

Noskov Vladimir Petrovich – Bauman Moscow State Technical University; e-mail: noskov_mstu@mail.ru; Moscow, Russia; phone: +79166766057; NIISM sector head; the department of special robotics and mechatronics; cand. of eng. sc.; associate professor.

Rubtsov Ivan Vasil'evich – e-mail: noskov_mstu@mail.ru; phone: +74992636019; the department of special robotic and mechtronics; chief of department; cand. of eng. sc.; associate professor.

Moshkov Konstantin Yur'evich – e-mail: makon111@rambler.ru; phone: +79161943368; the department of multi-purpose tracked vehicles and mobile robots; cand. of eng. sc.; associate professor.

Vazaev Alexander Viktorovich – e-mail: vazaev@bmstu.ru; phone: +79153976550; NIISM, engineer; the department of special robotics and mechatronics; post-graduate.

УДК 004.75

DOI 10.18522/2311-3103-2021-1-19-30

Г.П. Виноградов, А.С. Емцев, И.С. Федотов

БЕСПРОВОДНЫЕ СЕНСОРНЫЕ СЕТИ В ЗАЩИЩАЕМЫХ ЗОНАХ

В военных целях беспроводные сенсорные сети позволяют «связать автономные системы» в комплекс, обладающий свойством самоорганизации, когда объекты «умеют» сами находить друг друга и формировать сеть, а случае выхода из строя какого-либо из узлов могут устанавливать новые маршруты для передачи сообщений. Достичь желаемой эффективности подобных комплексов возможно, главным образом, путем совершенствования интеллектуальной составляющей их системы управления в целом и отдельным узлом в частности. Однако следует отметить, что подавляющее число исследований в этой области остается на теоретическом уровне. Цель состоит: 1) в исследовании и разработке алгоритмов построения архитектуры сети с мобильными узлами и с возможными их отказами вследствие выполнения боевой задачи; 2) в исследовании и разработке использования узла сенсорной сети для сбора, анализа, передачи данных об обстановке и принятия решения в зоне своей ответственности; 3) предложить в условиях ограничений по энергопотреблению и быстрдействию сравнительно простые алгоритмы для придания узлу сети свойства интеллектуального поведения. Показано, что требуемые алгоритмы можно разработать, если выявить классы типовых ситуаций и успешные способы действия в реальных условиях. На этой основе появляется возможность разработки формальных моделей (паттернов) для реализации в системе управления узлом. Предложена двухуровневая структура интеллектуальной системы управления сетью. Верхний уровень, реализуемый оператором, соответствует таким свойствам, как выживание, безопасность, выполнение обязательств согласно миссии, накопление и корректировка базы знаний в виде эффективных паттернов поведения. Объектом управления для нее является сеть, рассматриваемая как некоторая функциональная система.

Паттерн; беспроводная сеть; сенсор; искусственный интеллект.

G.P. Vinogradov, A.S. Emtsev, I.S. Fedotov

WIRELESS SENSOR NETWORKS IN PROTECTED AREAS

For military purposes, wireless sensor networks allow you to "link autonomous systems" into a complex that has the property of self-organization, when objects "know" how to find each other and form a network, and in the event of a failure of any of the nodes can establish new routes for transmitting messages. It is possible to achieve the desired efficiency of such complexes, mainly by improving the intellectual component of their control system in general and individual node in particular. However, it should be noted that the vast majority of research in this area remains at the theoretical level. The goal is to: 1) the study and development of algorithms for network design with mobile nodes and their possible failures due to the combat mission; 2) the study and development of site use sensor network to collect, analyze, and transmit data about the situation and decision-making in the area of responsibility; 3) to offer relatively simple algorithms for giving the network node the prop-

erty of intelligent behavior under the conditions of restrictions on power consumption and speed. It is shown that the required algorithms can be developed if the classes of typical situations and successful methods of action in real conditions are identified. On this basis, it becomes possible to develop formal models (patterns) for implementation in the node management system. A two-level structure of an intelligent network management system is proposed. The upper level, implemented by the operator, corresponds to such properties as survival, security, fulfillment of mission obligations, accumulation and adjustment of the knowledge base in the form of effective behavior patterns. The object of control for it is the network, considered as a functional system.

Pattern; wireless network; sensor; artificial intelligence.

Введение. Беспроводные сенсорные сети (WSN – Wireless Sensor Network) стали возможны за счет результатов в области разработки MEMS-сенсоров, информационных технологий и систем связи на базе радиоканалов и беспроводных протоколов. Типичная структура WSN включает многофункциональные моты (узлы) с малым уровнем энергопотребления, способных к коммуникации друг с другом, и сетевой архитектуры для передачи данных в удаленные компьютерные сети [1, 20]. Архитектура сенсорного узла, состоит из четырех основных компонентов: 1) сенсорной подсистемы, включающей датчики: сейсмический, магнитный, тепловой, визуальный, инфракрасный, акустический и радар, для контроля состояния внешней среды с соответствующими аналого-цифровыми преобразователями; 2) подсистемы обработки, включающая микроконтроллеры и память для местной обработки данных; 3) радиопередатчика для беспроводной передачи данных; 4) устройства электропитания. В зависимости от определенного конкретного применения сенсорные узлы могут включать в себя дополнительные компоненты, такие как систему позиционирования, мобилизатор, чтобы изменить их местоположение или конфигурацию и т. п. Сенсорные узлы образуют сенсорное поле и, как правило, они находятся в спящем положении. Когда происходит событие, или по расписанию в определенное время, эти узлы просыпаются, самоорганизуются в сеть и передают информацию в центр сбора данных. Сенсорная сеть поддерживает основные интерфейсы и протоколы, которые применяются в настоящее время в глобальных и локальных сетях. Это позволяет интегрировать ее в существующую сеть.

Постановка задачи. Область применения БСС – это, как правило, неопределенные и плохо формализуемые среды, поэтому достичь желаемой эффективности подобных комплексов возможно, главным образом, путем совершенствования интеллектуальной составляющей их системы управления в целом и отдельным узлом в частности. Однако следует отметить, что существует разрыв между примитивными моделями поведения искусственных существ, например, в роевой робототехнике, моделями их взаимодействия и ожиданиями со стороны практики. Ситуация усугубляется требованиями скрытности, миниатюризации, малого энергопотребления.

На практике требуется в качестве мота сети иметь автономный узел (далее агент) должен обладать свойством интеллектуального поведения, быть способным на изучение обстановки и принятию решений, как самостоятельно с учетом получаемых от других устройств сети данных, так и в составе группы.

Система управления узлом, использующая паттерны. Жесткие требования в ряде предметных областей к времени реагирования, объему памяти, быстродействию микрочипа и уровню энергопотребления предполагают использование сравнительно простых алгоритмов, построенных путем описания лучшего опыта человека при выполнении функциональных задач. В работах [2–4] показано, что такое описание можно реализовать, если выявить классы типовых ситуаций и успешные способы действия в реальных условиях для формирования моделей поведения (паттернов).

В работе [5] дана следующая обобщенная логическая схема описания паттерна
Имя паттерна:

$$\begin{aligned}
 & \text{так как [мотивы M]} \\
 & \text{поскольку [цели G]} \\
 & \text{если [предусловия U']} \\
 & \text{то способ действия } r_q(t) \\
 & \text{из-за чего [постусловие U'']} \\
 & \dots \\
 & \text{есть альтернатива [} r_p(t) \text{]}
 \end{aligned} \tag{1}$$

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 [6, 7]. Там же показано, что модель предметной области и модель принятия решений человеком 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 отражает 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. Набор моделей или паттернов поведения, образуют опыт или базу знаний его носителя.

Модель индивидуального поведения автономного узла предполагает формирование базы паттернов на основе экспериментального опыта, что позволяет реализовать эволюцию «кооперативного интеллекта» благодаря использованию искусственного когнитивного процесса, аналогичного тому, что имеет место у естественных существ. Отметим, что эта возможность отсутствует в системах на основе знаний, так как в ней отсутствует компьютерная модель адаптивного поведения.

Общая архитектура интеллектуальной системы управления БСС имеет иерархическую структуру. Верхний уровень, реализуемый оператором, соответствует таким свойствам, как выживание, безопасность, выполнение обязательств согласно миссии, накопление и корректировка базы знаний в виде эффективных паттернов поведения. Объектом управления для нее является БСС, рассматриваемая как некоторая функциональная система. Она осуществляет: 1) расчет текущих показателей удельной ценности по результатам и эффективности в момент t [6]; 2) расчет и реализацию способа действия (поведения) в момент t согласно заданному паттерну поведения; 3) мониторинг результатов реализации паттерна поведения.

Оператор обрабатывает паттерны поведения в ТС при выполнении миссии и выполняет анализ выполнения миссии. Узел рассчитывает последовательности состояний $y(t)$, реализует задачи миссии и выполняет расчет оценки удельной ценности и эффективности [6, 7] обработки фактических ситуаций.

Такой подход к моделированию поведения узлов в сети 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 [7].

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 данных. Реализация этого подхода связана: 1) с правильным соотношением вектора координат ситуации ($x_i, i = \overline{1, n}$) с тем или иным паттерном, как по их количеству, так и по форме предъявления каждой координаты; 2) полнотой описания вектором ситуации (количество учитываемых параметров n). Связь конкретного класса и конкретного паттерна устанавливается при работе с лидером – действительным носителем знания. Соответствующая методика изложена в [7]. Так как человек описывает ситуацию средствами естественного языка, то координаты ситуационного вектора – это лингвистические переменные. Они используются для преобразования количественных шкал, используемых в сенсорах, в лингвистические шкалы, используемые человеком для описания значений наблюдаемого параметра-понятия в виде термов.

База знаний на основе паттернов. Пусть состояние ситуации описывается ситуационным вектором $x_i, i = \overline{1, n}$, каждая координата которого лингвистическая переменная x_i с множеством термов $A_i = \{a_i^k, k = \overline{1, K^i}\}$. Пусть определен набор классов реализаций ситуационного вектора, при котором есть паттерн поведения с успешным разрешением любой ситуации класса (кластера). При этом значения удельной ценности по результату превышают некоторый пороговый уровень. То же самое относится и к удельной ценности по эффективности при реализации паттерна.

Пусть накоплено множество $d_j, j = \overline{1, p}$ паттернов, каждый из которых связан с множеством кластеров ситуаций, для разрешения которых он был выбран. В соответствии с подходом, описанным в [7] можно составить матрицу соответствия кластеров ситуаций и располагаемым множеством паттернов поведения.

Если сгруппировать строки матрицы по паттернам, где каждая строка матрицы представляет собой конкретный ситуационный кластер, при котором успешно реализован соответствующий паттерн, то результатам можно получить кластер типовой ситуации. Для него паттерн поведения по структуре будет один и тот же, отличие будет в значениях параметров.

Как правило, микрочипы узлов имеют операционную систему, подобную Tiny Os. Анализ возможных вариантов построения базы знаний в виде паттернов и их моделирование в среде Tiny Os показал, что наиболее приемлемым является подход, изложенный в [3, 8], поэтому дальнейшее изложение материала будет соответствовать работам [3, 8].

Пронумеруем строки блока паттерна d_j двумя индексами: первый индекс – номер паттерна (он же номер блока); второй индекс – это номер ситуации, входящий в j -й кластер.

Такая матрица определяет систему логических высказываний вида Если ... То, Иначе ... Например, строка матрицы $j.1$ – это высказывание

$$\text{Если } x_1 = a_1^{j1} \text{ и } x_2 = a_2^{j2} \text{ и } \dots \text{ и } x_n = a_n^{jn} \text{ То } d_j \quad (2)$$

Иначе выражение для следующей строки.

Полученную упорядоченную таким образом систему логических высказываний будем называть нечеткой матрицей знаний или базой паттернов.

Алгоритм вычисления функции принадлежности паттерна. Каждое логическое высказывание типа (2) – это нечеткое отношение соответствующих нечетких множеств. Например, для строки j это будет

$$a_1^{j1} \times a_2^{j2} \times \dots \times a_n^{jn}.$$

Функция принадлежности нечеткого множества, образованного этим нечетким отношением, будет

$$\mu_{a_1}^{j1}(x_1) \wedge \dots \wedge \mu_{a_i}^{ji}(x_i) \wedge \dots \wedge \mu_{a_n}^{jn}(x_n).$$

Здесь вычисление этого выражения осуществляется с помощью операции *min*.

Блок логических высказываний, относящийся к паттерну d_j , представляет собой объединение соответствующих нечетких множеств, образованных строками выделенного блока. Тогда функция принадлежности этого объединения будет определяться

$$\mu_{d_j}(x_i, i = \overline{1, n}) = \bigvee_{j=1}^p \bigwedge_{i=1}^n \mu_i^{jK_j}(x_i),$$

где « \bigvee » означает операцию *max*.

Формально представленный алгоритм определения функции принадлежности паттерна d_j можно записать в виде:

- а) фиксируем произвольную точку $x_i^*, i = \overline{1, n} \in \times_{i=1}^n U_i$.
- б) для каждого блока матрицы знаний, соответствующего d_j , определим $\mu_{d_j}(x_i, i = \overline{1, n})$ в этой точке.

Заметим, что для фиксированной точки $x_i^*, i = \overline{1, n} \in \times_{i=1}^n U_i$ блок матрицы, является числовым, так как вместо каждого термина a_i^{js} из этого блока поставлено значение его функции принадлежности $(a_i^{js})^*$, вычисленное в точке x_i^* . Операция $\min_i (a_i^{js})^*$ производится над числами, стоящими в строках « i » $\overline{1, n}$ и в столбец « \min » заносится минимальное число в соответствующей строке. Операция $\max_{js} \min_i (a_i^{js})^*$ определяет в полученном массиве строчных минимумов $j_s \in \overline{1, K_j}$ наибольшее значение. Проводя такие вычисления для каждой точки универсального множества, получим требуемые значения функции принадлежности.

Алгоритм выбора паттерна в текущей ситуации. Бортовая интеллектуальная система с помощью своих измерительных средств формирует вектор $x_i^*, i = \overline{1, n}$ с количественными характеристиками координат. В этой точке, полученной на момент t , требуется определить значение функции принадлежности паттерна $d_j(x_i, i = \overline{1, n}), j \in \overline{1, p}$.

В этом случае функция принадлежности рассчитывается для каждого блока. Наиболее предпочтительный паттерн для разрешения проблемной ситуации будет паттерн d_j^* , вычисленный по правилу $d^*(x_i^*, i = \overline{1, n}) = \max_{j \in \overline{1, p}} d_j(x_i, i = \overline{1, n})$

Описанный подход реализован в форме программного продукта, который позволяет смоделировать произвольную проблемную ситуацию (субситуацию), задавая ее ситуационным вектором с полным описанием его координат (для каждой

координаты вводится набор термов, относящаяся к каждому терму функция принадлежности, выбираемая из заданного списка, универсальное множество, на котором она определена) и матрица знаний.

Ниже в качестве примера рассматриваются алгоритмы некоторых паттернов.

Паттерн определения местоположения узла относительно пункта управления БСС. Одной из основных в интеллектуальной БСС является задача конфигурирования сети и определение зоны ответственности для каждого узла, для чего требуется знать координаты размещения узлов. Они рассчитываются относительно координат пункта управления БСС по степени удаленности от него.

Наиболее простым методом решения этой задачи является индикация уровня принятого сигнала (Received Strength Signal Indication). Любой беспроводной канал по стандарту IEEE 802.15.4 имеет протокольную функцию оценки качества связи (Link Quality Indicator), действие которой сводится к определению мощности принятого сигнала. Результат этого измерения можно вывести, откалибровать по известному расстоянию, оценить дальность до источника и определить координаты нахождения узла.

Измерение расстояния производится следующим образом. Приемник с логарифмической амплитудной характеристикой принимает сигналы, по которым встроенный индикатор $RSSI$ формирует 8-разрядный код $RSSI_{VAL}$. Этот код получается в результате усреднения по восьми периодам (128 мкс) принятого сигнала и снабжается битом состояния, указывающим, когда $RSSI_{VAL}$ является валидным (т.е. приемник имел возможность принять, по крайней мере, восемь периодов). Мощность принятого сигнала P (дБм) вычисляется по формуле:

$$P = RSSI_{VAL} + RSSI_{OFFSET},$$

где $RSSI_{OFFSET}$ – эмпирически подбираемая постоянная (порядка – 45 дБм).

Поскольку в идеальных условиях мощность обратно пропорциональна квадрату расстояния, то логарифм мощности просто пропорционален расстоянию с некоторым коэффициентом, который устанавливается также эмпирически. Данный подход реализован в микроконтроллерах ZigBee фирмы TI серии CC2431 [9].

Паттерн самоорганизации БСС. Основное требование к алгоритму размещения сенсорных узлов для двумерных (2D) и трехмерных (3D) БСС – это обеспечение, по крайней мере, 90 % покрытие пространства в зависимости от соотношения плотности размещения и радиуса действия сенсорного узла RS . Для динамической БСС с ячеистой топологией сети в этом смысле перспективным следует считать алгоритм адаптивной кластеризации LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy). LEACH – протокол с контролем топологии и кластеризацией с низким потреблением, предназначен для сетей с иерархической структурой.

Узлы полагаются однородными и имеют ограниченный запас энергии. В сети имеется базовая станция, и все узлы знают о ее физическом местоположении. Для придания БСС с изменяемой структурой для предотвращения чрезмерного потребления энергии и придания свойств самоорганизации и адаптации под различные состояния сети по распределению энергии узлы динамически объединяются в кластеры, внутри которых происходит выбор головного узла.

Головной узел выбирается для каждого кластера. Его функция – сбор данных с узлов-мотов кластера, обработка и передача информации на шлюз или базовую станцию. Такое агрегирование данных в головных узлах значительно уменьшает энергопотребление в сети и увеличивает длительность жизненного цикла. Поэтому выбор головного кластера является основной задачей при разработке алгоритмов для иерархических беспроводных сенсорных сетей. Для этого работа LEACH разделена на раунды. Каждый из раундов состоит из фазы настройки и стационарной фазы. В фазе

настройки производится выбор главных узлов и объединение их с соседними устройствами. Решение о выборе принимается независимо всеми узлами в одно и то же время с помощью следующего алгоритма.

Каждому из n узлов присваивается случайное значение N от 0 до 1. Рассчитывается значение порога $T(n)$ по формуле [10]

$$T(n) = \frac{P}{1 - P * (r \bmod P^{-1})}, \forall n \in G; T(n) = 0, \forall n \notin G,$$

где r – номер текущего раунда; P – вероятность выбора узла головным; n – указатель на текущий узел; G – число узлов, которые не были головными узлами в последних $1/P$ раундах.

Если $N < T(n)$, то узел становится головным кластером. Такой алгоритм гарантирует, что каждый узел будет выбран главным узлом только один раз в течение $1/P$ раундов.

Узлы, которые были головными узлами в нулевом раунде, не могут быть ими снова в течение раундов $1/P$. После этого все определенные узлы могут становиться головным узлом.

После выбора головного узла другие сенсорные узлы определяют, в какой кластер они будут входить на основе мощности получаемого сигнала RSS (Received Signal Strength) от головного узла. Когда все узлы самоорганизовались в кластеры, головной узел создает расписание передачи информации на основе метода TDMA, что гарантирует отсутствие коллизий при передаче сообщений.

Головной узел рассылает расписание передачи и запрашивает своих членов кластера о передаче данных. Узлы передают данные в отведенные для этого интервалы TDMA. После получения сообщений от всех узлов головной узел формирует свои сообщения и передает эти сообщения на шлюз или базовую станцию.

В стационарной фазе раунда данные передаются базовой станции. По сравнению с фазой настройки, стационарная фаза более продолжительна для того, чтобы минимизировать расход энергии. Для этого используется протокол MAC-уровня – CSMA (Carrier Sense Multiple Access), в котором каждый узел проверяет отсутствие передачи другими узлами, до начала передачи на транспортном уровне. Критическим параметром сети является процент узлов, которые являются головным узлом. В случае среднего и большого процента, и если расстояние до головного узла длиннее, чем между узлами и стоком, то тратится больше энергии. Оптимальным считается 5% головных узлов от количества всех узлов сети. В таком случае протокол помогает достигнуть уменьшение потребления общей энергии сети в семь – восемь раз в случае однонаправленной передачей, в четыре – восемь раз, при передаче пакетов по нескольким узлам сразу.

Если требуется, то все узлы становятся неработоспособными (сеть переходит в спящий режим), благодаря последовательному разделению ролей головных узлов.

Общий расход энергии сети минимизируется с помощью разделения нагрузки между всеми узлами в разные моменты времени.

Рассматриваемая радио-модель описывается следующими уравнениями:

$$E_{TX}(k, d) = E_{TX-elec} * k + E_{amp} * k * d^2,$$

$$E_{RX}(k) = E_{TX-elec}(k) * E_{RX}(k)$$

где E_{TX} – энергия, затрачиваемая на передачу; E_{RX} – энергия, потребляемая при приеме; $E_{TX-elec}$ и $E_{RX-elec}$ – энергии, необходимые для работы электронной схемы передатчика и приемника, соответственно; E_{amp} – энергия, необходимая для схемы усилителя; k – размер пакета; d – расстояние между передатчиком и приемником [10].

После установки, определения положения и кластеризации с определением головных узлов, каждый узел БСС может приступать к мониторингу обстановки в зоне ответственности и выполнению задач.

Паттерн построения рабочего канала. Для проектирования алгоритмов на уровне специализированной среды необходим канал передачи данных между контроллером и средой проектирования. Построение рабочего канала для наблюдения и обработки сигналов в реальном времени предполагает использование двух буферов для накопления и передачи данных позволяет организовать без разрывов сбор, обработку и визуализацию данных (для избежания потери данных скорость последующего процесса должна быть не ниже скорости предыдущего процесса).

Примером применения такой организации может быть модуль E14-440 [11–14] для многоканального ввода, вывода и обработки аналоговой и цифровой информации, подключаемый к компьютеру через шину USB.

Входные данные сначала заносятся в первую половину FIFO буфера АЦП [17–19]. После ее заполнения данные начинают передаваться в регистр процессора, в тоже время не прекращается сбор данных во вторую половину FIFO буфера. После накопления данных во второй половине FIFO буфера опять начинается передача данных в регистр процессора и параллельно продолжается сбор данных уже в первую половину.

Программы паттернов отправки сообщения о движении и определения направления движения написаны в среде Arduino. При обнаружении сигналов происходит сверка с базой сигнатур.

Описанный подход использован при проектировании системы управления группой автономных необитаемых аппарата при проведении разведывательно спасательных операций.

Пример использования программной реализации алгоритма вывода по паттерну. Решается проблема тактики поведения узла – автономного необитаемого аппарата (АНПА) на основании приведенных следующих данных. Входная информация:

а) *ситуационный вектор* $x_i, i = \overline{1,10}$ – Дальность до цели; Видимость; Глубина; Скорость; Запас хода; Количество боеприпасов; Состояние АНПА; Видимость противником; Метеорологические условия; Возможность атаки.

б) *термы*. Для каждой координаты ситуационного вектора определены термы (табл. 1).

Таблица 1

№ п/п	Координаты ситуационного вектора	Термы
1	Дальность до цели	Очень малая; Малая; Средняя; Большая; Очень Большая
2	Видимость	Нулевая; Малая; Средняя; Большая; Отличная
3	Глубина	Минимальная; Малая; Средняя; Большая; Максимальная
4	Скорость	Минимальная; Малая; Средняя; Большая; Максимальная
5	Запас хода	Почти нет; Малый; Средний; Достаточный; Максимальный
6	Количество боеприпасов	Почти нет; Мало; Среднее; Достаточное; Полный боезапас
7	Состояние АНПА	Авария; Пока движется; Без крит. Повреждений; Хорошее; Очень хорошее
8	Видимость противником	Оч. Низкая; Низкое; Среднее; Высокое; Оч. хорошее
9	Метеорологические условия	Оч. Плохие; Плохие; Нормальные; Хорошие; Отличные
10	Возможность атаки	Почти нет; Слабая; Средняя; Высокая; Оч. высокая

в) *функции принадлежности*. В качестве функций принадлежности выбраны трапецевидные функции принадлежности координат ситуационного вектора.

г) *Паттерны*: Залечь на дно; Вернуться на базу; Продолжать, но быть готовым вернуться; Продолжать, соблюдая осторожность; Продолжать выполнять задание в штатном режиме.

Каждое логическое высказывание – это нечеткое отношение соответствующих нечетких множеств. Например, для строки j это будет

$$a_1^{j1} \times a_2^{j2} \times \dots \times a_n^{jn}.$$

Функция принадлежности нечеткого множества, образованного этим нечетким отношением, будет

$$\mu_{a_1}^{j1}(x_1) \wedge \dots \wedge \mu_{a_i}^{ji}(x_i) \wedge \dots \wedge \mu_{a_n}^{jn}(x_n).$$

Здесь вычисление этого выражения осуществляется с помощью операции *min*.

Блок логических высказываний, относящийся к паттерну d_j , представляет собой объединение соответствующих нечетких множеств, образованных строками выделенного блока. Тогда функция принадлежности этого объединения будет определяться

$$\mu_{d_j}(x_i, i = \overline{1, n}) = \bigvee_{p=1}^j \bigwedge_{i=1}^n \mu_i^{pK_j}(x_i),$$

где « \bigvee » означает операцию *max*.

Формально представленный алгоритм определения функции принадлежности паттерна d_j можно записать в виде:

а) фиксируем произвольную точку

$$x_i^*, i = \overline{1, n} \in \times_{i=1}^n U_i.$$

б) для каждого блока матрицы знаний, соответствующего d_j , определим $\mu_{d_j}(x_i, i = \overline{1, n})$ в этой точке согласно табл. 2 [2, 3].

Таблица 2

№ п/п	Координаты ситуационного вектора					min	max	d_j
	x_1	...	x_i	...	x_n			
...
$j_1 \dots$ j_s \dots j_{K_j}	$(a_1^{j1})^*$... $(a_1^{js})^*$... $(a_1^{jK_j})^*$...	$(a_i^{ji})^*$... $(a_i^{js})^*$... $(a_i^{jK_j})^*$...	$(a_n^{jn})^*$... $(a_n^{js})^*$... $(a_n^{jK_j})^*$	$\min_i(a_i^{j1})^*$... $\min_i(a_i^{js})^*$... $\min_i(a_i^{jK_j})^*$	$\max_{j_s} \min_i(a_i^{jss})^*$	μ_{d_j}
...

Заметим, что для фиксированной точки $x_i^*, i = \overline{1, n} \in \times_{i=1}^n U_i$ блок матрицы, представленный в табл. 2, является числовым, так как вместо каждого терма a_i^{js} из этого блока поставлено значение его функции принадлежности $(a_i^{js})^*$, вычисленное в точке x_i^* . Операция $\min_i(a_i^{is})^*$ производится над числами, стоящими в строках « i » $\overline{1, n}$ и в столбец «min» заносится минимальное число в соответствующей

строке. Операция $\max_{j_s} \min_i(a_i^{j_s})^*$ определяет в полученном массиве строчных минимумов $j_s \in \overline{1, K_j}$ наибольшее значение. Проводя такие вычисления для каждой точки универсального множества, получим требуемые значения функции принадлежности.

Заключение. На основе подходов нечетких рассуждений представлен алгоритм оперативного вывода по выбору паттерна поведения в ситуации, соответствующей типовой ситуации. Он ориентирован как на автономное его использование, так и на встраивание его в бортовую интеллектуальную систему. В статье рассмотрены принципы работы БСС, определены модели индивидуального поведения автономного узла БСС. Предложены алгоритмы паттернов автономного интеллектуального устройства в составе БСС для решения следующих задач: 1) Динамического определения структуры сети в зависимости от текущего ее состояния; 2) Оперативного определения текущих координат узлов; 3) Определения местоположения узлов кластера с учетом топологии сети; 4) Установки узла в режим обнаружения сигнатур; 5) Определения при появлении сигнатур их типа путем сверки с базой паттернов, определения направления движения и местоположения; 6) Принятия решения о необходимости отслеживания или игнорирования сигнатуры; 7) Связи с другими узлами для выработки согласованных действий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Акулдиз И.Ф. Беспроводные сенсорные сети: обзор. – <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128601003024> (дата обращения: 09.01.2021).
2. Федунов Б.Е., Прохоров М.Д. Вывод по прецеденту в базах знаний бортовых интеллектуальных систем // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2010. – № 3. – С. 63-72.
3. Федунов Б.Е. Механизмы вывода в базе знаний бортовых оперативно советующих экспертных систем // Известия РАН ТиСУ. – 2002. – № 4.
4. Виноградов Г.П., Прохоров А.А., Шепелев Г.А. Паттерны в системах управления автономными системами // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2020. – № 1 (17). – С. 40-54. – Doi: 10.38028/ESI.2020.17.1.003.
5. Соснин П.И. Моделирование рассуждений: Конспект лекций. – Ульяновск: УлГТУ, 2000. – 74 с.
6. Виноградов Г.П. Паттерны в автономных системах при выполнении миссий // VIII Международная научно-практическая конференция «Нечеткие системы, мягкие вычисления и интеллектуальные технологии» НСМВИТ-2020 (29 июня – 1 июля 2020 г., г. Смоленск, Россия): Тр. конференции. В 2-х т. Т. 2. – Смоленск: Универсум, 2020.
7. Vinogradov G.P. Pattern control system // Software Journal: Theory and Applications. – 2020. – No. 2. – P. 10-19. – <http://swsys-web.ru/en/pattern-control-system.html>.
8. Федунов Б.Е. Бортовые интеллектуальные системы тактического уровня для антропоцентрических объектов (примеры для пилотируемых летательных аппаратов). – М.: Де Либри, 2018. – 246 с.
9. Еркин А. Расширение возможностей беспроводных сетей ZigBee: измерение координат узлов // Беспроводные технологии. – 2011. – № 1.
10. Сафронов П.С. Анализ характеристик протокола функционирования беспроводных сенсорных сетей LEACH: автореф. дисс. Южно-Уральский государственный университет, 2017.
11. Галкин П.В. Алгоритм управления и оптимизации информационных потоков в беспроводной сенсорной сети // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 3.
12. Галкин П.В. Модель и алгоритм управления информационными потоками в беспроводной сенсорной сети // Наукові праці ДонНТУ. – 2015. – № 1.
13. Муксунов Т.Р. Программно-аппаратные методы обработки сигналов для повышения эффективности радиоэлектронных датчиков: автореф. дисс. – Томск, 2015.
14. Тараканов Е.В. Экспериментальные исследования протокола передачи данных с приоритетами в беспроводной сенсорной сети в системе Tossim // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321, № 5.

15. Программирование Ардуино – документация. – <http://arduino.ru/Reference> (дата обращения: 27.12.2020).
16. Обработка данных с датчика в режиме квазиреального времени – статья. – <https://lhs-blog.info/programming/dlang/obrabotka-dannyih-s-datchika-v-rezhime-kvazirealnogo-vremeni/> (дата обращения: 29.12.2020).
17. Цветков А.А. Алгоритмы эффективного кодирования информационных источников в сенсорных сетях.
18. Еркин А. Расширение возможностей беспроводных сетей ZigBee: измерение координат узлов // Беспроводные технологии. – 2011. – № 1.
19. Сафронов П.С. Анализ характеристик протокола функционирования беспроводных сенсорных сетей LEACH: автореф. дисс. Южно-Уральский государственный университет, 2017.
20. Кучерявый А.Е. Интернет вещей // Электросвязь. – 2013. – №. 1. – С. 21-24.

REFERENCES

1. Akuldiz I.F. Besprovodnye sensornye seti: obzor [Беспроводные сенсорные сети: обзор]. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128601003024> (accessed 09 January 2021).
2. Fedunov B.E., Prokhorov M.D. Vyvod po pretsedentu v bazakh znaniy bortovykh intellektual'nykh sistem [Conclusion on the precedent in the knowledge bases of on-board intelligent systems], *Iskusstvennyy intellekt i prinyatie resheniy* [Artificial intelligence and decision-making], 2010, No. 3, pp. 63-72.
3. Fedunov B.E. Mekhanizmy vyvoda v baze znaniy bortovykh operativno sovetuyushchikh ekspertnykh sistem [Mechanisms of inference in the knowledge base of on-board operationally advising expert systems], *Izvestiya RAN TiSU* [Izvestiya RAS TiSU], 2002, No. 4.
4. Vinogradov G.P., Prokhorov A.A., Shepelev G.A. Patterny v sistemakh upravleniya avtonomnymi sistemami [Patterns in control systems of autonomous systems]. *Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii* [Information and mathematical Technologies in Science and Management], 2020, No. 1 (17), pp. 40-54. Doi: 10.38028/ESI.2020.17.1.003.
5. Sosnin P.I. Modelirovanie rassuzhdeniy: Konspekt lektsiy [Modeling reasoning: Lecture notes]. Ulyanovsk: UIGTU, 2000, 74 p.
6. Vinogradov G.P. Patterny v avtonomnykh sistemakh pri vypolnenii missiy [Patterns in Autonomous Systems when performing missions], *VIII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Nechetkie sistemy, myagkie vychisleniya i intellektual'nye tekhnologii» NSMVIT-2020 (29 iyunya – 1 iyulya 2020 g., g. Smolensk, Rossiya): Tr. Konferentsii* [VIII International Scientific and Practical Conference "Fuzzy Systems, Soft Computing and Intelligent Technologies" NSMVIT-2020 (June 29 – July 1, 2020, Smolensk, Russia): Proceedings of the conference]. In 2nd vol. Vol. 2. Smolensk: Universum, 2020.
7. Vinogradov G.P. Pattern control system, *Software Journal: Theory and Applications*, 2020, No. 2, pp. 10-19. Available at: <http://swsys-web.ru/en/pattern-control-system.html>.
8. Fedunov B.E. Bortovye intellektual'nye sistemy takticheskogo urovnya dlya antropotsentricheskikh ob"ektov (primery dlya pilotiruemykh letatel'nykh apparatov) [On-board intelligent systems of the tactical level for anthropocentric objects (examples for manned aircraft)]. Moscow: De Libri, 2018, 246 p.
9. Erkin A. Rasshirenie vozmozhnostey besprovodnykh setey ZigBee: izmerenie koordinat uzlov [Expanding the capabilities of ZigBee wireless networks: measuring the coordinates of nodes], *Besprovodnye tekhnologii* [Wireless technologies], 2011, No. 1.
10. Safronov P.S. Analiz kharakteristik protokola funktsionirovaniya besprovodnykh sensornykh setey LEACH: avtoref. diss. Yuzhno-Ural'skiy gosudarstvennyy universitet, 2017 [Analysis of the characteristics of the protocol for the functioning of wireless sensor networks LEACH: abstract dissertation. South Ural State University, 2017].
11. Galkin P.V. Algoritm upravleniya i optimizatsii informatsionnykh potokov v besprovodnoy sensornoy seti [An algorithm for controlling and optimizing information flows in a wireless sensor network], *Vostochno-evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy* [Eastern European Journal of Advanced Technologies], 2014, No. 3.
12. Galkin P.V. Model' i algoritm upravleniya informatsionnymi potokami v besprovodnoy sensornoy seti [Model and algorithm of information flow control in a wireless sensor network], *Naukovi pratsi DonNTU* [Scientific works of DonNTU], 2015, No. 1.

13. *Muksunov T.R.* Programmno-apparatnye metody obrabotki signalov dlya povysheniya effektivnosti radioelektronnykh datchikov: avtoref. diss. [Software and hardware methods of signal processing for improving the efficiency of radio-electronic sensors: abstract of the dissertation]. Tomsk, 2015.
14. *Tarakanov E.V.* Eksperimental'nye issledovaniya protokola peredachi dannykh s prioritetaми v besprovodnoy sensornoy seti v sisteme Tossim [Experimental studies of the data transmission protocol with priorities in the wireless sensor network in the Tossim system], *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of the Tomsk Polytechnic University], 2012, Vol. 321, No. 5.
15. Programmirovanie Arduino – dokumentatsiya [Arduino programming-documentation]. Available at: <http://arduino.ru/Reference> (accessed 27 Desember 2020).
16. Obrabotka dannykh s datchika v rezhime kvazireal'nogo vremeni – stat'ya [Processing data from the sensor in the quasi-real-time mode-article]. Available at: <https://lms-blog.info/programming/dlang/obrabotka-dannyih-s-datchika-v-rezhime-kvazirealnogo-vremeni/> (accessed 29 Desember 2020).
17. *Tsvetkov A.A.* Algoritmy effektivnogo kodirovaniya informatsionnykh istochnikov v sensornykh setyakh [Algorithms for efficient encoding of information sources in sensor networks].
18. *Erkin A.* Rasshirenie vozmozhnostey besprovodnykh setey ZigBee: izmerenie koordinat uzlov [Expanding the capabilities of ZigBee wireless networks: measuring the coordinates of nodes], *Besprovodnye tekhnologii* [Wireless technologies], 2011, No. 1.
19. *Safonov P.S.* Analiz kharakteristik protokola funktsionirovaniya besprovodnykh sensornykh setey LEACH: avtoref. diss. Yuzhno-Ural'skiy gosudarstvennyy universitet, 2017 [Analysis of the characteristics of the protocol for the functioning of wireless sensor networks LEACH: autoref. diss. South Ural State University, 2017].
20. *Kucheryavyu A.E.* Internet veshchey [Internet of Things], *Elektrosvyaz'* [Telecommunications], 2013, No. 1, pp. 21-24.

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

Виноградов Геннадий Павлович – НИИ «Центрпрограммсистем»; e-mail: wgp272ng@mail.ru; г. Тверь, Россия; д.т.н.; зав. лабораторией.

Емцев Александр Сергеевич – e-mail: emcev@cps.tver.ru; инженер-программист.

Федотов Илья Сергеевич – e-mail: twlucifer@gmail.com; инженер-программист.

Vinogradov Gennady Pavlovich – Research Institute "Tsentrprogramsistem"; e-mail: wgp272ng@mail.ru; Tver, Russia, dr. of eng. sc.; head of the laboratory.

Emtsev Alexander Sergeevich – e-mail: emcev@cps.tver.ru; software engineer.

Fedotov Ilya Sergeevich – e-mail: twlucifer@gmail.com; software engineer.

УДК 007.52:62.503.51

DOI 10.18522/2311-3103-2021-1-30-47

А.М. Маевский, Р.О. Морозов, В.А. Рыжов, А.Е. Горелый

РАЗРАБОТКА МНОГОУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЫ ПЛАНИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ГРУППЫ АНПА В НЕИЗВЕСТНОЙ СРЕДЕ С ПРЕПЯТСТВИЯМИ

Рассматривается проблема организации группового движения морских робототехнических комплексов (МРТК), в частности автономных обитаемых подводных аппаратов (АНПА), в априори неизвестной среде с препятствиями. Выполнен краткий анализ существующих проектов по тематике группового управления МРТК, и алгоритмов планирования движения. Наличие многочисленных исследований по данному направлению подтверждает актуальность обозначенной проблемы. Приведена формальная постановка задачи движения четырех роботов строем. Предлагаемый в работе метод планирования