

OPTIMIZATION MODEL FOR THE USE OF POWER STORAGE IN DISTRIBUTED GENERATION SYSTEMS

K.B. KORNEEV, Cand. Sc., Yu.M. PAVLOVA, Cand. Sc,
M.B. MANKOV, Postgraduate, R.OSEI-OVUSU, Postgraduate

Tver State Technical University,
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: energy-tver@mail.ru

An approach to the construction of an optimal configuration of electrical networks containing power storage and alternative energy facilities is considered. It was emphasized that increasing the share of alternative energy requires intensive use of battery-based power storage devices. It is indicated that this leads to a significant complication of calculations of the optimal state of the power system, taking into account the non-stationary nature of the output and consumption of electricity. It is proposed to apply methods of optimization modeling and system analysis with elements of predictive models of behavior of power system facilities to build a control system for an electric grid complex, which will ensure the maintenance of the required level of reliability of electricity supply to consumers, as well as to reduce suboptimal flows of electric energy.

Keywords: power supply system, forecast, control, reliability, batteries, power storage, optimization.

Поступила в редакцию/received: 08.02.2025; после рецензирования/revised: 09.02.2025;
принята/accepted: 17.02.2025

УДК 004.896

АРХИТЕКТУРА КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Г.П. ВИНОГРАДОВ, д-р техн. наук, Н.В. КИРСАНОВА, ст. препод.

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: lena.tver@inbox.ru

© Виноградов Г.П., Кирсанова Н.В., 2025

Современные возможности обнаружения противника, высокая мобильность боевых систем требуют немедленного принятия решений. Продемонстрирован один из способов решения этой проблемы – использование киберфизических систем в вооруженных силах. Показано, что основой подобных систем должны быть реагирующие беспроводные сенсорные сети (РБСС). Приведен вариант построения архитектуры РБСС для военных приложений с использованием сенсорных узлов с радиосвязью ближнего действия, а также беспроводных шлюзов, обеспечивающих беспроводную связь на большие расстояния. Разработан механизм обнаружения вторжения объекта в защищаемую зону с применением возможностей реагирующих беспроводных сенсорных сетей. Сделан вывод, что основой механизма обнаружения являются последовательности изображений (кадров), позволяющие определить значения, с помощью которых строятся модель сети, модель движения объектов, модель измерений и т. п.

Ключевые слова: распределенный процесс, отслеживание целей, обнаружение, локализация, классификация, сенсорный узел.

DOI: 10.46573/2658-5030-2025-2-103-113

ВВЕДЕНИЕ

Киберфизические системы в вооруженных силах – новая концепция передачи данных между физическими объектами различных родов войск («вещами»), оснащенными встроенными средствами сбора, обработки данных и информационными технологиями для взаимодействия друг с другом с целью информирования командиров всех уровней о ситуационной обстановке и принятия эффективных решений [1–4]. Подобные системы позволяют при выполнении боевых задач соединить физические процессы, требующие практической реализации управления в режиме реального времени, с программно-электронными системами и информационными технологиями. Из практики локальных войн в Сирии, Ираке, а также при проведении специальной военной операции на Украине стало ясно, что необходим переход от встраивания в систему управления войсками отдельных компонент (решающих частные задачи), к технологиям представления всего процесса ведения боевых операций в настоящем времени. В этом процессе ключевыми становятся проблемы временной синхронизации большого числа видов и средств, участвующих в боевом столкновении, для достижения поставленных целей, решения выдвинутых задач и получения результата оптимальным способом.

Тактические киберфизические системы – основа, обеспечивающая превосходство над противником, так как наличие этих систем гарантирует ситуационную осведомленность обо всем стратегическом спектре боевых операций и принятие решений в условиях жестких временных ограничений; все это достигается путем обработки максимально возможной совокупности мультимедийных и мультиспектральных данных в реальном времени. Эта способность позволяет реализовать адаптированное планирование боевых задач; вести целеуказание, оценку боевых потерь, мониторинг надежности распределенных мобильных средств связи и тому подобного на уровне зоны ведения боевой операции. При этом мобильное боевое информационное оборудование, тактические сетевые средства связи и специальные оперативные средства управления интегрируются с регулируемыми, устойчивыми, прозрачными для пользователя глобальными сетями, что соответствует философии «солдат как система». Основой киберфизических систем являются реагирующие беспроводные сенсорные сети (РБСС), рассматриваемые в качестве базы для сбора и обработки исходной информации, лежащей в основу военных предложений.

АРХИТЕКТУРА РБСС КАК ЭЛЕМЕНТ КИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Беспроводные сенсорные сети – новое поколение сетей – рассматривается как одна из технологических основ окружающего интеллекта, способного собрать огромное количество информации из внешней среды. В настоящее время сенсорные узлы оснащены достаточно мощным бортовым процессором, что позволяет использовать их мощности для выполнения простых вычислений, частичной обработки и передачи данных, принятия решений локально, в зоне своей ответственности.

Вариант архитектуры РБСС для военных приложений может быть построен путем применения сенсорных узлов с радиосвязью ближнего действия, а также беспроводных шлюзов, обеспечивающих беспроводную связь на значительные расстояния. Это гарантирует большую гибкость и расширяемость в возможных видах

операций (как небольшого одиночного кластера сенсорных узлов, так и множества соединений на площади до 20 км²).

Сенсорные узлы находятся на первом уровне иерархии, на котором выполняют основные операции мониторинга и воздействия на среду. Они оснащены встроенными преобразователями, такими как акустические, сейсмические, пассивные инфракрасные (PIR), магнитные, пьезоэлектрические и другие, для обнаружения событий, представляющих интерес. При этом они способны подтвердить обнаружение благодаря перекрестному поиску и произвести классификацию. Каждый узел датчика в сети действует как маршрутизатор, пересылая пакеты данных на соседние узлы. Они формируют сеть на лету и поддерживают единый радиоинтерфейс для 2-направленной 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 для узлов 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 с целью получения изображений, близких к реальному времени и пр.). Узлы слияния на втором уровне иерархии, в отличие от типичной РБСС, образуют специальную сеть, обеспечивающую охват территории при расширенном варианте развертывания сети. Они могут быть оснащены несколькими радиоинтерфейсами для связи с сенсорными узлами и другими узлами слияния, а также для передачи данных на большие расстояния в 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 (MN) на третьем уровне обеспечивает оперативный контроль и управление системой. Для связи с указанным узлом узел слияния на этом уровне использует канал дальней связи. Авторизированные пользователи, согласно правам доступа, получают доступ к системе с узлов слияния данных второго уровня или с узла управления третьего уровня. С портативного устройства (ноутбука) или стационарного персонального компьютера пользователь, имеющий надлежащую авторизацию, может запрашивать события и подписываться на них, получать оповещения и просматривать историю действий системы.

Сенсорный узел. Сенсорный узел (*мод*) используется как для мониторинга среды, так и для воздействия на среду самостоятельно или в составе группы средств. Его архитектура характеризуется пятью основными компонентами:

- 1) сенсорной подсистемой, включающей в себя датчики и радар, для контроля состояния внешней среды, с соответствующими аналого-цифровыми преобразователями;
- 2) подсистемой обработки, содержащей микроконтроллеры и память для хранения данных;
- 3) радиопередатчиком для беспроводной передачи данных;
- 4) устройством электропитания;
- 5) подсистемой исполнения решений.

В зависимости от конкретного применения сенсорные узлы могут обладать дополнительными компонентами, такими как система позиционирования, мобилизатор средств изменения местонахождения и т. п. Сенсорные узлы образуют сенсорное поле. Как правило, они находятся в спящем состоянии. Когда происходит событие (неожиданно или по расписанию, в определенное время) эти узлы «просыпаются»,

самоорганизовываются 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.

Область применения РБСС – это, как правило, неопределенные и плохо организуемые среды, поэтому достичь желаемой эффективности подобных комплексов возможно главным образом путем совершенствования интеллектуальной составляющей их системы управления в целом и отдельных узлов в частности. Ситуация усложняется из-за наличия требований скрытости, миниатюризации, экономичного энергопотребления. На практике требуется в качестве мота сети использовать автономный узел, который должен обладать свойством интеллектуального поведения: быть способным к изучению 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 [1–3] показано, что такое описание можно реализовать, если выяснить классы типовых ситуаций и успешные способы действия в реальных условиях для формирования моделей поведения (паттернов). Обобщенная логическая схема описания алгоритма дана в работе [5]:

Имя паттерна:

$$\begin{aligned} &\text{так как [мотивы } M] \\ &\text{поскольку [цели } G] \\ &\text{если [предусловие } U^*] \\ &\text{то способ действия [} r_Q(t) \text{]} \\ &\text{из-за чего [поступление } U^{**}] \\ &\dots \\ &\text{есть альтернатива [} r_p(t) \text{]} \end{aligned} \quad (1)$$

В модели (1) все составляющие, кроме логических связей, могут представлять собой языковые конструкции на естественном языке или естественно-профессиональном языке. Следовательно, модель (1) – типовая естественно-языковая модель паттерна. Формальная модель паттерна поведения в типовой ситуации приведена в [6]. 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 использования (потребности $\rightarrow$ мотивы $\rightarrow$ цели). Контекст определяется ожидаемыми постусловиями. Постусловия связаны с целями, затребовавшими паттерн, но отражают их в форме возможного состояния, к которому приведет применение паттерна. Цели задают желаемое состояние и являются причинами оценивания необходимости и полезности стремления к их достижению. Способ действия представляет собой код как естественно-языковое описание схемы действия, приводящей к выполнению паттерна. Такое описание имеет вид методик, реализованных на языке программирования.

Набор моделей или паттернов поведения образует опыт или базу знаний его носителя. Модель индивидуального поведения автономного узла предполагает

формирование базы паттернов на основе экспериментального опыта, что и позволяет реализовать эволюцию паттерна «кооперативного интеллекта», благодаря использованию искусственного когнитивного процесса, аналогичного тому, что имеет место быть у естественных существ. Отметим, что в системе, появившейся на основе знаний, эта возможность отсутствует.

Для реализации описанного подхода используют программно-технический комплекс, позволяющий производить моделирование среды (контекста) и паттерна поведения эксперта (агента) [7].

Архитектура интеллектуальной системы управления РБСС 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 является РБСС, рассматриваемая как некоторая функциональная система. Она осуществляет:

- 1) расчет текущих показателей удельной ценности по результатам и эффективности в момент t [5];
- 2) расчет и реализацию способа действия (поведения) в момент t согласно заданному паттерну поведения;
- 3) мониторинг результатов реализации паттерна поведения.

Оператор отрабатывает указанные паттерны при выполнении миссии и выполняет анализ ее выполнения. Узел рассчитывает последовательности состояний $y(t)$, реализует задачи миссии и выполняет расчет оценки удельной ценности и эффективности [5, 6] отработки 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 [6]. Процесс получения знания в предлагаемой схеме похож на процесс биологической эволюции. Следовательно, критерием истинности знания искусственной сущности является *«приспособленность»* этого знания для решения задач предметной области.

Система локализации, классификации, отслеживания и поражения объектов вторжения в защищаемую зону. Локализация, классификация и отслеживание объектов вторжения в защищаемую зону особо важных объектов составляют основу системы защиты.

В системах защиты от вторжения реагирующие РБСС являются интерфейсом между физическим миром и информационными технологиями [8, 9]. Важнейшей характеристикой этих приложений выступает продолжительность жизненного цикла, определяемая возможностями энергетической системы сенсорной сети [1]. Поток вторжений быстро движущихся целей в сенсорную сеть оказывает наиболее сильное воздействие на длительность ее жизненного цикла [1]. Это ставит перед разработчиком ряд задач. Возможные подходы и варианты их решения рассматривались в [3, 7]. Изложенные в указанных источниках алгоритмы обнаружения и отслеживания основаны на обработке сигналов на базовой станции, в то время как локализация и отслеживание множества целей требуют совместной работы группы узлов. Повышение живучести системы защиты связано с наделением ее набором следующих функций:

1. Распределение и обработка (CSP).
2. Обработка данных по событию [2].
3. Агрегирование информации.

4. Динамическая кластеризация.

Входные данные для обнаружения и локализации объектов РБСС. Объект проникновения в процессе движения генерирует сигналы. Величина уровня мощности воспринимаемого сенсорами сигнала (англ. *RSSI, om Received Signal Strength Indicator*) зависит от расстояния *узел – цель*. Спектр сигналов будет иметь максимум при прохождении цели над узлом или в непосредственной близости, и он может рассматриваться как индивидуальная характеристика цели или сигнатура, которую можно использовать при определении типа цели.

Событие «**обнаружение цели**» будет возникать тогда, когда выход сенсора узла превышает некоторый порог, величина которого регулируется так, чтобы частота ложной тревоги не превышала некоторую настраиваемую норму. Значение сигнала при перемещении объекта воспринимается «широковещательно», т. е. все узлы, в радиусе восприятия которых находится цель, ее «слышат». Узлы, «слышащие» цель, осуществляют считывание значений спектра сигнала цели в определенные моменты времени ее движения. Тем самым формируются пространственная и временная характеристики поля фактической сигнатуры цели. Характер изменения цели пространственно-временной сигнатуры задает частоту временной дискретизации в пространстве-времени и количество активируемых узлов. В работах [3] для обеспечения отслеживания цели и эффективной локальной обработки данных в сенсорной сети предложено разделить область проникновения на пространственно-временные ячейки (окна). Их размер зависит от скорости, направления движения и показателя затухания прохождения сигнала в среде. Размер ячейки должен приблизительно соответствовать области, внутри которой в течение некоторого времени спектр считываемой сигнатуры остается практически постоянным, а его падение на границах не превышает некоторого порогового значения. Это предполагает введение пространственно-временных координат в анализ и динамическую коррекцию размера пространственно-временных ячеек на основе прогнозируемых местоположений, типов целей и показателей их движения.

МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ

Модель сети РБСС. Беспроводная сенсорная сеть состоит из S узлов акустических датчиков, и все узлы равномерно распределены в зоне мониторинга. Положение каждого сенсорного узла известно, и он может фиксировать интенсивность воспринимаемого звука [5]. Между сенсорными узлами реализована беспроводная сеть, и каждый узел «знает» местоположение своих соседних узлов (расстояние меньше расстояния связи).

Модель движения объектов проникновения в РБСС. Предположим, что K целей перемещаются в зоне мониторинга, причем *известно, что K является фиксированным*. Перемещение полей относительно независимо, а состояние k -й цели в момент времени t описывается так:

$$\begin{aligned} X_{k,t} &= [x_{k,t}, y_{k,t}, \dot{x}_{k,t}, \dot{y}_{k,t}] \quad k = \overline{1, K}; \\ X_{k,t} &= f(X_{k,t-1}, w_{k,t-1}), \end{aligned}$$

где $f(\bullet)$ – функция передачи состояния, которая может быть линейной или нелинейной функцией [10]; $w_{k,t-1}$ – шум состояния k -й цели.

Причем для $w_{k,t-1}$ известна функция распределения вероятностей.

Модель измерения. Предположим следующее: все датчики являются акустическими; наблюдение датчика представляет собой наложение звуковых сигналов

от нескольких целей на окружающий шум [4]; наблюдения отдельных датчиков независимы друг от друга. Тогда в момент времени t энергия звукового сигнала, принимаемого датчиком узла s в положении $r_s = [x_s, y_s]$:

$$y_{s,t} = g_s(X_t) + v_{s,t} = \sum_{k=1}^K \frac{\psi_k}{\|r_s - l_{k,t}\|} + v_{s,t}, \quad (2)$$

где $g(\bullet)$ – функция звуковой энергии от цели, измеренная s -м узлом [10]; $X_t = [X_{1,t}^T, X_{2,t}^T, \dots, X_{K,t}^T]$ – совместное состояние K целей; ψ_k – энергия звука от k -й мишени, измеренная на единичном расстоянии; $l_{k,t}$ – положение объекта k в момент времени t ; $v_{s,t}$ – интенсивность шума, получаемая датчиком в момент времени t (она не зависит от $w_{k,t}$, $k = 1, 2, \dots, K$). Выражение

$$\|r_s - l_{k,t}\| = \sqrt{(x_s - x_{k,t})^2 + (y_s - y_{k,t})^2} -$$

это евклидово расстояние между r_s и $l_{k,t}$ (норма, $k = \overline{1, K}$).

Уравнение (2) – коэффициент потерь, который определяется средой распространения сигнала и может считаться постоянным и равным для всех датчиков. Когда длина временного окна T для усреднения энергии достаточно велика, можно считать, что значения $v_{s,t}$ подчиняются нормальному распределению со средним значением μ_v , и дисперсией σ_v^2 .

Распределенный алгоритм отслеживания нескольких целей. В РБСС плотность узлов, как правило, высока. Если все узлы всегда активны, то ресурсы узлов тратятся впустую, что легко приводит к конфликтам связи. Целесообразно, чтобы узел, как правило, находился в «спящем» состоянии и только при получении сообщения об активации от другого узла «просыпался» и начинал участвовать в наблюдении. Из наблюдения датчика следует, что когда датчик расстояния до цели находится далеко, сигнал, принимаемый датчиком от цели, невелик (это приводит к небольшому соотношению сигнал/шум и информация о наблюдениях практически не влияет на обновление оценки состояния цели). Поэтому при отслеживании следует в каждый момент времени выбирать только необходимые узлы для участия в наблюдении вокруг цели в соответствии с воспринимаемой информацией о состоянии каждой цели. **Когда в зоне мониторинга РБСС находится несколько целей и эти цели расположены так далеко друг от друга, что сигналы от других целей, принимаемые датчиками вблизи одной из них, являются слабыми и могут быть проигнорированы, то ВЫПОЛНЯЕТСЯ ОТСЛЕЖИВАНИЕ ТОЛЬКО ОДНОЙ ЦЕЛИ.** Только когда цели находятся близко друг к другу настолько, что сигналы, принимаемые датчиками вблизи цели, являются более сильными (выше заданного порога), тогда измерение СЧИТАЕТСЯ ОТ НЕСКОЛЬКИХ ЦЕЛЕЙ, что требует многоцелевого измерения и совместного сглаживания. На результатах проведенного выше анализа базируется идея предполагаемого распределенного алгоритма отслеживания нескольких целей, которая звучит так: **ДЛЯ КАЖДОЙ ЦЕЛИ ОДНОВРЕМЕННО ВЫБИРАЕТСЯ ОДИН ГЛАВНЫЙ УЗЕЛ (главная идея алгоритма).** Главный узел, соответствующий цели, запускает алгоритм фильтра частиц.

Главный узел выбирают соответствующие подчиненные узлы для участия в наблюдении в соответствии с заданными правилами и оценивают расстояние между целями также согласно определенным правилам. Если цель находится далеко от других целей, то выполняется отслеживание только одной цели. Если цель находится вблизи нескольких узлов, то все главные узлы обмениваются информацией о прогнозировании состояния цели и используют информацию о полученных нескольких состояниях цели для вычисления веса частиц текущей цели, чтобы реализовать распределенное отслеживание нескольких целей. Главные узлы, соответствующие конкретным целям, обмениваются данными о состоянии посредством беспроводной связи.

Выбор ведущего и ведомого узлов. На начальном этапе следует указать узел, ближайший к каждой цели, в качестве ее главного узла и в соответствии с априорной информацией о каждой цели. В процессе отслеживания текущий главный узел выбирает узел, ближайший к прогнозируемому положению цели, в качестве главного узла на следующий момент согласно прогнозируемому положению цели, т. е. в каждый момент главный узел каждой цели выбирает определенный подчиненный узел для участия в наблюдении в следующий момент времени. При выборе подчиненных узлов могут использоваться различные правила.

Правила многоцелевого совместного отслеживания. Совместное отслеживание нескольких целей требуется только в том случае, если расстояния между ними относительно малы и сигналы влияют друг на друга. Поскольку это распределенное отслеживание, информация о каждой цели хранится на разных главных узлах и указанным ранее набором невозможно напрямую оценить расстояние до целей. Согласно описанному выше алгоритму выбора главного и ведомого узлов, все подчиненные узлы находятся вблизи главного узла. Таким образом, можно использовать главный узел для создания общего подчиненного узла, определяющего расстояния между объектами. Инфологический смысл: главный узел выбирает подчиненный в соответствии с определенными правилами.

Пусть подчиненный узел получает сообщение от более чем двух главных узлов одновременно, т. е. от главных узлов $S_1, S_2, \dots, S_N$. Тогда подчиненный узел отправляет информацию об узлах $j, j = 1, 2, \dots, N$ и $j \neq i$ своему главному узлу S_i , чтобы узел S_i знал, что цель им должна отслеживаться совместно с другими $N - 1$ главными узлами. Если главный узел S_i не получает информацию, относящуюся к цели другого главного узла, то цель, соответствующая главному узлу, выполняет отслеживание единственной цели.

Распределенный процесс отслеживания. Распределенное многоцелевое отслеживание состоит в поиске соответствия между каждой целью в предыдущем и последующем кадрах последовательно. В случае интеллектуального мониторинга городского дорожного движения отслеживаемая скорость движущейся цели обычно составляет менее 36 км/ч. Она контролируется камерой с частотой 30 кадров в секунду, расстояние между соседними кадрами составляет менее 1 м. Можно сформулировать характеристики в последовательности собранных смежных изображений:

один и тот же объект съемки должен иметь наименьшую среднюю разницу в оттенках серого между двумя соседними кадрами;

между соседними кадрами одного и того же объекта должны быть перекрывающиеся области, такие, что абсолютное значение разницы этих площадей было бы минимальным.

С помощью этих характеристик определяют три собственных значения (центроидное расстояние L , средний уровень серого H и разность площадей A) по формулам [3–5]:

$$L_{ij} = \frac{\sqrt{(x_t^i - x_{t-1}^i)^2 + (y - y_{t-1}^i)^2}}{\max_{x^n} \left\{ \sqrt{(x_t^i - x_{t+1}^n)^2 + (y - y_{t+1}^n)^2} \right\}}, \quad n = \overline{1, K}, \quad (3)$$

$$H_{ij} = \frac{|G_t^i - G_{t+1}^i|}{\max_{x^n} |G_t^i - G_{t+1}^n|}, \quad (4)$$

$$A_{ij} = \frac{|S_t^i - S_{t+1}^i|}{\max_{x^n} |S_t^i - S_{t+1}^n|}. \quad (5)$$

где t – номер последовательности; i, j – номера кадров.

Формулы (3)–(5) представляют взаимосвязь между оценками цели в текущем кадре и соответствующими значениями оценки объекта в следующем, где (x, y) – координата центра тяжести объекта, G – шкала серого объекта, A – площадь объекта и определенный вектор признаков равен $V = (L, H, A)^T$. Функция измерения расстояния между объектами

$$D^{mn} = V^{mn} W,$$

где W – диагональная матрица 3×3 , представляющая вес (w_l, w_h, w_a) элемента вектора признаков; m и n – порядковые номера объектов в соседних кадрах.

Вес объектов не фиксирован.

Если рассматривать многоцелевое сопоставление как глобальную задачу оптимизации, то цель состоит в том, чтобы определить общее оптимальное соответствие для каждой цели в соседнем кадре путем нахождения минимального значения D_T :

$$D_T = \sum_{m=1}^K D^{mn},$$

где K – количество целей в следующем кадре.

При введении множителя Лагранжа

$$D_T = \sum_{m=1}^K D^{mn} + \lambda(w_l w_h w_a - 1). \quad (6)$$

Чтобы определить минимальное значение D_T , найдем производную D_T (см. формулу (6)) по каждому параметру и приравняем к нулю:

$$\begin{cases} \frac{\partial D_T}{\partial w_l} = 0; & \frac{\partial D_T}{\partial w_h} = 0; & \frac{\partial D_T}{\partial w_a} = 0; \\ & w_l w_h w_a - 1 = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Решением уравнения (7) является

$$\begin{cases} w_l = \sqrt[3]{\sum_{m=1}^k H^{mn} \sum_m^k A^{mn}} / \sqrt[3]{\left(\sum_{m=1}^k L^{mn}\right)^2} \\ w_h = \sqrt[3]{\sum_{m=1}^k L^{mn} \sum_m^k A^{mn}} / \sqrt[3]{\left(\sum_{m=1}^k H^{mn}\right)^2} \\ w_a = \sqrt[3]{\sum_{m=1}^k H^{mn} \sum_m^k L^{mn}} / \sqrt[3]{\left(\sum_{m=1}^k A^{mn}\right)^2} \end{cases} \quad (8)$$

Для того чтобы найти наилучшее приближение, следует сначала вычислить соответствующее значение веса согласно (8). Затем определить минимальное значение D^{mn} ; соответствующая ему область R^m будет наилучшим соответствием R^n . Если значение D^{mn} больше порогового значения α , это означает, что цель не была найдена в следующем кадре и центр тяжести находится на краю изображения. Данная ситуация соответствует исчезновению цели из последующего изображения. Если цель совпадает, то все еще остаются избыточные цели в выбранной цели и центр тяжести находится на краю изображения. Эта ситуация соответствует появлению новой цели. Если новая цель просто попадает на изображение, то она будет находиться в процессе сопоставления в следующем цикле. Новая цель добавляется в список целей и, если цель покидает экран, цель удаляется из списка целей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для повышения возможностей применения РБСС в военных приложениях исследования и разработки данных сетей должны быть направлены на создание: отечественных 1-кристаллических процессоров; на разработку алгоритмов идентификации нескольких одновременных событий, классификации объектов и событий в задачах обнаружения; на миниатюризацию и интеграцию различных типов датчиков, повышение их надежности; на совершенствование форматов и стандартов на выходах датчиков и коммуникаций. Актуальными проблемами являются разработка алгоритмов Sensor Data Mining на основе методов искусственного интеллекта и интеллектуального анализа данных, синтеза и генерации знаний на базе бортовой осведомленности и онтологий. Увеличение жизненного цикла сети возможно при разработке новых источников питания и энергетически эффективных протоколов коммуникации между узлами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Shit R.C., Sharma S., Puthal D., Zomaya A.Y. Location of Things (LoT): A Review and Taxonomy of Sensors Localization in IoT Infrastructure. URL: https://www.researchgate.net/publication/322729301_Location_of_Things_LoT_A_Review_and_Taxonomy_of_Sensors_Localization_in_IoT_Infrastructure (дата обращения: 21.02.2025).
2. Виноградов Г.П., Емцев А.С., Федотов И.С. Беспроводные сенсорные сети в защищаемых зонах // *Известия Южного федерального университета. Технические науки*. 2021. № 1 (218). С. 19–30.
3. Brooks R.R., Griffin C. Traffic model evaluation of ad hoc target tracking algorithms // *The International Journal of High Performance Computing Applications*. 2002. V. 16. № 3. P. 221–234. URL: <https://pure.psu.edu/en/publications/traffic-model-evaluation-of-ad-hoc-target-tracking-algorithms> (дата обращения: 21.02.2025).
4. Lee E.A., Seshia S.A. Introduction to embedded systems: A cyber-physical systems approach. MIT press, 2017. 589 p. URL: <https://ptolemy.berkeley.edu/books/leeseshia/> (дата обращения: 21.02.2025).

5. Xu Y., Winter J., Lee W.C. Prediction-based strategies for energy saving in object tracking sensor networks. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1263084> (дата обращения: 22.02.2025).

6. Toor A.S., Jain A.K. A survey on wireless network simulators // *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*. 2017. V. 6. № 1. P. 62–69.

7. Chen J.C., Hudson R.E., Yao K. Maximum-likelihood source localization and unknown sensor location estimation for wideband signals in the near-field. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1018778> (дата обращения: 22.02.2025).

8. Бородин А.С., Волков А.Н., Мутханна А.С., Кучерявый А.Е. Искусственный интеллект в сетях связи пятого и последующих поколений // *Электросвязь*. 2021. № 1. С. 17–22.

9. Виноградов Г.П., Конюхов И.А., Шепелев Г.А. Подход к проектированию программного обеспечения систем управления искусственными сущностями // *Программные продукты и системы*. 2021. Т. 34. № 1. С. 5–18.

10. Rodriguez-Zurrutero R., Utrilla R., Rozas A., Araujo A. Process management in IoT operating systems: Cross-influence between processing and communication tasks in end-devices // *Sensors*. 2019. V. 19. № 4. P. 805.

Для цитирования: Виноградов Г.П., Кирсанова Н.В. Архитектура киберфизических систем // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2025. № 2 (26). С. 103–113.

ARCHITECTURE OF CYBER-PHYSICAL SYSTEMS

G.P. VINOGRADOV, Dr. Sc., N.V. KIRSANOVA, Senior Lecturer

Tver State Technical University,
22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver, e-mail: lena.tver@inbox.ru

Modern enemy detection capabilities and high mobility of combat systems require immediate decision-making. One of the ways to solve this problem is demonstrated – the use of cyber-physical systems in the armed forces. It is shown that the basis of such systems should be responsive wireless sensor networks (BSN). A variant of the RBS architecture for military applications using sensor nodes with short-range radio communications and gateways and providing wireless communication over long distances is presented. A mechanism for detecting the intrusion of an object into a protected area using the capabilities of responsive wireless sensor networks has been developed. It is concluded that the detection mechanism is based on sequences of images (frames) that allow determining the values used to build a network model, a model of object movement, a measurement model, etc.

Keywords: distributed target, tracking process, detection, localization, classification, sensor node.

Поступила в редакцию/received: 26.02.2025; после рецензирования/revised: 03.03.2025;
принята/accepted: 10.03.2025