Comm. 2023. Vol. 17. No. 4, pp. 39-49.
4. Weingarten J. Developing future capabilities: Robotics and autonomous systems. 7.10.2023 // NATO Parliamentary Assembly. URL: <https://www.nato-pa.int/document/2023-robotics-and-autonomous-systems-report-weingarten-034-stctts>.
5. Science & Technology Trends 2023-2043. Overview. NATO Science & Technology Organization. URL: <https://cesmar.it/wp-content/uploads/2023/04/stt23-vol1.pdf>.

ЭЛЕКТРОНИКА. РАДИОТЕХНИКА

6. Борисов В.И., Вилков С.В. Технологическая платформа развития систем управления, связи и радиоэлектронной борьбы // Теория и техника радиосвязи. 2023. № 1. С. 5-11.
7. Gunning D., Aha D.W. DARPA's Explainable Artificial Intelligence (XAI) Program // AI Magazine. 2019. Vol. 40. No. 2, pp. 44-58.
8. Пантенков Д.Г., Загнетко М.А., Литвиненко В.П. Сравнительный анализ результатов лётных испытаний передачи высокоскоростной целевой информации с модуляцией QAM и OFDM // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2022. Т. 18. № 2. С. 31-46.
9. Ельцов О.Н., Крутских П.П., Радзиевский В.Г. Конфликтная устойчивость роботизированных систем. М.: Радиотехника. 2023. 352 с.
10. Абросимов В.К., Седов А.Н. Эффективность выполнения коллективной миссии многоагентной гетерогенной группой // Известия ЮФУ. Технические науки. 2023. № 1(231). С. 6-19.
11. Головской В.А. Функциональная модель подсистемы управления ресурсами когнитивной радиосистемы робототехнического комплекса // Известия ЮФУ. Технические науки. 2023. № 1(231). С. 241-251.
12. Бочаров Н.А. Исследование подходов к унификации бортовых вычислительных комплексов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2023. № 1(231). С. 275-287.
13. Семенов Д.С., Труш Б.В. Когнитивная платформа построения инфокоммуникационной сети робототехнических комплексов специального назначения // Научная мысль. 2022. Т. 22. № 4-1(46). С. 80-85.
14. Лаута О.С., Гудков М.А., Баранов В.В., Максимова Е.А. Когнитивная платформа построения инфокоммуникационной сети робототехнических комплексов специального назначения // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 10: Инновационная деятельность. 2017. Т. 11. № 4. С. 15-23.
15. Головской В.А. Математическая модель функционирования когнитивной радиосистемы // Журнал радиоэлектроники. 2024. № 3. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.3.4>.
16. Bharti B., Thakur P., Singh G. A framework for spectrum sharing in cognitive radio networks for military applications // IEEE Potentials. 2021. Vol. 40. No. 5, pp. 39-47.
17. Батурич 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.
18. Головской В.А., Филинов В.С. Предложения по созданию когнитивных систем передачи данных для робототехнических комплексов // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2019. Т. 13. №9. С. 22-29.
19. Haigh K.Z., Nguyen T. Challenges of testing cognitive EW systems // 2023 IEEE AutoTestCon, National Harbor, MD, USA. 2023, pp. 1-8.
20. Головской В.А. О проблеме ограниченности при исследованиях когнитивных радиосистем // Радиолокация, навигация, связь: Сборник трудов XXIX Международной НТК, посвященной 70-летию кафедры радиофизики ВГУ (г. Воронеж, 18-20 апреля 2023 г.). Воронеж: ВГУ, 2023. Т. 5. С. 283-287.
21. Fernando P., Wei-Kocsis J. Stealthy Adversarial attacks against automated modulation classification in cognitive radio // 2023 IEEE Cognitive Communications for Aerospace Applications Workshop (CCAAW), Cleveland, OH, USA, 2023. pp. 1-6.
22. Махов Д.С. Анализ некриптографических методов защиты информации в радиоканалах информационных систем // Вопросы кибербезопасности. 2024. № 1(59). С. 82-88.
23. Швидченко С.А., Иванов С.В., Хорольский Е.М., Савельев И.В. Один из эффективных подходов к защите информации в радиолиниях робототехнических комплексов с группами беспилотных летательных аппаратов на основе блокчейн технологии // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2022. Т. 14. № 5. С. 21-28.
24. Report ITU-R SM.2152. Definitions of Software Defined Radio (SDR) and Cognitive Radio System (CRS). URL: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2152-2009-PDF-e.pdf.
25. Головской В.А., Влох Д.Д. Графовая модель функционирования когнитивной радиосистемы // Труды Северо-Кавказского филиала МТУСИ. 2023. № 1. С. 11-17.
26. 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. No. 1, pp. 50-75.
27. Benmammar B. Recent advances on artificial intelligence in cognitive radio networks // International Journal of Wireless Networks and Broadband Technologies. 2020. Vol. 9. No. 1, pp. 27-42.
28. 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. No. 8, pp. 1073-1115.
29. 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, pp. 880-905.
30. Адамовский Е.Р., Чертков В.М., Богуш П.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.
31. Микони С.В., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов: монография. М.: РАН, 2018. 314 с.
32. Mourougayane K., Srikanth S. A tri-band full-duplex cognitive radio transceiver for tactical communications // IEEE Communications Magazine. 2020. № 58, pp. 61-65.
33. 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, pp. 66201-66211.
34. Захаров В.Н., Козмидиади В.А. О соотношении классов сложности машин Тьюринга // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2017. Т. 57. № 4. С. 730-743.
35. 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.
36. Левин М.Ш. Комбинаторная оптимизация при построении конфигураций систем // Информационные процессы. 2008. Т. 8. № 4. С. 256-300.
37. Baumann R., Strass H. An Abstract, Logical Approach to Characterizing Strong Equivalence in Non-monotonic Knowledge Representation Formalisms // Artificial Intelligence. 2022. Vol. 305, pp. 103680.
38. 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. No. 6, pp. 575-622.
39. Burgin M. Operations with Nested Named Sets as a Tool for Artificial Intelligence // Big Data and Cognitive Computing. 2022. Vol. 6. URL: <https://doi.org/10.3390/bdcc6020037>.
40. Костенко К.И. Сравнение формализмов знаний // Интеллектуальные системы. Теория и приложения. 2014. Т. 18. № 2. С. 115-132.
41. Виноградов Д.В. О вычислительной эффективности извлечения знаний вероятностными алгоритмами // Искусственный интеллект и принятие решений. 2023. № 4. С. 29-37.
42. Каляев И.А. Как измерить искусственный интеллект? // Искусственный интеллект и принятие решений. 2023. № 1. С. 3-11.
43. Головской В.А. Об идентификации модели ослабления при распространении радиоволн // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2022. Т. 14. № 5. С. 38-44.
44. Еремеев А.П., Сергеев М.Д., Петров В.С. Интеграция методов обучения с подкреплением и нечеткой логики для интеллектуальных систем реального времени // Программные продукты и системы. 2023. Т. 36. № 4. С. 600-606.

AN OPERATIONAL MODEL OF THE COGNITIVE RADIO SYSTEM OF A ROBOTIC COMPLEX

Vasiliy A. Golovskoy, Krasnodar Higher Military School named after S.M. Shtemenko, Krasnodar, Russia, golovskoy_va@mail.ru

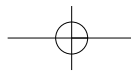
Abstract

The research is devoted to the construction of a cognitive conflict-resistant radio data transmission system (RS) of a robotic complex (RTK). Modern and promising requirements for the characteristics of the RTK RS, which are quite often contradictory, justify the relevance of the scientific and technical problem of creating an effective unified RTK RS that meets all the requirements, which are quite often contradictory. The results of numerous studies in this direction aimed at solving disparate particular problems currently do not provide the possibility of their joint use due to lack of consistency. This paper presents one of the results of research on the endowment of RTK RS with cognitive abilities designed to ensure the conflict stability of RS. The aim of the work is to develop a model of the functioning of cognitive RS (CRS), which provides disclosure of the system's functionality through a set of algorithmically described operations. The class of models to which the required one belongs is called operational, and for their construction and analysis, the apparatus and abstractions of the theory of algorithms are used. Such abstraction makes it possible to analyze the functioning of the system by decomposing the mass problem, which the general algorithm of cattle functioning is designed to solve, into a number of particular mass problems to be resolved. The proposed view of functioning from the standpoint of computability allows us to consider the algorithm of cattle functioning as a "constructor" and optimize the distributed development, analysis and testing of cattle, also allows us to choose various algorithms and their compositions for the effective resolution of particular problems. In this paper, the potential abilities of cattle are formulated as non-trivial semantic properties of the corresponding algorithms that form the algorithm of cattle functioning in the composition. The main mass problem and the hypothesis of its solvability are formulated. In order to test the hypothesis, a theorem is formulated and proved by decomposing the main mass problem into quotients and proving the solvability of each of them. Examples of estimates of the complexity of the particular algorithms that make up the composition are given. The proposed model makes it possible to justify the separation of information processing tasks between the subsystems of the CRS based on their computational complexity, identify places of implementation of potential threats to information security, and prove the joint effective feasibility of various information processing methods. As a result, the use of the developed operational model seems appropriate as part of the corresponding polymodel complex in further studies of cognitive radio systems. Research methods - analysis, decomposition, abstraction, modeling and reduction of mass problems.

Keywords: abstraction, algorithm, knowledge, cognitive radio, mass problem, model, radio system, electronic conflict, solvability, robotic complex.

References

1. M. Chafii, L. Bariah, S. Muhaidat, M. Debbah, "Twelve Scientific Challenges for 6G: Rethinking the Foundations of Communications Theory," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2023, Vol. 25. Iss. 2, pp. 868-904.
2. X. Wang, Y. Guo, Y. Gao, "Unmanned Autonomous Intelligent System in 6G Non-Terrestrial Network," *Information*. 2024. Vol. 15. No. 1:38. URL: <https://doi.org/10.3390/info15010038>.
3. V.Yu. Mikhaylov, R.B. Mazepa, "Application of cognitive radio technologies for bus travel information support," *T-Comm*. 2023. Vol. 17. No. 4, pp. 39-49.
4. J. Weingarten, "Developing future capabilities: Robotics and autonomous systems," NATO Parliamentary Assembly. URL: <https://www.nato-pa.int/document/2023-robotics-and-autonomous-systems-report-weingarten-034-stccts>.
5. Science & Technology Trends 2023-2043. Overview. NATO Science & Technology Organization. URL: <https://cesmar.it/wp-content/uploads/2023/04/stt23-voll.pdf>.
6. V.I. Borisov, S.V. Vilkov, "Technological platform for the development of control systems, communications and electronic warfare," *Theory and technology of radio communication*. 2023. No. 1, pp. 5-11.
7. D. Gunning, D.W. Aha, "DARPA's Explainable Artificial Intelligence (XAI) Program," *AI Magazine*. 2019. Vol. 40 (2), pp. 44-58.
8. D.G. Pantenkov, M.A. Zagnetko, V.P. Litvinenko, "Comparative analysis of the results of flight tests of transmission of high-speed target information with QAM and OFDM modulation," *Bulletin of Voronezh state technical university*. 2022. Vol. 18. No. 2, pp. 31-46.
9. O.N. El'cov, P.P. Krutskih, V.G. Radzievskij, "Conflict resistance of robotic systems," Moscow: Radiotekhnika, 2023. 352 p.
10. V.K. Abrosimov, A.N. Sedov, "Efficiency of the collective mission by a multiagent heterogeneous group," *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2023. No. 1 (231), pp. 6-19.
11. V.A. Golovskoy, "The functional model of the resource management subsystem of the cognitive radio system of the robotic complex," *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2023. No. 1 (231), pp. 241-251.
12. N.A. Bocharov Study of approaches to the unification of on-board computers, *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2023. No. 1 (231), pp. 275-287.
13. D.S. Semenov, B.V. Trush, "Cognitive platform for building infocommunication network special purpose robotic complexes," *Scientific thought*. 2022. Vol. 22, No. 4-1(46), pp. 80-85.
14. O.S. Lauta, M.A. Gudkov, V.V. Baranov, E.A. Maksimova, "Cognitive platform for building the infocommunication network of robotic special-purpose systems," *Bulletin of the Volgograd state university. Series 10: Innovative activities*. 2017. Vol. 11. No. 4. pp. 15-23.



ЭЛЕКТРОНИКА. РАДИОТЕХНИКА

15. V.A. Golovskoy, "Mathematical model of functioning cognitive radio system," *Journal of Radio Electronics*. 2024. No. 3. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.3.4>.
16. B. Bharti, P. Thakur, G. Singh, "A framework for spectrum sharing in cognitive radio networks for military applications," *IEEE Potentials*. 2021. Vol. 40. No. 5, pp. 39-47.
17. A.S. Baturin, V.V. Hvorenkov, K.V. Shishakov, "Modern Solutions to Improve the Energy Efficiency of Radio Lines for the Technical Renewal of Radio Stations of Integrated Communication Systems," *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*. 2022. Vol. 25. No. 4, pp. 47-62.
18. V.A. Golovskoy, V.S. Filinov, "Proposals for the creation of cognitive data transmission systems for robotic complex," *T-Comm*. 2019. Vol. 13. No. 9, pp. 22-29.
19. K.Z. Haigh, T. Nguyen, "Challenges of testing cognitive EW systems" *2023 IEEE AutoTestCon, National Harbor, MD, USA*. 2023, pp. 1-8.
20. V.A. Golovskoy, "On the problem of limitations in the research of cognitive radio systems," *Radiolocation, navigation, communications. Proceedings of the XXIX International Scientific and Technical Conference*. 2023. Voronezh. Vol. 5, pp. 283-287.
21. P. Fernando, J. Wei-Kocsis, "Stealthy Adversarial attacks against automated modulation classification in cognitive radio," *2023 IEEE Cognitive Communications for Aerospace Applications Workshop (CCAAW)*. Cleveland, OH, USA, 2023, pp. 1-6.
22. D.S. Makhov, "Analysis of non-cryptographic information protection methods in wireless information systems," *Voprosy kiberbezopasnosti*. 2024. No. 1(59), pp.82-88.
23. S.A. Shvidchenko, S.V. Ivanov, E.M. Khorolsky, I.V. Saveliev, "One of the effective approaches to protecting information in the radio links of robotic complexes with groups of unmanned aerial vehicles based on blockchain technology," *H&ES Research*. 2022. Vol. 14. No. 5, pp. 21-28.
24. Report ITU-R SM.2152. Definitions of Software Defined Radio (SDR) and Cognitive Radio System (CRS). URL: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2152-2009-PDF-e.pdf.
25. V.A. Golovskoy, D.D. Vlokh, "Graph model of functioning cognitive radio system," *Proceedings of the North Caucasus branch of the Moscow technical university of communications and informatics*. 2023. No. 1, pp. 11-17.
26. K. Rapetswa, L. Cheng, "Towards a multi-agent reinforcement learning approach for joint sensing and sharing in cognitive radio networks," *Intelligent and Converged Networks*. 2023. No. 1, pp. 50-75.
27. B. Benmamar, "Recent Advances on Artificial Intelligence in Cognitive Radio Networks," *International Journal of Wireless Networks and Broadband Technologies*. 2020. Vol. 9. No. 1, pp. 27-42.
28. C.T. Nguyen, N. Van Huynh, N.H. Chu, Y.M. Saputra, D.T. Hoang, D.N. Nguyen, Q.-V. Pham, D. Niyato, E. Dutkiewicz, W.-J. Hwang, "Transfer Learning for Wireless Networks: A Comprehensive Survey," *Proceedings of the IEEE*. 2022. Vol. 110. No. 8, pp. 1073-1115.
29. H.M. Abdullah, A. Kumar, A.A. Qasem Ahmed, M.A. Saeed Mosleh, "Hybrid Optimization Based on Spectrum Aware Opportunistic Routing for Cognitive Radio Ad Hoc Networks," *Informatics and Automation*. 2023. Vol. 22. No. 4, pp. 880-905.
30. Y.R. Adamovskiy, V.M. Chertkov, R.P. Bohush, "Model for building of the radio environment map for cognitive communication system based on LTE," *Computer research and modeling*. 2022. Vol. 14. No. 1, pp. 127-146.
31. S.V. Mikoni, B.V. Sokolov, R.M. Yusupov, "Qualimetry of models and polymodel complexes," Moscow: RAS, 2018. 314 p.
32. K. Mourougayane, S. Srikanth, "A tri-band full-duplex cognitive radio transceiver for tactical communications," *IEEE Communications Magazine*. 2020. No. 58, pp. 61-65.
33. P. Jain, R.K. Jaiswal, K.V. Srivastava, S. Ghosh, "An Improved Four-Port Multifunctional MIMO Antenna for Integrated Cognitive Radio System," *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. pp. 66201-66211.
34. V.N. Zakharov, V.A. Kozmidiadi, "On relationships between complexity classes of Turing machines," *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2017. Vol. 57. No. 4. pp. 726-738.
35. E.I. Balunin, A.P. Ratushin, D.S. Khrapkov, M.V. Vlasov, "Procedure for generating and decoding codewords of a joint low-density source and channel code," *Electromagnetic waves and electronic systems*. 2023. Vol. 28. No. 3, pp. 28-37.
36. M.Sh. Levin, "Combinatorial optimization in the construction of system configurations," *Information processes*. 2008. Vol. 8. No. 4, pp. 256-300.
37. R. Baumann, H. Strass, "An Abstract, Logical Approach to Characterizing Strong Equivalence in Non-monotonic Knowledge Representation Formalisms," *Artificial Intelligence*. 2022. Vol. 305, pp. 103680.
38. W. Hilal, S.A. Gadsden, J. Yawney, "Cognitive Dynamic Systems: A Review of Theory, Applications, and Recent Advances," *Proceedings of the IEEE*. 2023. Vol. 111. No. 6, pp.575-622.
39. M. Burgin, "Operations with Nested Named Sets as a Tool for Artificial Intelligence," *Big Data and Cognitive Computing*. 2022. Vol. 6. URL: <https://doi.org/10.3390/bdcc6020037>.
40. K.I. Kostenko, "Comparison of knowledge formalisms," *Intelligent Systems. Theory and Applications*. 2014. Vol. 18. No. 2, pp. 115-132.
41. D.V. Vinogradov, "On computational efficiency of knowledge extraction by probabilistic algorithms," *Artificial intelligence and decision making*. 2023. No.4, pp. 29-37.
42. I.A. Kalyaev, "How to measure artificial intelligence?," *Artificial intelligence and decision making*. 2023. No. 1, pp. 3-11.
43. V.A. Golovskoy, "On the identification of the attenuation model in the propagation of radio waves," *H&ES Research*. 2022. vol. 14. No. 5, pp. 38-44.
44. A.P. Ereemeev, M.D. Sergeev, V.S. Petrov, "Integration of reinforcement learning methods and fuzzy logic for intelligent real-time systems," *Software & Systems*. 2023. Vol. 36. No. 4, pp. 600-606.

Information about author:

Vasiliy A. Golovskoy, cand. of eng. sc., assistant of professor, doctorant. Krasnodar Higher Military School named after S.M. Shtemenko, Krasnodar, Russia, ORCID 0000-0001-5651-4893

