

УДК 004.23, 004.72

DOI:10.25729/ESI.2025.37.1.005

## **Интеллектуализация системы управления узлом в реагирующих беспроводных сенсорных сетях<sup>1</sup>**

**Виноградов Геннадий Павлович**

НИИ Центрпрограммсистем,

Россия, Тверь, *wgp272ng@mail.ru*

**Аннотация.** *Актуальность.* Устойчивая тенденция расширения областей применения беспроводных решений и возрастание требований к их функциональности делают актуальными исследования по повышению их «интеллектуальности». *Цель работы.* Разработка методов, расширяющих функциональность системы управления узлом беспроводной сенсорной сети на базе нечеткого логического вывода и теории паттернов. *Использованы методы* теории нечетких множеств, теории построения нечетких моделей и сетей. *Основные результаты.* Вследствие сложности структурирования и математического описания поведения среды в зоне контроля узла, предложено использовать эффективные паттерны реагирования на изменение ее состояния. Для этого в информационные модели обстановки вводятся лингвистические переменные и нечеткие продукционные правила. Такой подход позволил обеспечить релевантное соотнесение вектора координат ситуации с тем или иным паттерном реагирования и уменьшить объем вычислений. Правила содержат ссылки на задачи по обработке первичных данных и процедуры реагирования средствами автономного узла сети. Для актуализации базы правил предложено использовать метаправила. Метаправила определяют параметры функций принадлежности и правила вывода при вычислении значений атрибутов. Это позволило дополнить пересылку данных пересылкой знаний, требуемых для необходимой настройки параметров алгоритмов локальных узлов. При таком подходе узел сети обладает знаниями о себе и о среде, становится способным к самостоятельному принятию решений и в составе группы. Для повышения робастности алгоритмов обработки данных в узлах предложено использовать понятие «типовая ситуация». В качестве примера в работе показано использование предложенного подхода в задачах комплексирования данных от нескольких сенсоров узла и обнаружения объекта проникновения.

**Ключевые слова:** модель, нечеткая логика, паттерн, беспроводная сеть, датчик

**Цитирование:** Виноградов Г.П. Интеллектуализация системы управления узлом в реагирующих беспроводных сенсорных сетях / Г.П. Виноградов // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 1(37). – С. 41-52. – DOI:10.25729/ESI.2025.37.1.005.

**Введение.** Беспроводные сенсорные сети (БСС) за счет таких характеристик, как низкое потребление энергии узлами, низкая стоимость, самоорганизация, небольшой размер и возможность определять местоположение событий получили применение в различных областях [1, 2, 3]. Увеличение объемов информации, передаваемой в БСС, породило ряд проблем, которые стали центром исследований в области беспроводных сенсорных сетей [1, 4, 5]. Они направлены на поиск путей расширения функциональности узлов сети, особенно при их применении в средах, характеризующихся неопределенностью [6]. Основные из них: осуществлять предварительную обработку информации, включающую кластеризацию, агрегацию и слияние разнородных данных [7, 8]; выполнять анализ обстановки; принимать решения с учетом получаемых данных от других узлов сети. Кроме того, система управления узлом должна осуществлять распределенную обработку сложных запросов внутри сети и маршрутизацию с оптимизацией расхода энергии. Реализация этих требований возможна путем совершенствования интеллектуальной составляющей системы управления, как сети в целом, так и отдельным узлом в частности. Работа посвящена разработке методов, расширяющих функциональность беспроводных сенсорных сетей и превращающих их в реагирующие беспроводные сенсорные сети (РБСС) [8]. Наиболее удобной для построения

<sup>1</sup> Статья является расширенной версией доклада автора на конференции КИИ-23 в г. Смоленске [1]

интеллектуальных систем распознавания ситуаций и поддержки принятия решений на основе сенсорных сетей является модель нечеткого сенсора [8, 9], ядром которого является машина вывода [7]. В узлы по сети могут пересылаться шаблоны правил (номера переменных и термов, входящие в левую и правую часть базы знаний, параметры новых термов, параметры треугольных норм) [7]. При решении задачи, например, слежения за целью, такие пересылки могут осуществляться узлами самостоятельно, на основании имеющихся правил, в зависимости от положения цели и содержания запроса.

### **1. Проблемы обработки данных в РБСС, требующие интеллектуализации сенсоров.**

Основными факторами, влияющими на функционирование РБСС, являются [8]:

- ограниченные вычислительные возможности узлов;
- малый радиус коммуникации между узлами (в военных приложениях он ограничен из-за требований скрытности);
- узлы и/или отдельные каналы связи могут временно прекращать функционировать, что приводит к изменению топологии РБСС;
- необходимость иметь множество дублирующих маршрутов передачи данных;
- неравномерный расход энергии в узлах;
- рост энергетических и временных затрат на передачу данных с увеличением размеров сети.

Две последние проблемы представляют для пользователя особую важность. Малая пропускная способность сети предполагает поиск решений снижения потока передаваемых данных через сеть за счет добавления распределенной иерархической обработки данных внутри сети и передачи пользователю лишь релевантных ответов на запрос. Известные же алгоритмы предполагают пересылку по сети больших объемов данных. Для решения данной проблемы предлагается дополнить пересылку данных пересылкой знаний, требуемых для необходимой настройки локальных узлов с целью решения задач предварительной обработки первичных данных, их агрегирования и комплексирования. Подобные решения позволяют рассматривать узел как интеллектуального агента, функционирующего в неопределенной, слабоструктурированной среде. Схемы поведения таких агентов, связанные с принятием решений и использованием «мягких» измерений, рассмотрены в [8]. Их реализация требует наличия базы знаний о себе и о среде, что делает агента способным к самостоятельному принятию решений, в том числе и в составе группы. Кроме того, у узла-агента возникает возможность управления имеющимися знаниями и их передачи другому узлу. Так, в [10] приведена схема интеграции алгоритмов поведения агента и интеграция схемы с языками машинного обучения

Ограниченные вычислительные ресурсы в условиях жестких требований к времени отклика, радиусу радиообмена и энергопотреблению предполагают разработку относительно простых алгоритмов для системы управления узлом РБСС. Известен ряд подходов к решению этой задачи. Так, в [11] предложено использовать процедурную матрицу знаний для «связывания» базы знаний с наблюдаемой ситуацией для выбора релевантного решения. Проблема при этом подходе состоит в формировании базы знаний, включающей способы действия и описание множества ситуаций, в которых они используются. Предлагаемая в данной статье технология основана на использовании методов нечеткой логики и эффективного опыта в форме паттернов [6, 8]. Пользователь задает характеристики объекта (виртуальные атрибуты), значения которых надо вычислить, и правила, при помощи которых эти атрибуты будут подсчитаны, и определяет правила обмена знаниями между узлами в сети.

**2. Формальное определение паттерна.** *Паттерн* – это модель поведения, получаемая как результат деятельности естественного или искусственного объекта, связанная с

мониторингом среды, принятием решения, его реализацией и т.д. [12]. Паттерн рассматривается, как шаблон (образец) для повторных действий в аналогичных типовых ситуациях (ТС). Поведение в ТС складывается из следующих компонентов:

- субъект, осуществляющий выбор (агент)  $k \in K$  ;
- окружение выбора  $S$  – множество элементов среды и их существенных свойств, изменение в любом из которых может стать причиной или продуцировать изменение состояния выбора;
- 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;
- возможные в окружении  $S$  результаты, существенные для агента –  $o_i^k \in O^k, i = \overline{1, m}$ ;
- способы оценки свойств получаемых результатов, отражающих их ценность для агента;
- модель ограничений, как требования на значения выходных переменных и выбор способов действия;
- модель предметной области, представляющая собой множество соотношений, описывающих зависимость результатов от выбора способа действия и возмущений (база знаний).

В соответствии с гипотезой о рациональном поведении агент формирует решение в соответствии с моделью [12]:

$$P_i^k(s \in S) = \underset{c_j^k}{\text{Arg max}} \left( \sum_{j \in J} E\varphi_i(o_i^k(c_j^k)) - EE_i^k(o_i^k(c_j^k)) \right)$$

$$c_j^k \in C^k(I_i^k), I_i^k \subseteq M, o_i^k \in O^k$$

$$\sum_i \chi_{i1}^k(E\varphi_i^k) \geq \chi_1^0, \sum_i \chi_{i2}^k(EE_i^k) \geq \chi_2^0$$

$$\sigma^k(Es^k(X)) \geq \sigma_0^k \quad (1)$$

Такая модель индивидуального поведения агента предполагает формирование базы знаний путем обучения на основе как экспериментального опыта, так и опыта эксперта, что позволяет реализовать эволюцию «кооперативного интеллекта», аналогичного тому, что имеет место у естественных существ. Как показано в [12], описание паттерна имеет форму алгоритмической модели. Набор моделей или поведенческих паттернов формирует опыт или базу паттернов. Соответствующая методика построения алгоритмической модели паттерна описана в [12]. Все компоненты такой модели, за исключением логических связей, могут быть языковыми конструкциями на естественном или ограниченном профессиональном языке.

Реализация предложенного подхода связана: 1) с правильным соотношением вектора координат ситуации с тем или иным паттерном, как с точки зрения их количества, так и с точки зрения формы представления каждой координаты; 2) с полнотой описания ситуации.

На узле установлены сенсоры, воспринимающие различные сигналы физической природы. Поскольку оператор описывает ситуацию средствами естественного языка, то координаты ситуационного вектора являются лингвистическими переменными. Для этого количественные шкалы в датчиках преобразуются в лингвистические. Результат затем может использоваться, например, для определения типа цели, степени ее угрозы и т.п. Вычисления значений в таком виртуальном сенсоре целесообразно выполнять средствами нечеткого вывода. Для двух типов данных в узле  $k$  должны храниться списки имен, таблицы значений атрибутов. Для вычисляемых атрибутов должны храниться нечеткие правила для вычисления атрибутов, параметры функций принадлежности термов.

**3. 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  $A_i = \{a_i^k, k = \overline{1, K^i}\}$  [8, 13]. Пусть определен набор классов реализаций ситуационного вектора, для которых есть паттерны поведения с успешным разрешением любой ситуации класса. При этом значения удельной ценности по результату и удельной ценности по эффективности превышают некоторый пороговый уровень при реализации паттерна.

Пусть накоплено множество паттернов  $d_j, j = \overline{1, p}$ , каждый из которых связан с множеством ситуаций кластера, для разрешения которых он был выбран. Тогда можно составить матрицу соответствия между классами 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 в результате можно получить кластер типовой ситуации. Для него паттерн поведения по структуре будет один и тот же, отличие будет в значениях параметров. Пронумеруем строки блока паттерна 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 ... (их примеры приведены ниже). Полученную упорядоченную таким образом систему логических высказываний будем называть нечеткой матрицей знаний или базой паттернов.

Первоначально каждый узел  $k$  имеет некоторый список физических атрибутов, который соответствуют его набору датчиков, пустую оболочку машины вывода и пустой список лингвистических атрибутов. Пользователь может добавить в список лингвистических атрибутов узла  $k$  новые лингвистические внутренние (выходные) атрибуты и послать правила их вычисления. После установления базы правил лингвистических атрибутов в машину вывода узел  $k$  начинает измерять значения внутренних физических атрибутов, получать от сети и пользователя значения внешних физических и лингвистических атрибутов [6, 7], и производить вычисления внутренних лингвистических атрибутов. Полученные значения внутренних физических и лингвистических атрибутов сохраняются в соответствующих списках и по требованию предоставляются пользователю или другим узлам сети. Пользователь или другие узлы сети могут добавлять в узел  $k$  или исключать лингвистические атрибуты базы правил.

**4. Алгоритм вычисления функции принадлежности паттерна.** 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 предпочтительным для разрешения проблемной ситуации будет паттерн  $d_j^*$ , вычисленный по правилу (2) [13]

$$d^*(x_i^*, i = \overline{1, n}) = \max_{j \in \overline{1, p}} d_j(x_i, i = \overline{1, n}) \quad (2)$$

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 [13]:

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

где « $\wedge$ » и « $\vee$ » означают операции  $\min$  и  $\max$  соответственно.

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

1. Фиксируем произвольную точку  $x_i^* \in \times_{i=1}^n U_i, i = \overline{1, n}$ , где « $\times$ » – символ  $n$  кратного декартового произведения множества  $U$  на себя.
2. Для каждого блока матрицы знаний, соответствующего  $d_j$ , определим  $\mu_{d_j}(x_i, i = \overline{1, n})$  в этой точке согласно правилу, приведенному в [13].

Проводя такие вычисления для каждой точки универсального множества, получим требуемые значения функции принадлежности.

Окончательно алгоритм определения функции принадлежности паттерна  $d_j$  можно записать в виде:

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

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  $\max_{j_s} \min_i (a_i^{js})^*$  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.

Код каждого порождающего правила является самодостаточным, т.е. весь необходимый контекст активизации правила содержится только в его предпосылках. В теории нечеткого вывода отсутствует способ вызова из одного правила другого, сходного при вызове процедур. Единственный способ сделать это – использовать метаправила. Они направляют ход измерений и вычислений атрибутов, но не принимают непосредственное участие в процессе вычисления. Как показано в [7], для управления передачей баз правил по сети могут использоваться нечеткие продукционные правила, что позволяет считать их метаправилами и ввести в сеть два типа нечетких сенсоров: сенсоры-координаторы и сенсоры, соответствующие уровням представления данных. Следовательно, при управлении РБСС каждый пакет данных может сопровождаться капсулами с правилами для их обработки узлом. Таким образом, в сети существуют два вида уровня трафика: трафик данных и трафик знаний, причем трафик знаний ставит целью минимизацию трафика данных. Это требует использования специализированного нечеткого языка представления знаний.

**5. Использование нечеткого сенсора для комплексирования данных.** В оценке текущей ситуации при использовании паттернов важную роль играют механизмы восприятия и понимания [14, 15, 16]. Во-первых, необходимо использование в информационных моделях обстановки лингвистических переменных. Это предполагает: 1) представление первичной информации от датчиков в вербальной форме, например, *объект проникновения находится близко, над* и т.п.; 2) связывание первичных данных и лингвистических данных для определения идентичности или распознавания объектов, например, *объект проникновения танк, животное, солдат и т.п.* [17]. В последнем случае используется числовая информация и информация, представленная в нечисловой форме. Во-вторых, для понимания и оценки обстановки необходимо ввести «виртуальные» переменные. Эта операция может быть выполнена алгоритмами комплексирования.

В работе [17] обосновано значение влияния виртуальных параметров на оценку ситуации. Показано, что построение и использование этих параметров имеет фундаментальное значение для восприятия ситуации и напрямую определяют поведение автономных систем. Однако предложенные методы сложны для реализации и не могут быть скорректированы в реальном времени оператором. В [18] предложено объединять несколько атрибутов с одного узла РБСС, используя байесовский подход. Однако он требует знания соответствующих законов распределения и выполнения предположения о стационарности. В [16] описан метод комплексирования данных, основанный на структуре доверия, для уменьшения атрибуции в грубом наборе с несколькими гранулами данных. Изучены фактические характеристики неполных упорядоченных информационных систем с несколькими гранулами. Однако их использование связано с разработкой достаточно громоздких алгоритмов, что затрудняет их использование в РБСС.

Анализ показал, что в указанных выше двух случаях целесообразно использовать нечеткие сенсоры, которые вычисляют и передают лингвистические значения результатов агрегации и слияния численных измерений [19]. В этом случае могут быть использованы следующие два метода для комплексирования базовых измерений. Первый из них осуществляет комбинацию существенных параметров с помощью выраженных связей между ними в виде правил. Во втором методе агрегация и слияние данных реализованы с помощью нечеткого разбиения числового многомерного пространства измерений [3]. Наилучший результат дает гибридизация этих двух подходов. Кроме того, этот подход привлекателен из-за его простоты и сходства с человеческим мышлением. Он позволяет в экспериментальной установке создавать условия для имитации ситуаций миссии различной интенсивности. Результаты экспериментов подтверждают обоснованность предложенного подхода с точки зрения точности и меньшего количества ложных срабатываний.

Слияние данных внутри сети может быть осуществлено иерархией узлов, между которыми динамически распределяются знания, необходимые для обработки данных в конкретном узле и в конкретной ситуации. Следующий пример иллюстрирует механизм вычисления значения лингвистического атрибута степени опасности от объекта проникновения на основе измерения параметров вибрации, акустики и магнитного поля путем агрегирования данных.

*R(1): ЕСЛИ (мощность сигнала сейсмодатчика – СРЕДНЯЯ И мощность акустического сигнала – ВЫСОКАЯ И сила сигнала магнитного датчика – ВЫСОКАЯ), ТО (опасность – ОЧЕНЬ ВЫСОКАЯ)*

*R(2): ЕСЛИ (мощность сигнала сейсмодатчика – НИЗКАЯ И мощность акустического сигнала – НИЗКАЯ И сила сигнала магнитного датчика – НИЗКАЯ), ТО (опасность – ОЧЕНЬ НИЗКАЯ)*

*R(3): ЕСЛИ (мощность сигнала сейсмодатчика – СРЕДНЯЯ И мощность акустического сигнала – СРЕДНЯЯ И сила сигнала магнитного датчика – НИЗКАЯ), ТО (опасность – НИЗКАЯ)*

На рис. 1 представлена диаграмма передачи данных и знаний по сети при обработке запроса «Сообщите ID ближайшего узла, вблизи которого находится объект проникновения, и соответствующую степень опасности».

Узел-координатор получил сообщение о фиксации тремя узлами факта нахождения объекта проникновения в их зоне ответственности. Очевидно, что выполнение запроса о его нахождении равносильно задаче поиска максимума в массиве (параметр степень опасности имеет числовой тип) для случая, когда его элементы распределены по узлам. Для решения задачи поиска узел-координатор запрашивает у ближайшего к нему узла ID и значение параметра степень опасности, запоминает его в переменной  $St_0$ , формирует правило

**ЕСЛИ** ( $St_0 < \text{степень опасности}$ ), **ТО** ( $St_0 = \text{степень опасности}$ ,  $Id_0=Id$ ),

и посылает это правило в базу знаний второму ближайшему узлу, затем активизирует его. Полученные данные запоминаются, формируется правило для следующего узла и т.д. В результате формируется массив значений и будет установлено, что ближайший узел к объекту проникновения – это узел\_3. Очевидно, что узел-координатор должен иметь таблицу подчиненных ему узлов с соответствующими данными.



**Рис. 1.** Пример обработки запроса

**6. Обнаружение и локализация вторжения.** Одной из важнейших функциональностей узлов РБСС является реализация двух задач: обнаружение объекта и локализация его в пространстве [10, 16]. Если, по крайней мере, три интеллектуальных узла (ИСУ) фиксируют событие проникновения, то для локализации объекта вторжения можно использовать эффективный метод триангуляции для локализации объекта. Три сенсора с достаточной степенью точности локализуют объект [20].

Поскольку ИСУ будут активизироваться по событиям, то поток данных будет направляться по нескольким ветвям сети от различных ИСУ из зоны вторжения. В связи с этим возникает задача (например, в пункте управления, или в головном узле кластера, или в обоих местах одновременно) обработки таких данных. Например, вторжение группы танков или бронемашин, или вторжение танков с мотопехотой и т.п. В этом случае от различных ИСУ, фиксирующих факт проникновения, будут поступать данные, предполагающие как слияние данных, так и слияние решений. При этом данные могут образовывать комбинацию зависимых (коррелированных) или независимых (некоррелированных) компонентов. Корреляция будет свидетельствовать об обнаружении одного и того же объекта различными ИСУ. Тогда обработка данных будет включать алгоритмы триангуляции с последующим агрегированием данных для уточнения сигнатуры объекта вторжения. В противном случае либо уточняются сигнатуры, либо фиксируется новый объект и выполняется его локализация [6, 21].

Поскольку сенсоры ИСУ рассчитаны на диапазон сигналов, то путем установки различных порогов можно обнаруживать и идентифицировать объекты с сигнатурами, характеризующимися отличающимися частотными диапазонами и мощностями спектров излучения. Узел должен иметь возможность хранить массив, например, измерений акустического поля: частота излучения, мощность излучения, формируемые с заданным интервалом дискретизации (определяется точностью измерения).

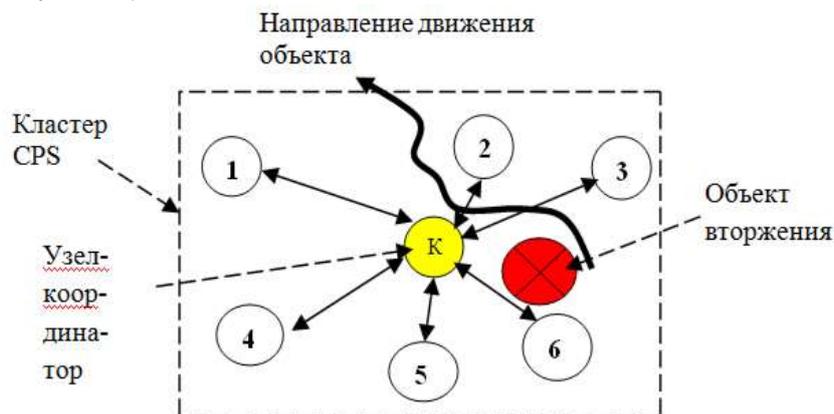
Полученные и обработанные данные в пункте управления РБСС используются для отображения ситуации вторжения и активизации задачи слежения за объектами вторжения.

Алгоритм слежения включает в себя: идентификацию таким ИСУ, который близок к объекту вторжения (сбор данных об изменении положения объекта, локализацию зоны вторжения, оценку основных параметров объекта вторжения, формирование сигнатур объектов вторжения, моделирование сигнатур, сопоставление записей с модельными, прогнозирование и оценка возможной траектории, создание и обновление записей о траектории объекта).

На рис. 2 иллюстрирована процедура активизации узлов, ближайших к узлу, обнаружившему факт проникновения объекта противника.

Пусть несколько ИСУ засекли цель и ее локализовали [6]. Возникает проблема, какой из этих ИСУ будет ее сопровождать. Пусть в сети РБСС выполняется отслеживание одной цели.

*R(1): ЕСЛИ (степень опасности > d), ТО (активизировать узлы согласно таблице связей с соседними узлами).*



**Рис. 2.** Активизация ближайших узлов к узлу, зафиксировавшему факт проникновения в зону защиты

Каждый объект вторжения в поле сенсора ИСУ генерирует изменяющееся во времени поле пространственной сигнатуры, которое воспринимается с использованием нескольких модальностей. Тогда движущийся объект – это пространственный пик в поле сигнатуры, который перемещается во времени. Следовательно, отслеживание цели – это отслеживание местоположения пика в течение времени. Для этого с помощью правила в примере (рис. 2) в поле РБСС динамически определяется пространственная ячейка. Внутри ячейки узел ИСУ с максимальной степенью опасности координирует задачи слежения. Можно сформулировать пять основных шагов алгоритма слежения:

1. ИСУ вблизи центра кластера потенциальных целевых траекторий должны быть активированы. ИСУ внутри кластеров должны взаимодействовать для определения факта присутствия цели в кластере.
2. Ближайший ИСУ должен быть активирован, начать передавать информацию об объекте (тип и т.п.), инициировать отслеживание данным ИСУ.
3. ИСУ передает в центр информацию: оценку местонахождения цели, направление движения, скорость. Вычисляется прогноз будущей позиции цели.
4. Эта информация передается в соседние ИСУ и кластеры (для облегчения слежения).
5. Если цель обнаружена в зоне ответственности предупрежденного ИСУ, этот ИСУ активируется, и работа алгоритма повторяется с п. 1. Шаг траектории цели отображается в пункте управления.

**Заключение.** Предложен достаточно простой способ представления знаний в узле РБСС в виде нечетких продукций. Так как задание функций принадлежности нечетких лингвистических переменных, извлечения правил из данных представляет достаточно длительный процесс, то использование обучающей выборки, отражающей мнение эксперта о процессе измерения и поведения, может значительно его ускорить.

Ближайшей целью разработчиков является использование, помимо нечетких сенсоров, нейро-нечетких сетей (вложенных в один узел или распределенных по РБСС), алгоритмов для управления адаптацией и обучением нечетких сенсоров. Это существенно повысит эффективность РБСС в решении для таких задач, как слежение за стационарными и мобильными объектами, мониторинг внешней среды. Описанный подход реализован в форме программного продукта. Он написан на языке программирования диалекте С, как набор взаимодействующих задач и процессов. Его дополнительные инструменты представлены в форме Java-приложений и интерфейсов для shell-скриптов. Операционная система содержит встроенные интерфейсы, модули и специфические настройки, которые позволяют создавать программу как набор модулей, реализующих заданные функциональности и обеспечивают интерфейс к стандартным аппаратным средствам ввода, вывода и датчикам.

**Конфликт интересов.** Процесс написания и содержание статьи не дают оснований для постановки вопроса о конфликте интересов.

#### **Список источников**

1. Виноградов Г.П. Расширение функциональности узлов в беспроводных сенсорных сетях / Г.П. Виноградов // В сборнике: Двадцать первая Национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием (КИИ-2023). Труды конференции. В 2-х томах. – Смоленск, 2023. – С. 42-54.
2. Иконостасова Л. Г. Интернет вещей (IoT) с поддержкой беспроводных сенсорных сетей. Проблемы безопасности и современные решения / Л.Г. Иконостасова // Актуальные исследования, 2023. – №25 (155). – Ч.1. – С. 25-28. – URL:[https://apni.ru/article/6575-internet-veshchey-iot-s-podderzhkoj-besprovod.](https://apni.ru/article/6575-internet-veshchey-iot-s-podderzhkoj-besprovodnykh-sensornykh-setey)
3. Mamuna M., Shaista H., Abdul R.J., et al. Applications of wireless sensor networks and Internet of Things frameworks in the industry revolution 4.0. A systematic literature review, 2022, no. 22(6), pp, 23-38, DOI:10.3390/s22062087.
4. Прокопчина С.В. Байесовские интеллектуальные измерения / С.В. Прокопчина. – М: ИД «Научная библиотека», 2021. – 580 с.
5. Ефименко, М.С. Беспроводные сенсорные сети / М.С. Ефименко, С.И., Клымов, Р.Б. Саткенов // Молодой ученый, 2018. – № 51 (237). – С. 40-42. – URL: <https://moluch.ru/archive/237/55115/>.
6. Виноградов Г.П. Алгоритмы управления процессами в реагирующих сенсорных сетях для задач защиты объектов / Г.П. Виноградов // Программные продукты и системы, 2022. – № 2. – С. 229-239.
7. Аверкин А.Н. Создание универсального интерфейса высокого уровня для “умного” узла беспроводной сенсорной сети / А.Н. Аверкин, Г.К. Лавров // Системный анализ в науке и образовании: сетевое научное издание. – Дубна, 2015. – №2. – С. 11–33. – URL: <https://sanse.ru/index.php/sanse/article/view/455>.
8. Виноградов Г.П. Беспроводные сенсорные сети в защищаемых зонах / Г.П. Виноградов, А.С. Емцев, И.С. Федотов // Известия ЮФУ. Технические науки, 2021. – № 1. – С. 19–30.
9. Демидова Л.А. Принятие решений в условиях неопределенности / Л.А. Демидова, В.В. Кираковский, А.Н. Пылькин. – М.: Горячая линия –Телеком, 2021. – 284 с.
10. Ahmed Burhan Mohammed, Lamia Chaari Fourati, Ahmed M. Fakhrudeen Comprehensive systematic review of intelligent approaches in UAV-based intrusion detection, blockchain, and network security. Computer networks, 2024, vol. 239, pp. 1-18, DOI:10.1016/j.comnet.2023.110140.
11. Федунев Б.Я. Решение задач по прецеденту в базах знаний бортовых интеллектуальных систем тактического уровня на этапах выполнения миссии подвижным объектом / Б.Я. Федунев // Известия РАН. Теория и системы управления, 2023. – № 1. – С. 137-147.
12. Vinogradov G.P., Konyukhov I.A. Patterns in smart wireless sensor network nodes. International scientific conference “Information technologies for industry” (ITI’22). Lecture notes in networks and systems, Springer nature Switzerland AG, 2022, pp. 73–82.
13. Борисов В.В. Нечеткие модели и сети / В.В. Борисов, В.В. Круглов, А.С. Федунев. – М: Горячая линия Телеком, 2012. – 284 с.
14. Huang Z., Tang J., Shan G., et al. An efficient passenger-hunting recommendation framework with multi-task deep learning. IEEE Internet of Things journal, 2021, no. 2, pp, 99-115, DOI:10.1109/IJOT.2019.2901759.
15. Chen Z., Zhang Y., Wu C., Ran B. Understanding individualization driving states via latent Dirichlet allocation model. IEEE Intelligent transportation systems magazine, 2019, no. 11(2), pp. 41-53, DOI:10.1109/MITS.2019.2903525.

16. Chengfeng Long, Xingxin Liu, Yakun Yang, et al. A data fusion method in wireless sensor network based on belief structure. EURASIP Journal on wireless communications and networking. 2021, no. 86, DOI:10.1186/s13638-021-01916-4.
17. Yeong D. Velasco-Hernandez G., Barry J., et al. Sensor and sensor fusion technology in autonomous vehicles. A Review, Sensors, 2021, no. 21(6), pp. 21-40, DOI:10.3390/s21062140.
18. Khalid W., Sattar A, Qureshi M., et al. A smart wireless sensor network node for fire Turkish journal of electrical engineering & computer science, 2019, no. 27, pp. 2541-2556, DOI:10.3906/elk-1812-81.
19. Детков А.Н. Оптимальное комплексирование измерителей при сопровождении маневрирующего объекта в статистически неопределенных ситуациях / А.Н. Детков // Известия РАН. Теория и системы управления, 2023. – № 1. – С. 28-43.
20. Wang Zh., Shen H., Zhou Zh. Improved DV-Hop model based on the application of variable. Ad Hoc Networks, 2024, vol. 154, pp. 1-10, DOI:10.1016/j.adhoc.2023.103368.
21. Ma Y. et al. Path planning for searching submarine with cooperative coverage of fixed-wing UAVs cluster in complex boundary sea area. IEEE Sensors, 2023, no. 24, vol. 23, pp. 30070-30083.

*Виноградов Геннадий Павлович. Профессор Тверского государственного технического университета, заведующий лабораторией НИИ Центрпрограммсистем, член Российской ассоциации искусственного интеллекта, член Российской ассоциации нечетких систем и мягких вычислений. Основные направления научной деятельности: искусственный интеллект, принятие решений, многоагентные системы. AuthorID:149735, SPIN: 7288-4042, ORCID: 0000-0001-5757-2753, Scopus AuthorID:23976986500, wgp272ng@mail.ru, 170024, Россия, г. Тверь, ул. Республиканская, д.11, кв. 130.*

---

UDC 004.23, 004.72

DOI:10.25729/ESI.2025.37.1.005

## **Intelligent node management system in responsive wireless sensor networks**

**Gennady P. Vinogradov**

Research Institute of Centerprogramssystems,  
Russia, Tver, wgp272ng@mail.ru

**Abstract.** Relevance. Wireless sensor networks (BSN) due to such characteristics as low energy consumption by nodes, low cost, self-organization, distribution and small size, the ability to determine the location of events have been applied in various fields. The increase in the amount of information transmitted to the BSS has created a number of problems that have become the focus of research in the field of wireless sensor networks. They are aimed at finding ways to expand the functionality of network nodes, especially when used in environments characterized by uncertainty. The main ones are: the network node must be capable of pre-processing information, including clustering, aggregation and merging of heterogeneous data, studying the situation and making decisions, both independently and as part of a group, taking into account the data received from other network nodes. In addition, the node management system must perform distributed processing of complex requests within the network and routing with optimized energy consumption. The implementation of these requirements is possible by improving the intellectual component of the management system of both the network as a whole and an individual node in particular. The purpose of the work. Development of methods that extend the functionality of a wireless sensor network node control system based on fuzzy logic inference and pattern theory. Main results: Due to the complexity of structuring and mathematically describing the behavior of the environment in the node's control area, it is proposed to use effective patterns of response to changes in its state. For this purpose, linguistic variables and fuzzy production rules are introduced in information models of the environment. This approach made it possible to ensure a relevant correlation of the coordinate vector of the situation with a particular response pattern and reduce the amount of calculations. The rules contain references to primary data processing tasks and response procedures by means of an autonomous network node. It is proposed to use meta-guidelines to update the rule base. Meta-guidelines define the parameters of membership functions and the rules of inference when calculating attribute values. This made it possible to supplement data transfer with the transfer of knowledge required for the necessary configuration of the parameters of the algorithms of local nodes. With this approach, the network node has knowledge about itself and the environment, and becomes capable of independent decision-making as part of

a group. To increase the robustness of data processing algorithms in nodes, it is proposed to use the concept of a "typical situation". As an example, the paper shows the use of the proposed approach in the tasks of integrating data from several sensors of a node and detecting an intrusion object.

**Keywords:** model, fuzzy logic, pattern, wireless network, sensor

## References

1. Vinogradov G.P. Rasshireniye funktsional'nosti uzlov v besprovodnykh sensorynykh setyakh [Expanding the functionality of nodes in wireless sensor networks]. V sbornike: Dvadsat' pervaya Natsional'naya konferentsiya po iskusstvennomu intellektu s mezhdunarodnym uchastiyem (KII-2023). Trudy konferentsii. V 2-kh tomakh [In the collection: The Twenty-first national conference on artificial intelligence with international participation (CII-2023). Proceedings of the conference. In 2 volumes]. Smolensk, 2023, pp. 42-54.
2. Iconostasova L. G. Internet veshchey (IoT) s podderzhkoy besprovodnykh sensorynykh setey. Problemy bezopasnosti i sovremennyye resheniya [Internet of Things (IoT) with support for wireless sensor networks. Security problems and modern solutions]. Aktual'nyye issledovaniya [Current research], 2023, no. 25 (155), Part I, pp. 25-28, available at: <https://apni.ru/article/6575-internet-veshchey-iot-s-podderzhkoj-besprovod>.
3. Mamuna M., Shaista H., Abdul R.J., et al. Applications of wireless sensor networks and Internet of Things frameworks in the industry revolution 4.0. A systematic literature review, 2022, no. 22(6), pp. 23-38, DOI:10.3390/s22062087.
4. Prokopchina S.V. Bayesovskiy intellektual'nyye izmereniya [Bayesian intellectual measurements]. M: ID "Nauchnaya biblioteka" [Moscow: Publishing house "Scientific Library"], 2021, 580 p.
5. Efimenko M.S., Klymiv S.I. Satkenov R.B. Besprovodnyye sensorynyye seti [Wireless sensor]. Molodoy uchenyy [Young Scientist], 2018, no. 51 (237), pp. 40-42, available at: <https://moluch.ru/archive/237/55115/>.
6. Vinogradov G.P. Algoritmy upravleniya protsessami v reagiruyushchikh sensorynykh setyakh dlya zadach zashchity ob"yektov [Process control algorithms in responsive sensor networks for object protection tasks]. Programmnyye produkty i sistemy [Software products and systems], 2022. – No. 2. – pp. 229-239.
7. Averkin A.N., Lavrov G.K. Sozdaniye universal'nogo interfeysa vysokogo urovnya dlya "umnogo" uzla besprovodnoy sensornoy seti [Creation of a universal high-level interface for a smart node of a wireless sensor network]. Sistemnyy analiz v nauke i obrazovanii: setevoye nauchnoye izdaniye, Dubna [System analysis in science and education: online scientific publication, Dubna], 2015, no. 2, pp. 11-33, available at: <https://sanse.ru/index.php/sanse/article/view/455>.
8. Vinogradov G.P., Yemtsev A.S., Fedotov I.S. Besprovodnyye sensorynyye seti v zashchishchayemykh zonakh [Wireless sensor networks in protected areas]. Izvestiya YUFU, Tekhnicheskiye nauki [Bulletin of SFedU, Technical sciences], 2021, no. 1, pp. 19-30.
9. Demidova L.A., Kirakovsky V.V., Pylkin A.N. Prinyatiye resheniy v usloviyakh neopredelennosti [Decision-making in conditions of uncertainty]. M: Goryachaya liniya –Telekom [Moscow: Hotline – Telecom], 2021, 284 p.
10. Ahmed Burhan Mohammed, Lamia Chaari Fourati, Ahmed M. Fakhrudeen Comprehensive systematic review of intelligent approaches in UAV-based intrusion detection, blockchain, and network security. Computer networks, 2024, vol. 239, pp. 1-18, DOI:10.1016/j.comnet.2023.110140.
11. Fedunov B.Ya. Resheniye zadach po pretседentu v bazakh znaniy bortovykh intellektual'nykh sistem takticheskogo urovnya na etapakh vypolneniya missii podvizhnym ob"yektom [Solving problems based on precedent in the knowledge bases of onboard intelligent tactical-level systems at the stages of mission fulfillment by a mobile object]. Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya [Bulletin RAS. Theory and control systems], 2023, no. 1, pp. 137-147.
12. Vinogradov G.P., Konyukhov I.A. Patterns in smart wireless sensor network nodes. International scientific conference "Information technologies for industry" (ITI'22). Lecture notes in networks and systems, Springer nature Switzerland AG, 2022, pp. 73–82.
13. Borisov V. V., Kruglov V.V., Fedunov A.S. Nechetkiye modeli i seti [Fuzzy models and networks]. M: Goryachaya liniya –Telekom [Moscow: Hotline – Telecom], 2012, 284 p.
14. Huang Z., Tang J., Shan G., et al. An efficient passenger-hunting recommendation framework with multi-task deep learning. IEEE Internet of Things journal, 2021, no. 2, pp. 99-115, DOI:10.1109/JIOT.2019.2901759.
15. Chen Z., Zhang Y., Wu C., Ran B. Understanding individualization driving states via latent Dirichlet allocation model. IEEE Intelligent transportation systems magazine, 2019, no. 11(2), pp. 41-53, DOI:10.1109/MITS.2019.2903525.
16. Chengfeng Long, Xingxin Liu, Yakun Yang, et al. A data fusion method in wireless sensor network based on belief structure. EURASIP Journal on wireless communications and networking. 2021, no. 86, DOI:10.1186/s13638-021-01916-4.
17. Yeong D. Velasco-Hernandez G., Barry J., et al. Sensor and sensor fusion technology in autonomous vehicles. A Review, Sensors, 2021, no. 21(6), pp. 21-40, DOI:10.3390/s21062140.

18. Khalid W., Sattar A, Qureshi M., et al. A smart wireless sensor network node for fire Turkish journal of electrical engineering & computer science, 2019, no. 27, pp. 2541-2556, DOI:10.3906/elk-1812-81.
19. Detkov A.N. Optimal'noye kompleksirovaniye izmeriteley pri soprovozhdenii manevriruyushchego ob"yekta v statisticheski neopredelennykh situatsiyakh [Optimal integration of measuring instruments when accompanying a maneuvering object in statistically uncertain situations]. Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya [Bulletin RAS. Theory and control systems], 2023, no. 1, pp. 28-43.
20. Wang Zh., Shen H., Zhou Zh. Improved DV-Hop model based on the application of variable. Ad Hoc Networks, 2024, vol. 154, pp. 1-10, DOI:10.1016/j.adhoc.2023.103368.
21. Ma Y. et al. Path planning for searching submarine with cooperative coverage of fixed-wing UAVs cluster in complex boundary sea area. IEEE Sensors, 2023, no. 24, vol. 23, pp. 30070-30083.

**Vinogradov Gennady Pavlovich.** Professor of Tver state technical university, 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. Main areas of scientific activity: artificial intelligence, decision-making, multi-agent systems, AuthorID:149735, SPIN: 7288-4042, ORCID: 0000-0001-5757-2753, Scopus AuthorID:23976986500, wgp272ng@mail.ru, 170024, Russia, Tver, Republikanskaya str., 11, sq. 130.

Статья поступила в редакцию 18.11.2024; одобрена после рецензирования 13.02.2025; принята к публикации 05.03.2025.

The article was submitted 11/18/2024; approved after reviewing 02/13/2025; accepted for publication 03/05/2025.