

17. Cruz Caminha P.H., Souza Couto R. De, Maciel Kosmowski Costa L.H., Fladenmuller A., Amorim M. Dias de On the Coverage of Bus-Based Mobile Sensing, 2018. MDPI. Basel.
18. Cormen T.H., Leiserson C.E., Rivest R.L., Stein C. Introduction to Algorithms. MIT Press. Massachusetts, 2009, 984 p.
19. Cai X. Canonical Coin Systems for Change-Making Problems, *IEEE Computer Society Conference Publishing Services (CPS)*. Danvers, 2009, pp. 499-504.
20. Edmonds J. Matroids and the greedy algorithm. Springer, Berlin, 1971, pp. 127-136.
21. Curtis S. The classification of greedy algorithms. Elsevier. Amsterdam, 2003, pp. 125-157.
22. Abchuk V., Suzdal' V. Poisk ob"ektov [Search for objects]. Moscow: Sov. Radio, 1977, 334 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. профессор Г.С. Малышкин.

**Ланцов Валентин Вадимович** – Государственный научно-исследовательский институт прикладных проблем (ГосНИИПП); e-mail: well999@list.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 89811570699; соискатель, инженер-программист.

**Ланцов Константин Вадимович** – e-mail: stawrkest999@mail.ru; тел.: 89118108819; соискатель; инженер-программист.

**Корякин Александр Викторович** – e-mail: koral.spb@yandex.ru; тел.: 89117771452; д.т.н.; с.н.с.; г.н.с.

**Мартынова Любовь Александровна** – АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»; e-mail: martynowa999@bk.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 89219411395; д.т.н.; с.н.с.; в.н.с.

**Lantsov Valentin Vadimovich** – State Research Institute of Applied Problems (GosNIIPP); e-mail: well999@list.ru; Sankt-Peterburg, Russia; phone: +79811570699; applicant; software engineer.

**Lantsov Konstantin Vadimovich** – e-mail: stawrkest999@mail.ru; phone: +79118108819; applicant; software engineer.

**Koryakin Aleksandr Viktorovich** – e-mail: koral.spb@yandex.ru; phone: +79117771452; dr. of eng. sc.; senior researcher; chief researcher.

**Martynova Liubov Alexandrovna** – JSC CSRI Elektropribor; e-mail: martynowa999@bk.ru; Sankt-Peterburg, Russia; phone: +79219411395; dr. of eng. sc., senior researcher, leading researcher.

УДК 004.738.5: 621.391

DOI 10.18522/2311-3103-2023-1-53-65

**Г.П. Виноградов**

## **ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ НА ОСНОВЕ ЗНАНИЙ В СОЕДИНЕНИЯХ ВООРУЖЕННЫХ СИЛ**

*Предметом исследования являются методы интеллектуализации автоматизированных систем и комплексов в ВС РФ на базе использования моделей и технологий, основанных на знаниях, а также реагирующих беспроводных сенсорных сетей (RWSN), которые имеют большую перспективу применения особенно при проведении локальных спецопераций силами мобильных тактических групп. Актуальность работы связана с тем, что динамика современного боестолкновения предполагает оперативную концентрацию всех видов информации при принятии адекватных боевой ситуации решений, что позволяет реализовать новый подход к ведению боевых действий, основанный на интеграции систем всех уровней и родов войск. Формой интеграции является тактическая группа. Реализация подхода требует при принятии решений построение цикла знаний, включающего этапы восприятия, представления, осознания и их пополнения на базе новых архитектур построения и использования информационных технологий. Целью работы является исследование возможности построения информационной системы обеспечения данными одного из ключевых этапов – этапа приобретения знаний из распределенных источников при использовании в качестве первичного элемента системы реагирующих сенсорных сетей. Основные ре-*

**зультаты.** Исследования показали, что наиболее эффективное решение основано на использовании средств SCADA и сенсорных сетей путем их интеграции, а также гибридизации со знаниями экспертов. Предложена архитектура информационной системы тактической группы, обеспечивающая ситуационную осведомленность на всем тактическом спектре боевых операций и принятие решений в условиях жестких временных ограничений. Подобная система может рассматриваться как один из основных ключевых факторов для создания превосходства над противником. Приведен обзор возможных вариантов применения RWSN в военных областях. Показана их высокая эффективность при выполнении боевых задач. **Практическая значимость.** Обоснована целесообразность применения полученных результатов при проектировании RWSN.

*Сенсорные сети; сенсорные узлы; паттерны; инженерия знаний; ситуационная осведомленность.*

G.P. Vinogradov

### KNOWLEDGE-BASED INFORMATION TECHNOLOGIES IN THE ARMED FORCES

*The subject of the study is the methods of intellectualization of automated systems and complexes in the Armed Forces of the Russian Federation based on the use of knowledge-based models and technologies, as well as reactive wireless sensor networks (RWSN), which have a great prospect of application, especially when conducting local special operations by mobile tactical groups. The relevance of the work is due to the fact that the dynamics of a modern clash involves the concentration of all types of information when making decisions that are adequate to the combat situation, which makes it possible to implement a new approach to the conduct of hostilities based on the integration of systems of all levels and types of troops. The form of integration is the tactical group. The implementation of the approach requires the construction of a knowledge cycle when making decisions, including the stages of perception, representation, awareness and their replenishment based on new architectures for the construction and use of information technologies. The aim of the work is to study the possibility of building an information system for providing data for one of the key stages - the stage of acquiring knowledge from distributed sources when using responsive sensor networks as the primary element of the system. Main results. Studies have shown that the most effective solution is based on the use of SCADA tools and sensor networks through their integration, as well as hybridization with expert knowledge. The architecture of the tactical group information system is proposed, which provides situational awareness on the entire tactical spectrum of combat operations and decision-making under severe time constraints. Such a system can be considered as one of the main key factors for creating superiority over the enemy. An overview of possible applications of RWSN in military areas is given. Their high efficiency in performing combat missions is shown. Practical significance. The expediency of applying the results obtained in the design of RWSN is substantiated.*

*Sensor networks; sensor nodes; patterns; knowledge engineering; situational awareness.*

**Введение.** Современные информационные технологии позволяют концентрировать все виды информации при принятии адекватных боевой ситуации решений и реализовать новый подход к ведению боевых действий. Их роль при выполнении боевых задач тактической группой должна рассматриваться с позиции влияния на человека. Они должны помогать командиру, упрощая и повышая эффективность его работы в условиях дефицита времени на принятие решений. Командир при этом должен и обязан быть элементом системы управления (*human in the loop control*), в том числе, и при использовании робототехнических систем – РТК (далее агентов). Сложность и многочисленность ситуаций, возникающих при выполнении задач, делают практически невыполнимой задачу их выявления агентами по результатам испытаний и формирование на их основе базы знаний агентов. Следовательно, необходимо реализовать схему мониторинга для выявления классов ситуаций и успешных способов действия для формирования моделей поведения (паттернов) на основе данных, получаемых в реальных условиях.

Поведение агентов на основе формальных моделей исследуется в теории агентов, теории принятия решений, поведенческой робототехники, в теории искусственного интеллекта и ряда других направлений [1–4]. Отметим, что формальная теория выбора [5] развивалась путем абстрагирования от субъективных факторов, что привело к созданию нормативной теории принятия решений «идеальным» субъектом. В нормативной теории принятия решений считалось, что процесс принятия решений является неконтролируемым фактором. Логика развития проблемы выбора привела к необходимости изучения, как и почему в реальных условиях происходит «отход» субъекта от нормативной рациональности [5–7]. Однако, не смотря на обилие работ в данном направлении [8, 9] проблема остается актуальной.

**Постановка задачи.** Рассматривается задача построения архитектуры интеллектуальной информационной системы, реализующей цикл анализа, извлечения и использования знаний с последующей фиксацией успешного опыта в нормативных документах, в которой человек рассматривается как активный элемент. Ее решение связывается с: 1) разработкой модели поведения человека на основе субъективных представлений о ситуации выбора; 2) проектированием на этой основе архитектуры интеллектуальной информационной системы, где источником данных являются беспроводные сенсорные сети. Предлагаемый подход направлен на решение следующих проблем: 1) как формируются правила выбора человеком; 2) как он проверяет их адекватность и полезность в конкретных ситуациях целеустремленного состояния; 3) как формируются представления человека в ситуации выбора.

**Архитектура интеллектуальной системы управления.** Система управления тактической группой имеет иерархическую структуру. Верхний уровень, реализуемый командиром, соответствует таким свойствам, как выживание, безопасность, выполнение обязательств миссии, накопление и корректировка базы знаний в виде эффективных паттернов поведения в условиях жестких временных ограничений. Объектом управления для нее является подразделения, имеющие в своем составе РТК. Командир отрабатывает паттерны поведения в типовых ситуациях (ТС) при выполнении миссии, рассчитывает последовательности состояний  $y(t)$ , определяет задачи подразделениям и выполняет расчет оценки удельной эффективности отработки фактических ситуаций  $V(t)$  и анализ выполнения миссии по правилу:  $\mu A(\text{миссия выполнена}) \geq \alpha_V^*$ . Подход к моделированию поведения на основе паттернов аналогичен подходу в прагматической эпистемологии, согласно которому знания рассматриваются как множество теорий или моделей, каждая из которых представляет собой описание поведения при решении определенного класса задач. Теории, описывающие класс явлений, могут «перекрываться», и возникает проблема выбора способа решения задач в конкретной предметной области. Критерием выбора становится ожидаемая удельная ценность возможного результата [6]. Процесс получения знания в предлагаемой схеме аналогичен процессу биологической эволюции. Следовательно, критерием истинности знания искусственной сущности является «*приспособленность*» знания для решения задач предметной области.

**Модель нечеткого описания паттерна поведения.** Поведение в ТС связано с выбором, который происходит в ситуации целеустремленного состояния [10]. Рассмотрим модель поведения в виде нечеткого описания модели ситуации выбора. Возможный вариант такой конструкции предложено строить путем “парадигмальной прививки” идей, транслируемых из других наук, например [7, 10].

Целеустремленное состояние складывается из следующих компонент:

- ◆ Субъект, осуществляющий выбор (агент),  $k \in K$ .

♦ Окружение выбора ( $S$ ), под которым понимается множество элементов и их существенных свойств, изменение в любом из которых может стать причиной или продуцировать изменение состояния целеустремленного выбора. Часть этих элементов может не являться элементами системы и образует внешнюю среду для нее. Воздействие внешней среды описывается с помощью некоторого набора переменных.

♦ Доступные способы действий  $c_j^k \in C^k$ ,  $j = \overline{1, n}$   $k$ -го агента, которые ему известны и могут быть использованы для достижения  $i$ -го результата (их еще называют альтернативами). Каждый способ этого множества характеризуется набором параметров, которые называются управляющими воздействиями.

♦ Возможные при окружении  $S$  результаты существенные для агента –  $o_i^k \in O^k$ ,  $i = \overline{1, m}$ . Оценка результатов производится с помощью некоторого набора параметров, которые называются выходными параметрами ситуации целеустремленного состояния.

♦ Способ оценки свойств получаемых результатов в результате выбора способа действия. Очевидно, что оценки результата должны отражать ценность результата для агента и тем самым отражать его индивидуальность.

♦ Ограничения, отражающие требования, накладываемые ситуацией выбора на выходные переменные и управляющие воздействия.

♦ Модель предметной области, которая представляет собой множество соотношений, описывающих зависимость управляющих воздействий, параметров и возмущений с выходными переменными.

♦ Модель ограничений агента. Она подробно описана в работе [10]. Независимо от используемого вида описания ограничений будем предполагать наличие у агента определенной степени уверенности о возможности изменения части ограничений в сторону расширения множество возможных вариантов (альтернатив) выбора.

Введем для описанных компонент меры, которые будут использоваться для оценки целеустремленного состояния.

1. Будем считать, что агент способен выделять факторы – характеристики окружения  $X^k = \{x_i^k, i = \overline{1, N}\}$ . Влияние каждого фактора агент оценивает с помощью лингвистической переменной степень влияния фактора  $\mu_x^k(x_i^k) : x_i^k \rightarrow [0,1]$ . Введем параметр, с помощью которого агент оценивает свою ситуационную осведомленность в ситуации целеустремленного состояния

$$E_s^k = \frac{\sum_{i=1}^N \mu_x^k(x_i^k) x_i^k}{\sum_{i=1}^N \mu_x^k(x_i^k)}.$$

Можно определить следующее ограничение:  $\sigma^k(E_s^k) \geq \sigma_0^k$ , где  $\sigma_0^k$  – некоторый пороговый уровень осведомленности агента от использования собственных источников информации.

2. Будем предполагать, что для описания влияния выделенных факторов на результаты  $o_i^k$ ,  $i = \overline{1, m}$  агент использует аппроксимацию в виде продукционных правил, которые имеют вид:

Если  $x_1$  есть  $A_{r1}^k$  и если  $x_2$  есть  $A_{r2}^k$  и ... и если  $x_N$  есть  $A_{rN}^k$ , то

$$o_i^k = f_{ir}^k(x_1, x_2, \dots, x_N), r = \overline{1, R}, i = \overline{1, m}, \quad (1)$$

где  $R$  – количество продукционных правил,  $r$  – номер текущего продукционного правила,  $f_{ir}^k = f_{ir}^k(x_1, x_2, \dots, x_N)$  – четкая функция, отражающая представление агента о причинно-следственной связи входных факторов с возможными результатами для  $r$ -го правила;  $A_{ri}^k$  – нечеткие переменные, определенные на  $X^k = \{x_i^k, i = \overline{1, N}\}$ .

В качестве функции  $f_{ir}^k(\bullet)$  могут использоваться, например, как математические модели, словесное описание, графики, таблицы, алгоритмы т.д.

Поскольку  $c_j^k$  является функцией параметров состояния внешней среды, принимаемых во внимание, свойств системы, то набор предположений об их возможных значениях образует сценарий возможного состояния внешней среды, функциональных возможностей системы. Реализация сценариев, например, с помощью правил (1) позволяет сформировать представление о возможных результатах  $o_i^k$ . Неравнозначность при выборе способа действия можно описать как степень уверенности необходимости его применения для получения результата  $o_i^k$ . Эту оценку можно описать лингвистической переменной

$$\psi_j^k = \psi_j^k(c_j^k \in C^k | s_i \in S \rightarrow o_i^k) \in [0,1].$$

Эта мера является индивидуальной характеристикой агента, которая может меняться в результате обучения и приобретения опыта, а также в результате коммуникационного взаимодействия агентов между собой и с оператором. Поэтому  $\psi_j^k = \psi_j^k(c_j^k \in C^k | s_i \in S, I^k \rightarrow o_i^k) \in [0,1]$ , где  $I^k$  – информация, которой располагает агент на момент времени  $t_k$ .

3. Выбор способа действий  $c_j^k$  при принятии решения агентом в ситуации целеустремленного состояния для достижения результата  $o_i^k$  связан, как показано в [10], с построением количественной оценки свойств выбираемого решения. Список свойств и параметров формируется на основе опыта, знания, интеллекта и глубины понимания им ситуации принятия решения. Правильное описание свойств и параметров способа действий – одно из основных условий того, что выбор  $c_j^k$

приведет к достижению результата  $o_i^k$ . Выбор перечня свойств и параметров их характеризующих целиком зависит от агента (его индивидуальности). Представим возможные результаты при заданном окружении выбора агента в виде

$$o_i^k \in \left\{ o_{ij}^k, j = \overline{1, J} \right\}, \text{ где } o_{ij}^k \text{ – множество возможных результатов при выборе}$$

$j$ -го способа действия  $i \in I$  – множество результатов, принимаемых во внимание  $k$ -м агентом. Очевидно, что  $o_{ij}^k = o_{ij}^k(s_i), s_i \in S$ .

4. Ценность результатов  $o_i^k$ . Поскольку  $o_{ij}^k = o_{ij}^k(s_i)$ , а  $s_i = S(c_j^k)$ , то ценность  $i$ -го вида результата можно оценить следующей лингвистической переменной  $\varphi_i^k(o_i^k(c_j^k)) \in [0,1]$ . Функция  $\varphi_i^k(o_i^k(c_j^k))$  для результата  $o_i^k$  будет монотонным преобразованием, так как  $\varphi_i^k(\bullet)$  переводит область значений функции  $o_i^k(c_j^k)$  в множество значений лингвистической переменной. Так как базовому значению лингвистической переменной соответствует нечеткие переменные, то это преобразование переводит область значений функции  $o_i^k$  в область значений базовых нечетких переменных.

5. Эффективность способа действия с точки зрения результата – это уверенность получения данного результата этим способом действия при известных (или предполагаемых) затратах на его реализацию. Степень уверенности  $E_{ij}^k$  в том, что некоторый способ действия  $c_j^k$  будет приводить к результату  $o_i^k$  в окружении  $S$ , если агент выберет именно его:  $E_{ij}^k = E_{ij}^k(o_i^k | A \text{ выберет } c_j^k \text{ в } S) \in [0, 1]$ .

Она является лингвистической переменной и выражает индивидуальную оценку агента последствий выбора с точки зрения затрат.

**Модель выбора при реализации паттерна.** Введенные три лингвистические переменные  $\mu_i^k(x_i^k)$ ,  $\psi_{ij}^k$ ,  $E_{ij}^k$  образуют модель представлений агента о ситуации целеустремленного выбора.

Поскольку  $c_j^k$  можно описать в терминах  $X_i^k$  и агент имеет представление о зависимости в виде базы правил, которая связывает  $c_j^k$  и ценность возможного  $i$ -го результата  $o_i^k$ , то можно определить ценность целеустремленного состояния по  $i$ -му результату  $o_i^k$  для  $k$ -го агента в соответствии с правилом [10, 14]:

$$E\varphi_i^k = \frac{\sum_{j \in J} \varphi_{ij}^k(o_{ij}^k(c_j^k)) \bullet o_{ij}^k(s^k)}{\sum_{j \in J} \varphi_{ij}^k(o_{ij}^k(c_j^k))}.$$

По аналогии можно оценить ценность целеустремленного состояния для  $k$ -го агента по эффективности для  $i$ -го вида результата:

$$EE_i^k = \frac{\sum_{j \in J} EE_{ij}^k(o_i^k(c_j^k)) \bullet \psi_i^k(c_j^k)}{\sum_{j \in J} \psi_i^k(c_j^k)}.$$

Оценка агентом желательности целеустремленного состояния по  $i$ -му результату и эффективности его достижения в ситуации выбора выполняется по правилу  $\chi_{i1}^k = \chi_1^k(E\varphi_i^k) \in [0,1]$ ,  $\chi_{i2}^k = \chi_2^k(EE_i^k) \in [0,1]$  [5]. Можно определить следующие ограничения:  $\sum_i \chi_{i1}^k(E\varphi_i^k) \geq \chi_1^0$  и  $\sum_i \chi_{i2}^k(EE_i^k) \geq \chi_2^0$ , где  $\chi_1^0$  и  $\chi_2^0$  – ожидания агента

от выполнения миссии, которые отражают баланс между затратами и достигнутыми результатами  $o_i^k$ . Моделью ситуации выбора агента в ТС будем называть множество структурных и функциональных свойств, которыми по его убеждению обладает ситуация выбора и которые по его убеждению влияют на его удовлетворенность или неудовлетворенность ситуацией.

Есть еще одна группа факторов, которые определяют реализацию результата: воля, склонность к рискам, самооценка, мотивированность. Эти факторы позволяют говорить о таком показателе, как уверенность  $\rho_i^k(o_i^k)$  в получении результата  $o_i^k$  в ситуации выбора при использовании одного из возможных способов действия  $c_j^k \in C^k$ .

В соответствии с гипотезой о рациональном поведении агент формирует решение в соответствии с

$$\begin{aligned}
 P_i^k(s \in S) &= \text{Arg max}_{c_j^k} (\sum_{j \in J} E\varphi_i(o_i^k(c_j^k)) - EE_i^k(o_i^k(c_j^k))) \\
 c_j^k &\in C^k(I_t^i), I_t^i \subseteq M, o_i^k \in O^k \\
 \sum_i \chi_{i1}^k(E\varphi_i^k) &\geq \chi_1^0, \sum_i \chi_{i2}^k(EE_i^k) \geq \chi_2^0 \\
 \sigma^k(Es^k(X)) &\geq \sigma_0^k
 \end{aligned} \tag{2}$$

Поскольку выбор связан с представлениями агента о ситуации выбора, то в (2) необходимо включить базу знаний (1).

Соотношения (2) описывают паттерн поведения агента (киберфизической системы) при стремлении достичь  $i$ -го результата. Агент рассматривает паттерн (2) как способ описания задачи, принцип и алгоритм ее решения, которая часто возникает, причем таким образом, что ее решение можно использовать много раз ничего не изобретая заново.

Показатели ценность целеустремленного состояния по результату  $E\varphi_i^k$  и ценность целеустремленного состояния по эффективности  $EE_i^k$  являются элементами интегрального показателя ценности целеустремленного состояния для  $k$ -го индивида –  $\sum_i E\varphi_i^k \bullet EE_i^k$ . Учитывая его степень уверенности в получении результата  $\zeta_i^k$ , получить показатель ожидаемой удельной ценности

$$EV_k = \frac{\sum_i (E\varphi_i^k - EE_i^k) \bullet \zeta_i^k}{\sum_i \zeta_i^k} \tag{3}$$

Это означает, что если два субъекта находятся в одной и той же ситуации выбора, то разница в их поведении должна проявляться в значениях оценок удельной ценности по результату и эффективности и в степени уверенности достижения цели.

Соотношения (2–3) означают, что, когда агент хочет получить какой-либо результат, то располагает для этого несколькими альтернативными способами достижения с разной эффективностью, которыми он может попытаться достичь желаемого результата, и его уверенность в получении желаемого результата значительна. Такая модель индивидуального поведения автономного агента предполагает формирование базы знаний путем обучения на основе экспериментального опыта, что по-

зволяет реализовать эволюцию «кооперативного интеллекта» благодаря использованию искусственного когнитивного процесса, аналогичного тому, что имеет место у естественных существ [6, 10]. Отметим, что эта возможность отсутствует в системах на основе знаний, так как в ней отсутствует компьютерная модель адаптивного поведения. Таким образом, общие принципы мышления агента являются вполне традиционными и включают следующие три основные фазы: а) восприятие – получение данных и построение модели сцены в загруженном мире; б) познание – анализ и формирование сценария действий субъекта для достижения поставленных целей; в) исполнение намеченного сценария с постоянным сопоставлением ожидаемых и наблюдаемых результатов. В отличие от других подобных систем, в рассматриваемой системе реализация этих фаз осуществляется через два базовых механизма: абстрагирования и конкретизации, тесно связанных между собой.

Описание компонент паттерна соответствует языку программирования, где элементарные структуры описывают управление процессом реализации паттерна.

**Сетевые информационные системы в вооруженных силах.** Сетевые тактические информационные системы, обеспечивающие ситуационную осведомленность во всем стратегическом спектре боевых операций и принятие решений в условиях жестких временных ограничений, основа для превосходства над противником. Это качество достигается путем обработки максимально возможной совокупности мультимедийных и мультиспектральных данных в реальном времени. Эта способность позволяет реализовать адаптивное планирование боевых задач, вести целеуказание, оценку боевых потерь, оценивать надежность распределенных мобильных средств связи и т.п., как на уровне зоны проведения боевых операций, так и на уровне театра военных действий (ТВД). Для этого мобильное боевое информационное оборудование, тактические сетевые средства связи и спешенные оперативные средства управления, интегрируются с регулируемыми, устойчивыми и прозрачными для пользователя глобальными сетями, что соответствует философии «солдат как система».

Исследования возможности использования сенсоров совместно с беспроводной сетью положили начало развитию нового вида коммуникационных сетей под названием беспроводные сенсорные сети (БСС или англ. WSN) [11, 12]. БСС рассматриваются как основа для сбора и обработки исходной информации для военных приложений. Прогресс в миниатюризации физических датчиков, встроенных микроконтроллеров и радиоинтерфейсов и интеграция их на одном чипе, развитие теории и практики беспроводных сетей привели к появлению нового поколения беспроводных сенсорных сетей. Они стали рассматриваться как одна из технологических основ *окружающего интеллекта*, способными собирать огромное количество информации из окружающей среды. В настоящее время сенсорные узлы оснащены достаточно мощным бортовым процессором, что позволяет использовать их вычислительные мощности для локального выполнения простых вычислений, частичной обработке и передачи данных, также принятию решений в зоне своей ответственности.

**Примерная архитектура WSN военного назначения.** Вариант многоуровневой архитектуры WSN для военных приложений может быть построен с использованием сенсорных узлов с радиосвязью ближнего действия и беспроводных шлюзов с беспроводной связью на большие расстояния [12, 13].

Сенсорные узлы находятся на первом уровне иерархии, где они выполняют основные операции мониторинга и воздействия на среду. Они оснащены встроенными преобразователями, такими как акустические, сейсмические, пассивные инфракрасные (PIR), магнитные и пьезоэлектрические и др. для обнаружения событий, представляющих интерес. При этом они способны подтвердить обнаружение,

используя перекрестный поиск и выполнить классификацию. Каждый узел датчика в сети действует как маршрутизатор, пересылая пакеты данных на соседние узлы. Они формируют сеть «на лету» и поддерживают единый радиointерфейс для двунаправленной связи между узлами с датчиками и узлом слияния.

На втором уровне иерархии узлы слияния обеспечивают более сложные функции, такие как синхронизация базы данных, формирование кластера, формирование логики работы приложения и управление. Узлы слияния получают информационные запросы от пользователей, отслеживают команды, отвечают на запросы, формируют задачи узлам датчиков, собирают информацию и сохраняют историю событий, произошедших в зоне ответственности, охватываемой узлом слияния. Узлы слияния могут выступать в качестве исполнительных механизмов в сети, например, для запуска встроенной или близлежащей камеры для получения изображений, близких к реальному времени и пр. В отличие от типичной WSN, узлы слияния на втором уровне иерархии также образуют специальную сеть, обеспечивающую расширенный охват для более масштабной поддержки развертывания. Они могут быть оснащены несколькими радиointерфейсами для связи с сенсорными узлами и другими узлами слияния, а также для передачи данных на большие расстояния на узел управления. Сенсорные узлы и узлы слияния образуют кластеры, которые соединяются между собой через головные узлы слияния для создания автоматической наземной сенсорной системы.

Узел управления на третьем уровне обеспечивает оперативный контроль и управление системой. Узел слияния на этом уровне использует канал дальней связи для связи с узлом управления. Авторизованные пользователи могут в соответствии с правом доступа получать доступ к системе с узлов слияния данных на уровне 2 или с узла управления на уровне 3. Используя портативное устройство, ноутбук пользователь с надлежащей авторизацией может запрашивать события и подписываться на них, получать оповещения и просматривать историю действий системы.

**Система управления, использующая паттерны** Жесткие требования в ряде предметных областей к времени реагирования, вычислительным ресурсам предполагают использование сравнительно простых алгоритмов, построенных путем описания лучшего опыта человека при выполнении функциональных задач. Как было показано, что такое описание можно реализовать, если выявить классы типовых ситуаций и успешные способы действия в реальных условиях для формирования моделей поведения (паттернов). В работах [10, 14] дана следующая обобщенная логическая схема описания паттерна

$$\begin{aligned}
 & \text{Имя паттерна:} \\
 & \quad \text{так как [мотивы M]} \\
 & \quad \text{поскольку [цели G]} \\
 & \quad \text{если [предусловия U']} \\
 & \quad \text{то способ действия } r_q(t) \\
 & \quad \text{из-за чего [постусловие U'']} \\
 & \quad \dots \\
 & \quad \text{есть альтернатива } [r_p(t)]
 \end{aligned} \tag{4}$$

В этой модели все составляющие, кроме логических связей, могут представлять собой языковые конструкции на естественном или естественно-профессиональном языке. Следовательно, модель (1) – типовая естественно-языковая модель паттерна. Формальная модель паттерна поведения в типовой ситуации приведена в [17]. Там же показано, что модель предметной области и модель принятия решений в условиях дефицита времени можно формализовать с помощью нечетких продукционных сетей. Мотивы в модели (1) – это причины, определяемые потребностями и/или обязательствами. Они побуждают агента к

активности, в рамках которой потребовался паттерн. Описание мотивов и целей в модели (1) представляет контекст повторного применения паттерна с позиции необходимости и возможности его применения (потребности → мотивы → цели). Контекст определяется «ожидаемыми» постусловиями. Постусловия связаны с целями, затребовавшими паттерн, но отражают их в форме возможного состояния, к которому приведет применение паттерна. Цели определяют желаемое состояние и могут быть причиной, определяющей необходимость и полезность стремления к их достижению. Способ действия представляет собой код как естественно-языковое описание схемы действия, реализация которой приводит к выполнению паттерна. Такое описание имеет вид методик, реализованных на языке программирования или в форме уставов. Набор моделей или паттернов поведения, образуют опыт или базу знаний его носителя.

**Реализация и эксперименты.** Для реализации описанного подхода разработан программно-технический комплекс, позволяющий производить моделирование среды (контекста) и паттерна поведения агента [16,17]. Выделены четыре базовые позиции моделирования, с которых осуществляется сбор и интерпретация информации для идентификации модели паттерна поведения. Первая позиция (собственная точка зрения человека), вторая позиция (восприятие ситуации с точки зрения экспериментатора), третья позиция (рассмотрение ситуации с точки зрения возможности использования формальных процедур), четвертая позиция восприятия подразумевает рассмотрение ситуации с точки зрения надсистемы, задействованной в ситуации. Интегрирование точек зрения и их согласование позволяет агенту расширить свое понимание ситуации целеустремленного состояния и паттерна поведения в ней.

Моделирование из первой позиции заключается в том, чтобы человек, обладающий опытом выполнения миссии, реализует свое поведение, осуществляя голосовое управление «аватаром» в трехмерном пространстве. Полученный управляющий код используется для вызова соответствующей процедуры для изменения поведения аватара. Для формирования сложного поведения аватар снабжен набором элементарных паттернов поведения: и базой знаний, с помощью которой он реализует так называемое реактивное поведение. Таким образом, моделируются функции лимбической системы, которая играет роль среднего мозга человека. С ее помощью мозг обнаруживает так называемые «значительные» стимулы, угрожающие выживанию, и посылает информацию телу, чтобы оно могло реагировать на них надлежащим образом, минуя сознание и используя встроенные реакции. И только потом изменения в теле фиксируются сознанием, вызывая соответствующую эмоциональную оценку. Например, реакции страха или гнева начинаются в лимбической системе, что вызывает диффузное влияние на симпатическую нервную систему (она регулирует расход энергоресурсов и мобилизует организм в стрессовых ситуациях). Реакция организма, известная как «бей или беги», готовит человека к угрожающим ситуациям путем увеличения частоты его сердечных сокращений, дыхания или кровяного давления. В результате человек может в зависимости от обстоятельств защищаться или бежать. Аналогичным механизмом снабжен и аватар. Применение описанной системы проводилось при подготовке подразделения на выполнение боевых задач. Слаженность личного состава повысилась в среднем на 18–20%, эффективность выполнения задач на 8–10%.

**Заключение.** Для повышения возможностей применения WSNs в военных приложениях исследования и разработки должны быть направлены на создание: отечественных одно кристаллических процессоров, разработку алгоритмов идентификации нескольких одновременных событий; классификации объектов и событий в задачах обнаружения; миниатюризации и интеграции различных типов датчиков,

повышение их надежности; форматов и стандартов для выходов датчиков и коммуникаций [18–20]. Востребованными проблемами являются: разработка алгоритмов Sensor Data Mining на основе методов искусственного интеллекта и интеллектуального анализа данных, синтеза и генерации знаний на основе бортовой осведомленности и онтологий. Для повышения жизненного цикла WSNs требуется разработка новых источников питания, и энергоэффективных протоколов коммуникации.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Городецкий В.И., Самойлов В.В., Троцкий Д.В.* Базовая онтология коллективного поведения автономных агентов и ее расширения // Известия РАН. Теория и системы. – 2015. – № 5.
2. *Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г.* Методы и модели коллективного управления в группах роботов. – М.: Физматлит, 2009. – 280 с.
3. *Red'ko V.G., Anokhin K.V., Burtsev M.S., Manolov A.I., Mosalov O.P., Nepomnyashchikh V.A., Prokhorov D.V.* Project «Animat Brain»: Designing the animat control system on the basis of the functional systems theory / In: Butz M.V., Sigaud O., Pezzulo G., Baldassarre G. (Eds.) // Anticipatory Behavior in Adaptive Learning Systems: From Brains to Individual and Social Behavior. LNAI 4520. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag. 2007. – P. 94-107.
4. *Жданов А.А.* Метод автономного адаптивного управления // Известия академии наук. Теория и системы управления. – 1999. – № 5. – С. 127-134.
5. *Современные технологии. Киберфизические системы: учеб. пособие / авт.-сост.: Е.И. Громаков, А.А. Сидорова.* – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2021. – 166 с.
6. *Городецкий В.И.* Поведенческие модели кибер-физических систем и групповое управление: основные понятия // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 1. – С. 144-162.
7. *Канеман Д., Словик П., Тверски А.* Принятие решений в неопределенности: Правила и предубеждения. – Харьков: Гуманитарный центр, 2005.
8. *Виноградов Г.П., Шматов Г.П., Борзов Д.А.* Формирование представлений агента о предметной области в ситуации выбора // Программные продукты и системы. – 2015. – № 2 (110). – С. 83-94.
9. *Курьяновский В.П., Намиот В.Е., Снягов С.А.* Киберфизические системы как основа цифровой экономики. // International Journal of Open Information Technologies. – 2019. – No. 4. – P. 31-42.
10. *Виноградов Г.П., Прохоров А.А., Шепелев Г.А.* Паттерны в системах управления автономными робототехническими комплексами // Мягкие измерения и вычисления. – 2020. – № 12.
11. *Winkler M., Tuchs K.-D., Hughes K., and Barclay G.* Theoretical and practical aspects of military wireless sensor networks // in Journal of Telecommunications and Information Technology. – 2008. – No. 2. – P. 37-45.
12. *Lamont L., Toulgoat M., Déziel M., and Patterson G.* Tiered wireless sensor network architecture for military surveillance applications // Proc. of the 5th International Conference on Sensor Technologies and Applications, SENSORCOMM 2011, Nice, France, August 21-27, 2011.
13. *Cannon P.S. and Harding C.R.* Future military wireless solutions // Ch. 8 in Wireless Communications: The Future. Editor William Webb, John Wiley & Sons, 2007.
14. *Виноградов Г.П., Емцев А.С., Федотов И.С.* Беспроводные сенсорные сети в защищаемых зонах // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 1. – С. 19-30.
15. *Tafa Z. and Milutinović V.* Evaluating and improving the area coverage and detectability in the large-scale surveillance networks // IEEE Communications Surveys & Tutorials (submitted).
16. *Vinogradov G.P.* Patterns in Intelligent Systems. Russian Advances in Fuzzy Systems and Soft Computing // Selected contributions to the 8-th International Conference on Fuzzy Systems, Soft Computing and Intelligent Technologies (FSSCIT-2020), June 29 – July 1, 2020, Smolensk, Russia. CEUR Workshop Proceedings, 2020, 2782. – P. 208-216.
17. *Виноградов Г.П., Конюхов И.А., Шепелев Г.А.* Подход к проектированию программного обеспечения систем управления искусственными сущностями // Программные продукты и системы. – 2021. – № 1 (34).
18. *Merrill W.M. et al.* Defense systems: self-healing land mines // Ch. 18 in Wireless Sensor Networks: A System Perspective, Editors N. Bulusu and S. Jha, Artech House, 2005.
19. *Naz P., Hengy S., Hamery P.* Soldier detection using unattended acoustic and seismic sensors // SPIE, Orlando, USA, 2012, 8389-28.
20. *Rippin B.* Pearls of wisdom: wireless networks of miniaturized unattended ground sensors // SPIE, Orlando, USA, 2012, 8388-17.

## REFERENCES

1. Gorodetskiy V.I., Samoylov V.V., Trotskiy D.V. Bazovaya ontologiya kollektivnogo povedeniya avtonomnykh agentov i ee rasshireniya [Basic ontology of collective behavior of autonomous agents and its extensions], *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences, Theory and Systems], 2015, No. 5.
2. Kalyaev I.A., Gayduk A.R., Kapustyan S.G. Metody i modeli kollektivnogo upravleniya v gruppakh robotov [Methods and models of collective management in groups of robots]. Moscow: Fizmatlit, 2009, 280 p.
3. Red'ko V.G., Anokhin K.V., Burtsev M.S., Manolov A.I., Mosalov O.P., Nepomnyashchikh V.A., Prokhorov D.V. Project «Animat Brain»: Designing the animat control system on the basis of the functional systems theory, In: Butz M.V., Sigaud O., Pezzulo G., Baldassarre G. (Eds.), *Anticipatory Behavior in Adaptive Learning Systems: From Brains to Individual and Social Behavior. LNAI 4520*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag. 2007, pp. 94-107.
4. Zhdanov A.A. Metod avtonomnogo adaptivnogo upravleniya [The method of autonomous adaptive control], *Izvestiya akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya* [Proceedings of the Academy of Sciences. Theory and control systems], 1999, No. 5, pp. 127-134.
5. Sovremennyye tekhnologii. Kiberfizicheskie sistemy: ucheb. posobie [Modern technologies. Cyberphysical systems: a textbook], authors-compilers: E.I. Gromakov, A.A. Sidorova. Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2021, 166 p.
6. Gorodetskiy V.I. Povedencheskie modeli kiber-fizicheskikh sistem i gruppovoe upravlenie: osnovnye ponyatiya [Behavioral models of cyber-physical systems and group management: basic concepts], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 1, pp. 144-162.
7. Kaneman D., Slovik P., Tverski A. Prinyatie resheniy v neopredelennosti: Pravila i predubezhdeniya [Decision-making in uncertainty: Rules and Biases]. Khar'kov: Gumanitarnyy tsentr, 2005.
8. Vinogradov G.P., Shmatov G.P., Borzov D.A. Formirovanie predstavleniy agenta o predmetnoy oblasti v situatsii vybora [Formation of agent's ideas about the subject area in a choice situation], *Programmnye produkty i sistemy* [Software products and systems], 2015, No. 2 (110), pp. 83-94.
9. Kupriyanovskiy V.P., Namiot V.E., Sinyagov S.A. Kiberfizicheskie sistemy kak osnova tsifrovoy ekonomiki [Cyber-physical systems as the basis of the digital economy], *International Journal of Open Information Technologies*, 2019, No. 4, pp. 31-42.
10. Vinogradov G.P., Prokhorov A.A., Shepelev G.A. Patterny v sistemakh upravleniya avtonomnymi robototekhnicheskimi kompleksami [Patterns in control systems of autonomous robotic complexes], *Myagkie izmereniya i vychisleniya* [Soft measurements and calculations], 2020, No. 12.
11. Winkler M., Tuchs K.-D., Hughes K., and Barclay G. Theoretical and practical aspects of military wireless sensor networks, in *Journal of Telecommunications and Information Technology*, 2008, No. 2, pp. 37-45.
12. Lamont L., Toulgoat M., Déziel M., and Patterson G. Tiered wireless sensor network architecture for military surveillance applications, *Proc. of the 5th International Conference on Sensor Technologies and Applications, SENSORCOMM 2011, Nice, France, August 21-27, 2011*.
13. Cannon P.S. and Harding C.R. Future military wireless solutions, *Ch. 8 in Wireless Communications: The Future*. Editor William Webb, John Wiley & Sons, 2007.
14. Vinogradov G.P., Emtsev A.S., Fedotov I.S. Besprovodnye sensornye seti v zashchishchaemykh zonakh [Wireless sensor networks in protected areas], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2021, No. 1, pp. 19-30.
15. Tafa Z. and Milutinović V. Evaluating and improving the area coverage and detectability in the large-scale surveillance networks, *IEEE Communications Surveys & Tutorials (submitted)*.
16. Vinogradov G.P. Patterns in Intelligent Systems. Russian Advances in Fuzzy Systems and Soft Computing, *Selected contributions to the 8-th International Conference on Fuzzy Systems, Soft Computing and Intelligent Technologies (FSSCIT-2020), June 29 – July 1, 2020, Smolensk, Russia. CEUR Workshop Proceedings, 2020, 2782*, pp. 208-216.
17. Vinogradov G.P., Konyukhov I.A., Shepelev G.A. Podkhod k proektirovaniyu programmno obespecheniya sistem upravleniya iskusstvennymi sushchnostyami [An approach to the design of software for artificial entity management systems], *Programmnye produkty i sistemy* [Software products and systems], 2021, No. 1 (34).
18. Merrill W.M. et al. Defense systems: self-healing land mines, *Ch. 18 in Wireless Sensor Networks: A System Perspective*, Editors N. Bulusu and S. Jha, Artech House, 2005.

19. Naz P., Hengy S., Hamery P. Soldier detection using unattended acoustic and seismic sensors, *SPIE*. Orlando, USA, 2012, 8389-28.
20. Rippin B. Pearls of wisdom: wireless networks of miniaturized unattended ground sensors, *SPIE*. Orlando, USA, 2012, 8388-17.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Н.А. Семенов.

**Виноградов Геннадий Павлович** – Тверской государственный технический университет; e-mail: wgp272ng@mail.ru; г. Тверь, Россия; д.т.н.; профессор; зав. лабораторией НИИ ЦПС; член РАИИ; член РАНСМВ.

**Vinogradov Gennady Pavlovich** – Tver State Technical University; e-mail: wgp272ng@mail.ru; Tver, Russia; dr. of eng. sc.; professor; head of the laboratory of the Research Institute of Centerprogram Systems; member of the Russian Association of Artificial Intelligence, member of the Russian Association of Fuzzy Systems and Soft Computing.

УДК 28.23.24: 28.23.27: 004.82

DOI 10.18522/2311-3103-2023-1-65-76

**С.М. Соколов**

### **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТЕПЕНИ АВТОНОМНОСТИ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ**

*На фоне всё возрастающих потребностей в робототехнических комплексах с повышенной степенью автономности и намечающемуся переходу к их широкому использованию актуализируется потребность в технологиях оценки качества и сравнения степени автономности таких устройств. В статье описывается текущее состояние вопросов оценивания и сравнения степени автономности беспилотных комплексов. Приводятся известные оценки степени автономности. В существующей системе классификации выделяется автономность информационная и интеллектуальная, которые рассматриваются в тесной связи. Предлагаются решения, дополняющие известные подходы к общему определению степени автономности и позволяющие формировать количественные оценки степени автономности роботов в различных областях народного хозяйства. Рассматриваются технологии, направленные на автоматизацию получения этих оценок. В частности, обсуждается возможность использования хорошо освоенного отечественными исследователями инструментария нечётких когнитивных карт для определения степени автономности в условиях неполноты информации, наличия качественной информации и влияния человеческого фактора. Обосновывается необходимость развития онтологий предметных областей для обеспечения возможности сравнения степени автономности различных робототехнических комплексов и их группировок. В целом, указывается подход, который направлен на систематизацию оценок качества и эффективности применения автономных роботов, и может позволить в короткие сроки подготовить методическую базу широкого внедрения робототехники. Одним из положительных следствий такого системного подхода является унификация формулировок и решений (модулей) в задачах информационного обеспечения РТК, что, в свою очередь облегчает взаимодействие между пользователями, заказчиками и разработчиками. Разработчикам РТК систематизированный подход даёт возможность повторного использования удачных решений в различных комбинациях. В заключении выражаются пожелания к сообществу отечественных робототехников в объединении усилий к унификации терминологии, описанию постановок задач и метрик интеллектуальности робототехнических комплексов.*

*Автономность роботов; степень автономности; онтологии робототехники; нечёткие когнитивные карты; унификация решений в области автономии.*