УДК 621.391.81:510.53:004.89 DOI 10.18522/2311-3103-2023-1-241-251

В.А. Головской

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПОДСИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ КОГНИТИВНОЙ РАДИОСИСТЕМЫ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Исследование посвящено повышению эффективности функционирования робототехнических комплексов (РТК) за счет повышения конфликтной устойчивости их радиосистем передачи данных (РС). Наличие устойчивой тенденции к усложнению условий функционирования РТК обуславливает ужесточение требований к характеристикам РС РТК. Также на эти возрастающие требования накладывает ограничения необходимость функционирования в условиях сложного радиоэлектронного конфликта, под которым понимается одновременное наличие антагонистического, коалиционного и индифферентного конфликтных электромагнитных взаимодействий. Предлагается для обеспечения требуемой конфликтной устойчивости наделить РС РТК когнитивными способностями, которые позволят осуществлять адаптацию ресурсов РС РТК к динамично изменяющимся условиям среды функционирования, в том числе – к перспективным. Цель работы – разработка функциональной модели подсистемы управления ресурсами когнитивной РС РТК, формализация которой позволит анализировать взаимосвязь структуры модели и свойств моделируемой системы. Приведена функциональная модель предлагаемой подсистемы управления телекоммуникационными ресурсами когнитивной РС РТК. Предложенная декомпозиция общей модели позволяет с конструктивистских позиций рассматривать алгоритм управления рассматриваемой подсистемой. Предложенный подход к построению указанного алгоритма базируется на теории финитных комбинаторных процессов Поста, эквивалентной другим известным подходам к формализации алгоритмов. Выбор указанной модели обоснован и согласован с актуальными подходами к построению баз знаний, предлагаемых для использования в развиваемой подсистеме. Выдвинутая гипотеза о потенциальной конфликтной устойчивости РС РТК подтверждена примером, в качестве которого рассмотрен конфликт с информационно-технической системой, способной осуществлять целевые электромагнитные воздействия. При этом рассмотрение комплексного понятия конфликтная устойчивость ограничено анализом одной из его ключевых составляющих – радиоэлектронной защищенности. Предложено рассмотрение указанного конфликта как экземпляра массовой проблемы. Доказана неразрешимость предложенной массовой проблемы прогнозирования путем сведения к ней известной проблемы останова детерминированной машины Тьюринга.

Функциональная модель; алгоритм; робототехнический комплекс; массовая проблема; когнитивное радио; радиосистема; радиоэлектронный конфликт.

V.A. Golovskoy

THE FUNCTIONAL MODEL OF THE RESOURCE MANAGEMENT SUBSYSTEM OF THE COGNITIVE RADIO SYSTEM OF THE ROBOTIC COMPLEX

The study is devoted to improving the efficiency of the functioning of robotic complexes (RTCs) by increasing the conflict stability of their data transmission radio systems (RS). The presence of a stable tendency to complicate the operating conditions of the RTK causes stricter requirements for the characteristics of the RTK RS. Also, these increasing requirements are limited by the need to function in conditions of a complex electronic conflict, which means the simultaneous presence of antagonistic, coalition and indifferent conflicting electro-magnetic interactions. In order to ensure the required conflict stability, it is proposed to endow the RTK RS with cognitive abilities that will allow the adaptation of the RTK RS resources to dynamically changing conditions of the functioning environment, including promising ones. The purpose of the work is to develop a functional model of the resource management subsystem of the cognitive RS RTK, the formalization of which will allow analyzing the relationship between the structure of the model and the properties of the simulated system. The functional model of the proposed subsystem for the

management of telecommunication resources of the cognitive RS RTK is given. The proposed decomposition of the general model allows us to consider the control algorithm of the subsystem under consideration from a constructivist perspective. The proposed approach to the construction of this algorithm is based on the theory of finite combinatorial Post processes, equivalent to other well-known approaches to the formalization of algorithms. The choice of this model is justified and consistent with the current approaches to the construction of knowledge bases proposed for use in the developed subsystem. The hypothesis put forward about the potential conflict stability of the RTK RS is confirmed by the example, as which the conflict with an information technology system capable of carrying out targeted electromagnetic effects is considered. At the same time, consideration of the complex concept of conflict stability is limited to the analysis of one of its key components – electronic security. It is proposed to consider this conflict as an instance of a mass problem. The unsolvability of the proposed mass prediction problem is proved by reducing to it the well-known problem of stopping a deterministic Turing machine.

Functional model; algorithm; robotic complex; problem; cognitive radio; radio system; electronic conflict.

Введение. Настоящий технологический уклад характеризуется увеличением роли интеллектуализированных технических средств в различных сферах жизнедеятельности общества. К указанным средствам относятся и робототехнические комплексы (РТК), используемые, в том числе, для нужд обороны и обеспечения безопасности государства [1–6].

Радиоэлектронный конфликт (РЭК), заключающийся в ведении его участниками радиоэлектронной борьбы и разведки, становится все более актуальной стороной активного противоборства [7–11], что обусловливает ужесточение условий функционирования РТК и, соответственно, требований к их характеристикам. Примерами таких, иногда противоречивых, характеристик могут быть автономность РТК, ресурсные ограничения и конфликтная устойчивость радиосистем передачи данных (РС) РТК [2, 3, 12].

Каналы РС являются наиболее уязвимым местом РТК при рассмотрении неогневых воздействий, следовательно характеристики РС определяют состояние защищенности ресурсов РТК и способность выполнять поставленные задачи [8].

Под РТК в работе понимается киберфизическая система, включающая в себя:

- группу выполняющих специальные задачи робототехнических средств (РТС), в общем случае гетерогенных;
- пункт управления, осуществляющий управление и обработку информации;
- РС и подсистемы обеспечения.

Будем полагать по аналогии с [8], что являющаяся объектом исследования РС РТК обеспечивает:

- обмен разнородными данными между РТС и пунктом управления, а также между РТС в группе;
- ретрансляцию сигналов как для нужд РТК, так и для коалиционных систем.

Постановка задачи. В целях обеспечения требуемых характеристик РС РТК ранее предлагалось [13, 14 и др.] наделение подсистем управления ресурсами РС РТК когнитивными способностями, заключающимися в возможностях получения знаний о среде эксплуатации и о своем внутреннем состоянии, динамически и автономно корректировать свои эксплуатационные параметры и протоколы согласно формируемым знаниям для достижения поставленных целей, а также позволяющие системе учиться на основе полученных результатов [15].

Принципы функционирования когнитивных радиосистем (КРС) впервые были предложены применительно к задачам более эффективного использования радиочастотного спектра [16]. При последующем развитии этой тематики сформировались следующие основные направления исследований: оценивание радиочастотного спектра [17–19] и оптимизация функционирования КРС [20, 21].

В настоящее время исследования, посвященные использованию принципов когнитивного радио для обеспечения комплексной безопасности РС, функционирующих в условиях РЭК, активно проводятся всеми технологически развитыми государствами [11, 22–25]. Причиной такой активности является потенциальная возможность обеспечения электромагнитного превосходства за счет использования КРС в фиксированной пространственной области в условиях сложного РЭК [11, 26, 27], под которым понимается одновременное наличие антагонистического, коалиционного и индифферентного конфликтных электромагнитных взаимодействий [8]. Необходимо отметить, что в настоящее время имеет место тенденция к постоянному обострению РЭК, обусловленная усложнением содержания и увеличением его динамики [8].

В работах [14, 28] были предложены принципы функционирования подсистемы управления ресурсами КРС РТК, однако они не были достаточно обоснованы и не было показано их влияние на конфликтную устойчивость РС РТК.

Цель работы – разработка функциональной модели подсистемы управления телекоммуникационными ресурсами когнитивной РС РТК, формализация которой позволит анализировать взаимосвязь структуры модели и свойств моделируемой системы.

Предлагаемая функциональная модель подсистемы управления телекоммуникационными ресурсами когнитивной конфликтно-устойчивой РС РТК представлена на рис. 1 с использованием нотации IDEF0.

Рис. 1. Модель функционирования рассматриваемой подсистемы

В качестве телекоммуникационных ресурсов КРС рассматриваются диапазоны частот, ширина спектра сигналов, тип сигнально-кодовой конструкции, тип мультиплексирования, режим работы, типы пакета и другие, позволяющие в системном единстве обеспечивать требуемые характеристики РС РТК [14].

Приняв в качестве допущения, что входящий в диаграмму поток «Аппаратное обеспечение», выполняющий роль нерасходуемого ресурса моделируемой системы, реализуем и полностью удовлетворяет предъявляемым требованиям, рассмотрим содержание потоков «Данные», «Целевые установки», «Принятые решения» и «Программное обеспечение».

С учетом того, что для РС необходимы знания о среде эксплуатации, включающие данные о распространении радиоволн, необходимые для прогнозирования изменений характеристик среды и выбора, исходя из этого прогноза, оптимальной конфигурации телекоммуникационных ресурсов РС, предлагается декомпозиция общей модели, приведенная на рис. 2.

Рассмотрим предлагаемое содержание нерасходуемого ресурса «Программное обеспечение», которым выступает алгоритм управления телекоммуникационными ресурсами КРС.

Для требуемого алгоритма A^{CRS} входом должны быть [14, 28, 29]: данные о внешней среде (χ) и о состоянии абонента КРС (β), а также целевые установки (τ), определяющие приоритеты функционирования, а выходом – описание требуемого состояния его телекоммуникационного оборудования $(\omega_{k+\Delta_k})$, т.е.

$$\mathrm{A}^{CRS}(\chi,\beta,\tau)=\omega_{k+\Delta_k}. \qquad (1)$$

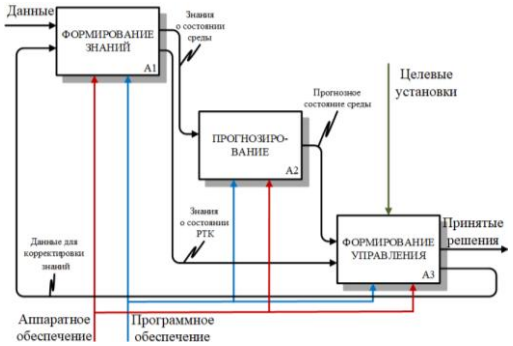

Рис. 2. Функциональная модель подсистемы управления ресурсами РС РТК

Модель алгоритма управления ресурсами. Требуемый алгоритм может быть формализован при помощи любой из известных эквивалентных вычислительных моделей. Предлагается для построения модели алгоритма A^{CRS} использовать аппарат продукционных систем, поскольку этот подход имеет ряд таких достоинств, существенных для рассматриваемой проблемной области, как возможность автоматического формирования знаний и относительная простота создания и актуализации продукционной базы знаний [29, 30].

Продукционные системы оперируют со словами, построенными в основном и вспомогательном алфавитах. Исходя из этого опишем состояния КРС при помощи слов – конечных последовательностей элементов алфавита. Далее в работе слово $qwerty$ из множества непустых слов в конечном алфавите $A=\{q,w,e,r,t,y,\ldots,x\}$ будет обозначаться $qwerty\in A^{+}$, префикс qw слова $qwerty$ будет обозначаться $qw\sqsubseteq qwerty$.

В работах [14, 29] было предложено использование множества образов $\Omega=\{\omega_q\}, q=\overline{1,N_Q}$, каждый из которых позволяет описать уникальное состояние телекоммуникационного оборудования КРС словом из множества

$$\Omega=\prod_{i=1}^{N_I}M_i=\left\{\left(m_j^1 m_v^2\ldots m_l^{N_I}\right)_k\right\},\ i=\overline{1,N_I}, q=\overline{1,N_Q}, \tag{2}$$

где M_i – конечное множество, задающее набор возможных значений i-й характеристики телекоммуникационного оборудования КРС, $m_j^1\in M_1, m_v^2\in M_2,\ldots,m_l^{N_I}\in M_{N_I}$. Слово ω_q описывает состояние телекоммуникационного оборудования КРС, и следовательно, состояние соответствующей рассматриваемому абоненту КРС логической радиолинии [11]. При этом необходимо отметить, что имеет место соотношение [29]

$$|\Omega|<\prod_{i=1}^{N_I}|M_i|.$$

Предлагается в развитие работы [29] формализовать A^{CRS} с помощью продукционной системы

$$\mathrm{A}^{CRS}=\langle E,B,V,\Pi\rangle, \tag{3}$$

где $E=\mathrm{P}\bigcup\mathrm{T}$ – основной алфавит, содержащий следующие подмножества: $\mathrm{P}=\{\rho_e\}, e=\overline{1,N_E}$, – алфавит для описания текущей и перспективной радиоэлектронной обстановки и условий распространения радиоволн в ограниченной области пространства;

$\mathrm{T}=\mathrm{A}\bigcup\mathrm{M}$ – алфавит, содержащий подмножества для описания состояний КРС $\mathrm{M}=\left(m_j^1,m_v^2,\ldots,m_l^{N_l}\right)$ и РТС $\mathrm{A}=\{\alpha_r\}, r=\overline{1,N_{\mathrm{A}}}$, $\mathrm{P}\bigcap\mathrm{T}=\varnothing$; $B=\{b_f\}$, $f=\overline{0,N_F}$, – вспомогательный алфавит, содержащий символы, необходимые для разделения терминальных слов от нетерминальных; $V=\{x_p\}, p=\overline{1,N_P}$, – алфавит переменных; $E\bigcap B\bigcap V=\varnothing$; $\Pi=\{\pi_u\}$, $u=\overline{1,N_U}$, – совокупность продукций в алфавитах E, B и V, содержащая как продукции-аксиомы, так и продукции, не являющиеся таковыми.

Все слова из Ω выводимы при помощи системы (3), т.е. она описывает с конструктивистских позиций способ построения интересующего алгоритма (1), являющегося перечисляющим для словарного множества Ω.

С учетом принятых обозначений модель, приведенная на рис. 2, может быть пояснена следующим образом.

На вход А1 поступают подготовленные «Данные», т.е. наборы данных о внешней среде $\chi=\langle\rho_e,t_s\rangle$ и о состоянии РТС $\beta=\langle\{\alpha_r\},m_j^1,m_v^2,\ldots,m_l^{N_l}\rangle$. Наборы β поступают с датчиков и систем РТК и по сути являются телеметрируемыми параметрами. Наборы χ могут быть получены из принятых радиоволн $\{\rho_e\}$ и от коалиционных информационно-технических систем $\{t_s\}$.

Знания о своей среде эксплуатации должны учитывать характеристики распространения радиоволн на занимаемой территории, которые в настоящее время с достаточной точностью описываются соответствующими моделями ослабления [14, 31]. Вследствие этого из блока А1 на вход А2 поступают знания о среде эксплуатации, полученные за счет предложенных в работе [31] процедур, в виде слов

$$\chi^k=\{env_m\}, env_m\in\left(\mathrm{P}\bigcup V\right)^+, \tag{4}$$

а на вход в А3 знания о состоянии РТК

$$\beta^k=\{r_st_j\}, r_st_j\in\left(\mathrm{T}\bigcup V\right)^+, \tag{5}$$

где $crs_st_j\sqsubseteq r_st_j$ – знания о состоянии КРС.

На основании сформированных в блоке А1 знаний (4) в блоке А2 формируются прогнозные оценки состояния среды, включающие знания об антагонистической электромагнитной деятельности

$$\chi_\Delta^k=\{env_{m+\Delta m}\}, env_{m+\Delta m}\in\left(\mathrm{P}\bigcup V\right)^+.$$

На основании знаний о среде (4) и о состоянии РТК (5), а также «Целевых установок» τ в блоке А3 формируются «Принятые решения» δ на выбор нового состояния телекоммуникационного оборудования КРС, описываемого словом $\omega_{q+\Delta_q}\in\Omega$, т.е. $\delta_y\left(\omega_q\right)=\omega_{q+\Delta_q}, y=\overline{1,N_Y}$. На алгоритмическом уровне δ_y является следствием выбора на основании целевых установок τ той или иной группы продукций-неаксиом из Π.

Из блока А3 на вход А1 поступают знания о новом состоянии РС

$$\beta^k=\{crs_st_{j+\Delta j}\}, crs_st_j\in\left(\mathrm{M}\bigcup V\right)^+, \tag{6}$$

учитывающие текущую и перспективную адаптацию КРС.

Предложенная формализация функциональной модели алгоритмом (3) позволяет, с одной стороны, получить достаточно полное представление об основных этапах обработки «данных-информации-знаний», с другой стороны, – за счет общего описания функционирования блоков А1, А2, А3 учитывать возможность различного методического наполнения указанных блоков. Например, содержание блока А3 может быть описано путем указания конкретных методов адаптации радиосистем к помеховой обстановке, достаточно хорошо проработанных и продолжающих развиваться.

Рассмотрим применение предложенной формализации алгоритма (1) к вопросу анализа конфликтной устойчивости абонента КРС. При этом остановимся только на рассмотрении одной составляющей конфликтной устойчивости – радиоэлектронной защищенности.

Интеллектуализация средств радиоэлектронной борьбы [9, 11, 27] ведет к сокращению времени анализа результатов разведки при повышении его качества, а также к прогнозированию действий противостоящей стороны РЭК.

Далее в соответствии с предложенным в [32] подходом будет рассматриваться с теоретико-алгоритмических позиций РЭК абонента КРС с антагонистической информационно-технической системой (АИТС), способной вести целевую электромагнитную деятельность (ЦЭМД). При этом приняты допущения:

- необходимым и достаточным условием реализации ЦЭМД в отношении абонента КРС является успешно проведенная его идентификация в результате прогнозирования АИТС состояния абонента КРС на основании имеющихся описаний A^{CRS} и данных о текущем состоянии абонента КРС (ω_q);
- при рассмотрении алгоритмов функционирования АИТС и A_{CRS} принята абстракция потенциальной осуществимости.

С учетом принятых допущений особый интерес представляет вопрос о наличии у АИТС потенциальной возможности прогнозировать состояния КРС.

При проведении исследований сформулирована следующая **гипотеза**: предложенные потенциальные когнитивные способности абонента КРС способствуют максимизации радиоэлектронной защищенности абонента КРС от ЦЭМД, реализуемой АИТС при РЭК.

В целях проверки выдвинутой гипотезы с позиций теории алгоритмов сформулирована следующая теорема: проблема прогнозирования (P_{prog}), заключающаяся в получении перспективного исчерпывающего описания прогнозного состояния абонента КРС по результатам применения алгоритма функционирования КСР к описанию ω_q, является алгоритмически неразрешимой для АИТС. Предлагается следующая формулировка указанной проблемы: разрешимо ли для АИТС множество

$$L_{P_{prog}} = \left\{ \omega_{q+\Delta_q} \right\},\ q = \overline{1, N_Q}, \tag{7}$$

при известном исчерпывающем описании текущего состояния КРС вида ω_q ?

Доказательство. Для определения разрешимости проблемы (7) используем метод сведения [33]. Предлагается свести известную массовую проблему останова машины Тьюринга к рассматриваемой проблеме прогнозирования.

При разрешимости проблемы останова была бы разрешима и следующая проблема, получаемая из (7) в результате некоторой её тривиальной модификации:

$$L_{P_{prog}} = \left\{ \mathrm{K}(A_{CRS}), \omega_q \right\}, \tag{8}$$

где $\mathrm{K}(A_{CRS})$ – кодировка алгоритма A_{CRS} для соответствующей машины Тьюринга**.**

Теорема доказана.

Доказанная теорема позволяет сделать вывод о том, что сформулированная массовая проблема прогнозирования является алгоритмически неразрешимой для АИТС, что подтверждает выдвинутую гипотезу.

Заключение. Предложенная функциональная модель подсистемы управления телекоммуникационными ресурсами КРС отражает основные этапы обработки данных, информации и знаний в рассматриваемой подсистеме с целью получения описания требуемого состояния телекоммуникационного оборудования КРС, которое позволит обеспечить необходимый уровень конфликтной устойчивости КРС. Принятый в работе уровень абстракции позволяет использовать для формализации алгоритма (1) любую из известных эквивалентных вычислительную модель, однако принятая в работе формализация с помощью аппарата продукционных систем удобна еще и тем, что представляет собой простейший из формализмов знаний. Таким образом предложенная модель инвариантна конкретному методическому наполнению блоков А1, А2, А3, описывающих содержание основных этапов обработки данных, информации и знаний, так и способам формализации указанного методического наполнения.

Практическая значимость представленных результатов заключается в их потенциальной применимости к перспективным разработкам в области создания когнитивных радиосистем передачи данных и радиоэлектронной борьбы [9, 11]. Указанная выше инвариантность функциональной модели её алгоритмическому наполнению обеспечивает соблюдение принципов стека технологий «когнитивное радио/программно-определяемое радио» [34].

Предложенные в работе функциональная модель и модель алгоритма позволяют проводить дальнейшие исследования в направлении развития когнитивных конфликтно-устойчивых радиосистем передачи данных РТК. Непосредственное развитие исследований, результаты которых приведены в настоящей статье, видится в программной реализации алгоритма управления телекоммуникационными ресурсами КРС, для чего представляется необходимым формализация алгоритмов формирования знаний о среде и о состоянии КРС, а также алгоритма прогнозирования состояния среды, и последующая композиция указанных алгоритмов. При этом необходимо будет решить следующие вопросы из области теоретического программирования: выбор адекватных математических моделей программ, планирование испытаний КРС с учетом сформулированной проблемы прогнозирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ичетовкин В.В.* Факторы, определяющие содержание способов применения робототехнических комплексов (средств) в боевых действиях // Военная мысль. – 2022. – № 7. – С. 110-114.
2. *Горский А.С., Демьянов В.В., Жуков А.О.* Проблемные вопросы создания наземных робототехнических комплексов // Робототехника и техническая кибернетика. – 2022. – Т. 10, № 2.– С. 154-160.
3. *Романюта А.Е.* Состояние и перспективы развития робототехнических комплексов военного назначения // Роботизация Вооружённых Сил Российской Федерации: Сб. статей V военно-научной конференции, Анапа, 29–30 июля 2020 г. – Анапа: ФГАУ «Военный инновационный технополис «ЭРА», 2020. – Т. 1. – С. 20-24.
4. U.S. Ground Forces Robotics and Autonomous Systems (RAS) and Artificial Intelligence (AI): Considerations for Congress, 20.11.2018 // Project on Government Secrecy Federation of American Scientists. – URL: https://fas.org/sgp/crs/weapons/R45392.pdf.
5. *Sharif H. Calfee* Delivering Advanced Unmanned Autonomous Systems and Artificial Intelligence for Naval Superiority, 25.05.2021 // The Center for Strategic and Budgetary Assessments. – URL: https://csbaonline.org/research/publications/delivering-advanced-unmanned-autonomous-systems-and-artificial-intelligence-for-naval-superiority/publication/1.
6. *Mahnken T.G., Sharp T., Kim G.B.* Deterrence by Detection: A Key Role for Unmanned Aircraft Systems in Great Power Competition. – 2020. – URL: https://csbaonline.org/research/publications/deterrence-by-detection-a-key-role-for-unmanned-aircraft-systems-in-great-power-competition.

7. *Clark B., McNamara W.M., Walton T.A.* Capability Analysis - Winning the Invisible War: Gaining an Enduring Advantage in the EMS, 2020. – URL: https://csbaonline.org/uploads/documents/CIMSEC_Winning_the_Invisible_War__Gaining_an_Enduring_Advantage_in_the_EMS.pdf.
8. *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.
9. *Haigh K.Z., Andrusenko J.* Cognitive Electronic Warfare: An Artificial Intelligence Approach. – Boston: Artech House, 2021. – 288 p.
10. *Наговицин А.И., Молоткова Б.Б., Азимов Д.У.* Автоматизированная система контроля за назначением радиочастот на основе риск-ориентированного подхода при планировании радиосвязи в подразделениях робототехнических комплексов военного назначения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 1 (225). – С. 59-70.
11. *Артёмов М.Л., Борисов В.И., Маковий В.А., Сличенко М.П.* Автоматизированные системы управления, радиосвязи и радиоэлектронной борьбы. Основы теории и принципы построения. – М.: Радиотехника, 2021. – 556 с.
12. *Соколов С.М.* Онтологический подход в создании робототехнических комплексов с повышенной степенью автономности // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 1 (225). – С. 42-59.
13. *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.
14. *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.
15. 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.
16. *Mitola J., Maguire G.Q.* Cognitive radio: making software radios more personal // IEEE Personal Communications. – 1999. – Vol. 6, Issue 4. – P. 13-18.
17. *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.
18. *Eappen G., Shankar T.* Hybrid PSO-GSA for energy efficient spectrum sensing in cognitive radio network // Physical Communication. – 2020. – Vol. 40. – URL: https://doi.org/10.1016/j.phycom.2020.101091.
19. *Giral D., Hernández C., Salgado C.* Spectral decision for cognitive radio networks in a multi-user environment // Heliyon. – 2021. – Vol. 7, Issue 5. – URL: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07132.
20. *Peter G., Livin J.* Hybrid optimization algorithm based optimal resource allocation for cooperative cognitive radio network // Array. – 2021. – No. 12. – URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590005621000400.
21. *Alnabelsi S.H., Salameh H.B., Saifan R.R., Darabkh K.A.* A multi-layer hyper-graph routing with jamming-awareness for improved throughput in full-duplex cognitive radio networks // Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences. – 2022. – URL: https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2022.01.003.
22. *Matyszkiel R., Kaniewski P., Polak R., Laskowski D.* Selected methods of protecting wireless communications against interferences // 2019 International Conference on Military Communications and Information Systems (ICMCIS). – Budva: IEEE, 2019. – P. 1-5.
23. *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. – P. 39-47.
24. *Tuukkanen T., Couturier S. Buchin B., Bräysy T., Krygier J., Verheul E., Le Nir V., Smit N.* Assessment of cognitive radio networks through military capability development viewpoint // 2018 International Conference on Military Communications and Information Systems (ICMCIS). – 2018. – P. 1-8.
25. *Mourougayane K., Srikanth S.* A tri-band full-duplex cognitive radio transceiver for tactical communications // IEEE Communications Magazine. – 2020. – No. 58. – P. 61-65.

26. Cognitive Radio in NATO. STO technical report IST077/RTG-035. 2014. – URL: https://www.sto.nato.int/publications/STO%20Technical%20Reports/STO-TR-IST-077/$$$TR-IST-077-ALL.pdf.
27. Field Manual 3-12. Cyberspace and electronic warfare operations. Department of the Army. Washington, DC, April 2017. – URL: https://www.cyberwar.nl/d/fm3_12.pdf.
28. *Головской В.А.* Принципы создания базы знаний конфликтно-устойчивой системы передачи данных робототехнических комплексов военного назначения // Информационная безопасность – актуальная проблема современности. Совершенствование образовательных технологий подготовки специалистов в области информационной безопасности. – 2020. – Т. 1, № 2-1 (13). – С. 46-51.
29. *Головской В.А.* О моделях в исследованиях когнитивных радиосистем // Тр. Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. – Ростов-на-Дону: СКФ МТУСИ, 2022. – С. 8-11.
30. *Жожикашвили А.В.* Категорная технология создания и развития интеллектуальных систем, основанных на знании // Информационные процессы. – 2016. – Т. 16, № 4. – С. 312-332.
31. *Головской В.А.* Об идентификации модели ослабления при распространении радиоволн // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. – 2022. – Т. 14, № 5. – С. 38-44.
32. *Головской В.А.* О разрешимости и перечислимости множеств в задачах когнитивного радио // Прикладная математика и информатика в современном мире: Матер. Всероссийской НПК, посвященной 50-летию начала подготовки специалистов в области программирования и прикладной математики на Кубани. – Краснодар, 2022. – С. 124-129.
33. *Hopcroft J.E., Motwani R., Ullman J.D.* Introduction to Automata Theory, Languages, and Computations. – 3rd ed. – Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 2006. – 535 p.
34. Report ITU-R SM.2405-1. Spectrum management principles, challenges and issues related to dynamic access to frequency bands by means of radio systems employing cognitive capabilities. – URL: https://www.itu.int/pub/R-REP-SM.2405-1-2021.

REFERENCES

1. *Ichetovkin V.V.* Faktory, opredelyayushchie soderzhanie sposobov primeneniya robototekhnicheskikh kompleksov (sredstv) v boevykh deystviyakh [Factors determining the content of methods of using robotic complexes (means) in combat operations], *Voennaya mysl'* [Voennaya mysl'], 2022, No. 7, pp. 110-114.
2. *Gorskiy A.S., Dem'yanov V.V., Zhukov A.O.* Problemnye voprosy sozdaniya nazemnykh robototekhnicheskikh kompleksov [Problem of creation ground robotics vehicle], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and technical cybernetics], 2022, Vol. 10, No. 2, pp. 154-160.
3. *Romanyuta A.E.* Sostoyanie i perspektivy razvitiya robototekhnicheskikh kompleksov voennogo naznacheniya [The state and prospects of development of robotic complexes for military purposes], *Robotizatsiya Vooruzhennykh Sil Rossiyskoy Federatsii: Sb. statey V voenno-nauchnoy konferentsii, Anapa, 29–30 iyulya 2020 g.* [Robotization of the Armed Forces of the Russian Federation: Collection of articles of the V Military Scientific Conference], Anapa, 29–30 iyulya 2020]. Anapa: FGAU «Voennyy innovatsionnyy tekhnopolis «ERA», 2020. Vol. 1, pp. 20-24.
4. U.S. Ground Forces Robotics and Autonomous Systems (RAS) and Artificial Intelligence (AI): Considerations for Congress, 20.11.2018 // Project on Government Secrecy Federation of American Scientists. – URL: https://fas.org/sgp/crs/weapons/R45392.pdf.
5. *Sharif H. Calfee* Delivering Advanced Unmanned Autonomous Systems and Artificial Intelligence for Naval Superiority, 25.05.2021, *The Center for Strategic and Budgetary Assessments*. Available at: https://csbaonline.org/research/publications/delivering-advanced-unmanned-autonomous-systems-and-artificial-intelligence-for-naval-superiority/publication/1.
6. *Mahnken T.G., Sharp T., Kim G.B.* Deterrence by Detection: A Key Role for Unmanned Aircraft Systems in Great Power Competition, 2020. Available at: https://csbaonline.org/research/publications/deterrence-by-detection-a-key-role-for-unmanned-aircraft-systems-in-great-power-competition.
7. *Clark B., McNamara W.M., Walton T.A.* Capability Analysis - Winning the Invisible War: Gaining an Enduring Advantage in the EMS. – 2020. Available at: https://csbaonline.org/ uploads/documents/CIMSEC_Winning_the_Invisible_War__Gaining_an_Enduring_Advantage_in_the_EMS.pdf.

8. *Golovskoy V.A., Chernukha Yu.V., Semenyuk D.B.* Formalizatsiya zadachi postroeniya sistemy peredachi dannykh robototekhnicheskogo kompleksa, funktsioniruyushchego v usloviyakh antagonisticheskoy kiberelektromagnitnoy deyatel'nosti [Formalization of the problem of creating a data transmission system in a robotic system operating in conditions of antagonistic cyber-electromagnetic activity], *Voprosy kiberbezopasnosti* [Voprosy kiberbezopasnosti], 2019, No. 6 (34), pp. 113-122.
9. *Haigh K.Z., Andrusenko J.* Cognitive Electronic Warfare: An Artificial Intelligence Approach. Boston: Artech House, 2021, 288 p.
10. *Nagovitsin A.I., Molotkova B.B., Azimov D.U.* Avtomatizirovannaya sistema kontrolya za naznacheniem radiochastot na osnove risk-orientirovannogo podkhoda pri planirovanii radiosvyazi v podrazdeleniyakh robototekhnicheskikh kompleksov voennogo naznacheniya [Automated control system for the assignment of radio frequencies based on a risk-based approach in the planning of radio communications in the units of military robotic complexes], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 1 (225), pp. 59-70.
11. *Artemov M.L., Borisov V.I., Makoviy V.A., Slichenko M.P.* Avtomatizirovannye sistemy upravleniya, radiosvyazi i radioelektronnoy bor'by. Osnovy teorii i printsipy postroeniya [Automated control systems, radio communications and electronic warfare. Fundamentals of theory and principles of construction]. Moscow: Radiotekhnika, 2021, 556 p.
12. *Sokolov S.M.* Ontologicheskiy podkhod v sozdanii robototekhnicheskikh kompleksov s povyshennoy stepen'yu avtonomnosti [An ontological approach to the creation of robotic complexes with an increased degree of autonomy], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 1 (225), pp. 42-59.
13. *Gudkov M.A., Dvornikov A.S., Sorokin K.N.* Primenenie kognitivnykh radiosistem dlya obespecheniya svyazi s robotizirovannymi platformami voennogo naznacheniya [Application of cognitive radio systems for communication with military robotic platforms], *Trudy II Voenno-nauchnoy konferentsii «Robotizatsiya Vooruzhennykh Sil Rossiyskoy Federatsii»* [Proceedings of the II-th Military Scientific Conference "Robotization of the Armed Forces of the Russian Federation"]. Moscow, 2017, pp. 440-444.
14. *Golovskoy V.A., Filinov V.S.* Predlozheniya po sozdaniyu kognitivnykh sistem peredachi dannykh dlya robototekhnicheskikh kompleksov [Proposals for the creation of cognitive data transmission systems for robotic complex] T-Comm: Telekommunikatsii i transport [T-Comm: Telecommunications and transport], 2019, Vol. 13, No. 9, pp. 22-29.
15. Report ITU-R SM.2152. Definitions of Software Defined Radio (SDR) and Cognitive Radio System (CRS). Available at: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2152-2009-PDF-e.pdf.
16. *Mitola J., Maguire G.Q.* Cognitive radio: making software radios more personal, *IEEE Personal Communications*, 1999, Vol. 6, Issue 4, pp. 13-18.
17. *Golubinskiy A.N.* Primenenie iskusstvennoy neyronnoy seti v vide mnogosloynogo perseptrona dlya formirovaniya reytinga chastotnykh kanalov v sisteme kognitivnogo radio [Application of an artificial neural network in the form of a multilayer perceptron to form a rating of frequency channels in the system of cognitive radio], *Teoriya i tekhnika radiosvyazi* [Theory and technology of radio communication], 2020, No. 2, pp. 64-73.
18. *Eappen G., Shankar T.* Hybrid PSO-GSA for energy efficient spectrum sensing in cognitive radio network, *Physical Communication*, 2020, Vol. 40. Available at: https://doi.org/10.1016/j.phycom.2020.101091.
19. *Giral D., Hernández C., Salgado C.* Spectral decision for cognitive radio networks in a multi-user environment, *Heliyon*, 2021, Vol. 7, Issue 5. Available at: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07132.
20. *Peter G., Livin J.* Hybrid optimization algorithm based optimal resource allocation for co-operative cognitive radio network, *Array*, 2021, No. 12. Available at: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590005621000400.
21. *Alnabelsi S.H., Salameh H.B., Saifan R.R., Darabkh K.A.* A multi-layer hyper-graph routing with jamming-awareness for improved throughput in full-duplex cognitive radio networks, *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*, 2022. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2022.01.003.
22. *Matyszkiel R., Kaniewski P., Polak R., Laskowski D.* Selected methods of protecting wireless communications against interferences, *2019 International Conference on Military Communications and Information Systems (ICMCIS)*. Budva: IEEE, 2019, pp. 1-5.

23. *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.
24. *Tuukkanen T., Couturier S. Buchin B., Bräysy T., Krygier J., Verheul E., Le Nir V., Smit N.* Assessment of cognitive radio networks through military capability development viewpoint, *2018 International Conference on Military Communications and Information Systems (ICMCIS)*, 2018, pp. 1-8.
25. *Mourougayane K., Srikanth S.* A tri-band full-duplex cognitive radio transceiver for tactical communications, *IEEE Communications Magazine*, 2020, No. 58, pp. 61-65.
26. Cognitive Radio in NATO. STO technical report IST077/RTG-035. 2014. Available at: https://www.sto.nato.int/publications/STO%20Technical%20Reports/STO-TR-IST-077/$$$TR-IST-077-ALL.pdf.
27. Field Manual 3-12. Cyberspace and electronic warfare operations. Department of the Army. Washington, DC, April 2017. – URL: https://www.cyberwar.nl/d/fm3_12.pdf.
28. *Golovskoy V.A.* Printsipy sozdaniya bazy znaniy konfliktno-ustoychivoy sistemy pere-dachi dannykh robototekhnicheskikh kompleksov voennogo naznacheniya [Principles of creating a knowledge base of a conflict-resistant data transmission system of robotic complexes for military purposes], *Informatsionnaya bezopasnost' – aktual'naya problema sovremennosti. Sovershenstvovanie obrazovatel'nykh tekhnologiy podgotovki spetsialistov v oblasti informatsionnoy bezopasnosti* [Information security - an actual problem of modernity. Improvement of educational technologies for training specialists in the field of information security], 2020, Vol. 1, № 2-1 (13), pp. 46-51.
29. *Golovskoy V.A.* O modelyakh v issledovaniyakh kognitivnykh radiosistem [On models in research of cognitive radio systems], *Tr. Severo-Kavkazskogo filiala Moskovskogo tekhnicheskogo universiteta svyazi i informatiki* [Proceedings of the North Caucasus Branch of the Moscow Technical University of Communications and Informatics]. Rostov-on-Don: SKF MTUSI, 2022, pp. 8-11.
30. *Zhozhikashvili A.V.* Kategornaya tekhnologiya sozdaniya i razvitiya intellektual'nykh sistem, osnovannykh na znanii [Category-Theoretic Technology of Creation and Development of Knowledge-Based Intelligent Systems], *Informatsionnye protsessy* [Information processes], 2016, Vol. 16, No. 4, pp. 312-332.
31. *Golovskoy V.A.* Ob identifikatsii modeli oslableniya pri rasprostranenii radiovoln [On the identification of the attenuation model in the propagation of radio waves], *Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli* [High technologies in Earth space research. H&ES Research], 2022, Vol. 14, No. 5, pp. 38-44.
32. *Golovskoy V.A.* O razreshimosti i perechislimosti mnozhestv v zadachakh kognitivnogo radio [On the solvability and enumerability of sets in cognitive radio problems], *Prikladnaya matematika i informatika v sovremennom mire: Mater. Vserossiyskoy NPK, posvyashchennoy 50-letiyu nachala podgotovki spetsialistov v oblasti programmirovaniya i prikladnoy matematiki na Kubani* [Applied Mathematics and Computer science in the modern world: Materials of the All-Russian RPC dedicated to the 50th anniversary of the beginning of training specialists in the field of programming and applied mathematics in the Kuban]. Krasnodar, 2022, pp. 124-129.
33. *Hopcroft J.E., Motwani R., Ullman J.D.* Introduction to Automata Theory, Languages, and Computations. 3rd ed. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 2006, 535 p.
34. Report ITU-R SM.2405-1. Spectrum management principles, challenges and issues related to dynamic access to frequency bands by means of radio systems employing cognitive capabilities. Available at: https://www.itu.int/pub/R-REP-SM.2405-1-2021.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.А. Атрощенко.

Головской Василий Андреевич – Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Краснодарское высшее военное училище им. генерала армии С.М. Штеменко» Министерства обороны Российской Федерации (КВВУ); e-mail: golovskoy_va@mail.ru; г. Краснодар, Россия; тел.: +79384762531; к.т.н.; доцент; докторант.

Golovskoy Vasiliy Andreevich – Krasnodar Higher Military School named after S.M. Shtemenko; e-mail: golovskoy_va@mail.ru; Krasnodar, Russia; phone: +79384762531; cand. of eng. sc.; assistant of professor; doctorant.