

УДК 004.77

doi: 10.15622/rcai.2025.090

ИНТЕРНЕТ БОЕВЫХ ВЕЩЕЙ В ВООРУЖЁННЫХ СИЛАХ

Г.П. Виноградов (*wgp272ng@mail.ru*)

НИИ «Центрпрограммсистем», Тверь

Статья посвящена актуальной проблеме – созданию Интернета боевых вещей. Рассмотрены предпосылки, обуславливающие актуальность. Рассмотрено состояние вопроса и результаты применения технологии «умного города» в вооружённых силах США. Показано, что реагирующие сенсорные сети определяют эффективность подобных технологий. Предложен вариант архитектуры реагирующей сенсорной сети. Представлен вариант построения элементов архитектуры и наиболее важных алгоритмов: позиционирования и отслеживания мобильности целей.

Ключевые слова: Интернет боевых вещей, реагирующая сенсорная сеть, управление, отслеживание, модель измерения.

Введение

Современные возможности обнаружения противника, высокоточное вооружение и высокая мобильность боевых систем требуют быстрого принятия решений. Одним из способов решения этой проблемы стало применение решений на базе Интернета вещей, названным **Интернетом боевых вещей** (англ. **Internet of Battle Things, IoBT**) [Winkler et al., 2008]. Это концепция сети передачи данных между физическими объектами различных родов войск («вещами»), оснащёнными встроенными средствами сбора, обработки данных и информационными технологиями для взаимодействия друг с другом с целью информирования командиров всех уровней о ситуационной обстановке и выработки эффективных решений. IoBT позволяет реализовать совершенно новый способ проведения военных операций, при котором все участники (техника, живая сила, штабы и т.д.) связаны единой информационной сетью для выполнения всего спектра основных и вспомогательных боевых задач.

1. Предпосылки использования Интернета вещей (IoT) в военной сфере

Роботизированная автоматизация процессов решения задач, основанных на правилах в вооруженных силах.

Датафикация – процесс, позволяющий сделать данные простыми для понимания и использования путем объединения процессов сбора, обработки, агрегирования и представления данных.

Цифровые двойники. Технология цифровых двойников позволяет создать виртуальные модели физических систем или процессов, *которые можно использовать для моделирования, анализа и оптимизации.*

Периферийные вычисления позволяют приблизить вычислительную мощность к источнику данных, когда критически важно время, необходимое для передачи и обработки данных.

Сети 5G работающие в диапазоне частот миллиметровых волн, что позволяет передавать данные с высокой скоростью.

Достижения в области микроэлектроники и сенсорных сетей и создание реагирующих беспроводных сенсорных сетей (РБСС), используемых для контроля физических параметров некоторой области и выработки воздействия на нее для получения желаемых состояний [Бородин и др., 2021].

2. Состояние вопроса с IoT в ВС

Лидерство по применению IoT в военных целях принадлежит США. С августа 2019 года в США начато изучение возможности применения инфраструктуры "умного" города на поле боя. Тестируется глобальная сеть дальнего радиуса действия (LoRaWAN) при создании и модернизации «умных» военных баз [Chen et al., 2001].

Разработано мобильное приложение АТАК (Android Tactical Assault Kit), позволяющее накапливать данные в режиме real-time и накладывать их на Google Maps. В зоне боевых действий это решение используется для передачи данных от наводчика на цель пилоту самолета или оператору БПЛА.

Попытки американских военных развить глобальную сеть наталкиваются на проблемы уязвимости IoT-сетей, когда они становятся объектом атаки [Rippin et al., 2012].

3. Кибер-физические системы – основа военного Интернета вещей

В военном применении Интернета вещей одной из ключевых стала тема кибер-физических систем (КБФ). Суть их состоит в том, что они соединяют физические процессы при выполнении боевых задач, требующие управления в режиме реального времени, с программно-электронными системами и информационными технологиями. Тактические кибер-

физические системы, обеспечивающие ситуационную осведомленность во всем стратегическом спектре боевых операций и принятие решений в условиях жестких временных ограничений, основа для превосходства над противником. Обработка максимально возможной совокупности мультимедийных и мультиспектральных данных в реальном времени позволяет реализовать адаптивное планирование боевых задач, вести целеуказание, оценку боевых потерь, оценивать надежность распределенных мобильных средств связи и т.п. на уровне зоны проведения боевых операций. Для этого мобильное боевое информационное оборудование, тактические сетевые средства связи и спешенные оперативные средства управления, интегрируются с регулируемыми, устойчивыми и прозрачными для пользователя глобальными сетями. Основой КБФ являются реагирующие беспроводные сенсорные сети (РБСС), обеспечивающие сбор, обработку исходной информации для военных приложений и реализацию решений.

4. Примерная архитектура РБСС военного назначения

В настоящее время РБСС рассматривается как одна из технологических основ окружающего интеллекта [Бородин и др., 2021], [Shit et al., 2018]. Вариант архитектуры РБСС для военных приложений может быть построен с использованием сенсорных узлов с радиосвязью ближнего действия и беспроводных шлюзов с беспроводной связью на большие расстояния, что обеспечивает большую гибкость и расширяемость в возможных видах операций от небольшого одиночного кластера сенсорных узлов до множества соединений на площади до 20 км² [Виноградов и др., 2021]. Сенсорные узлы находятся на первом уровне иерархии, где они выполняют основные операции мониторинга и воздействия на среду. Они оснащены встроенными преобразователями, такими как акустические, сейсмические, пассивные инфракрасные (PIR), магнитные и пьезоэлектрические и др. для обнаружения событий, представляющих интерес. Каждый узел датчика в сети действует как маршрутизатор, пересылая пакеты данных на соседние узлы. Они формируют сеть «на лету» и поддерживают единый радиоинтерфейс для двунаправленной связи между узлами с датчиками и узлом слияния.

На втором уровне иерархии узлы слияния обеспечивают более сложные функции, такие как синхронизация баз данных, формирование кластеров, логики работы приложения и управление. Узлы слияния получают информационные запросы от пользователей, отслеживают команды, отвечают на запросы, формируют задачи узлам датчиков, собирают информацию и сохраняют историю событий, произошедших в зоне ответственности, охватываемой узлом слияния. Узлы слияния могут выступать в качестве исполнительных механизмов в сети, например, для запуска ракет, открытие огня и пр. Узлы слияния на втором уровне иерархии также об-

разуют специальную. Они могут быть оснащены несколькими радио интерфейсами для связи с сенсорными узлами и другими узлами слияния, а также для передачи данных на большие расстояния на узел управления. Сенсорные узлы и узлы слияния образуют кластеры, которые соединяются между собой через головные узлы для создания автоматической сенсорной системы.

Узел управления на третьем уровне обеспечивает оперативный контроль и управление системой. Узел слияния на этом уровне использует канал дальней связи для связи с узлом управления. Авторизованные пользователи могут в соответствии с правом доступа получать доступ к системе с узлов слияния данных на уровне 2 или с узла управления на уровне 3.

5. Сенсорный узел

Сенсорный узел (модуль) используется как для мониторинга среды, так и для локального или в составе группы воздействия на среду. В последнем случае он называется реагирующим. Его архитектура содержит пять основных компонент [Виноградов и др., 2021]: 1) сенсорная подсистема, включающая датчики и радар, для контроля состояния внешней среды с соответствующими преобразователями; 2) подсистема обработки, включающая микроконтроллеры и память для хранения данных; 3) радиопередатчик для беспроводной передачи данных; 4) устройство электропитания; 5) подсистема исполнения решений. Сенсорные узлы образуют сенсорное поле, как правило, они находятся в спящем состоянии. Когда происходит событие, или по расписанию в определенное время, узлы «просыпаются», самоорганизуются в сеть и передают информацию в центр сбора данных. Область применения РБСС – 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.

6. 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 [Виноградов и др., 2021], [Brooks et al., 2002] показано, что такое описание можно реализовать, если выявить классы типовых ситуаций и успешные способы действия в реальных условиях для формирования моделей поведения (паттернов). В работах [Xu et al., 2004], [Виноградов и др., 2020] дана следующая обобщенная логическая схема описания паттерна

Имя паттерна:
 так как [мотивы M]
 поскольку [цели G]
 если [предусловия U']
 то способ действия
 из-за чего [постусловие U'']
 ...
 есть альтернатива []

(1)

В этой модели все составляющие, кроме логических связок, могут представлять собой языковые конструкции на естественном или естественно-профессиональном языке. Модель (1) – типовая естественно-языковая модель паттерна. Формальная модель паттерна поведения в типовой ситуации приведена в [Toor et al., 2017], [Vinogradov, 2020]. Там же показано, что модель предметной области и модель принятия решений в условиях дефицита времени можно формализовать с помощью нечетких продукционных сетей. Мотивы в модели (1) – это причины, определяемые потребностями и/или обязательствами. Они побуждают агента к активности, в рамках которой потребовался паттерн. Описание мотивов и целей в модели (1) представляет контекст повторного применения паттерна с позиции необходимости и возможности его применения (потребности → мотивы → цели). Контекст определяется «ожидаемыми» постусловиями. Постусловия связаны с целями, затребовавшими паттерн, но отражают их в форме возможного состояния, к которому приведет применение паттерна. 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.

Для этого предложено состояние ситуации описывать ситуационным вектором _____, каждая координата которого лингвистическая переменная с множеством термов _____. Пусть определен набор классов реализаций ситуационного вектора, при котором есть паттерн поведения с успешным разрешением любой ситуации класса (кластера). Пусть накоплено множество _____ паттернов, каждый из которых связан с множеством кластеров ситуаций, для разрешения которых он был

выбран. Предложено составить матрицу соответствия кластеров ситуаций и располагаемым множеством паттернов поведения. В соответствии с (1) ядром системы управления становится машина нечеткого вывода с набором нечетких продукционных правил (база знаний) и алгоритмами перевода численных значений в лингвистическую форму и обратно. Как результат можно реализовать любую зависимость между входными и выходными переменными и, основное, организовать пересылку как новых шаблонов правил, так и параметров функций принадлежности. То есть решить задачу самоорганизации с участием внешнего наблюдателя. В докладе обсуждаются соответствующие алгоритмы структурной и параметрической адаптации нечеткой базы правил.

Архитектура интеллектуальной системы управления РБСС имеет иерархическую структуру. Верхний уровень соответствует таким свойствам, как выживание, безопасность, выполнение обязательств согласно миссии, накопление и корректировка базы знаний в виде эффективных паттернов поведения. Его основные функции: 1) расчет текущих показателей удельной ценности по результатам и эффективности в момент t [Vinogradov, 2020]; 2) расчет и реализацию способа действия (поведения) в момент t согласно заданному паттерну поведения; 3) мониторинг результатов реализации паттерна поведения. Оператор обрабатывает паттерны поведения 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 отработки фактических ситуаций [Виноградов и др., 2021]. Такой подход к моделированию поведения узлов в сети на основе паттернов аналогичен подходу в прагматической эпистемологии, согласно которому знания рассматриваются как множество моделей, каждая из которых представляет собой описание поведения при решении определенного класса задач. Критерием их выбора становится ожидаемая удельная ценность возможного результата [Виноградов и др., 2021].

7. Система локализации, классификации, отслеживания и поражения объектов вторжения в зону РБСС

Практическая реализация задач локализации, классификации и отслеживания объектов вторжения в зону РБСС предполагает организацию взаимодействия алгоритмов отслеживания с традиционными алгоритмами инициализации/маршрутизации в РБСС. Алгоритмы обнаружения формируют сегменты данных на основе измерений сенсоров. Предлагается перемещение объектов в беспроводных сенсорных сетях записывать в системные журналы узлов. В предлагаемой сетевой модели каждый узел может записывать событие появление объекта вместе со временем прибытия на каждый узел. Для сбора журнала перемещений несколько мощных сен-

сорных узлов, оснащенных устройствами хранения данных, предложено развернуть на внешней стороне сети для получения журнала каждого объекта, выходящего из сети. Сенсоры отслеживают амплитуду (мощность) для обнаружения событий в каждый момент времени в течение определенного временного интервала. События фиксируются тогда, когда амплитуда превышает пороговое значение. Пороговое значение динамически обновляется на основе статистики фоновых шумов для снижения частоты ложных срабатываний. Как только узел обнаруживает событие (например, присутствие движущегося транспортного средства), в нем формируется временной ряд, соответствующий событию. Сегмент временного ряда формируется на интервале, когда энергия сначала превышает пороговое значение (начало события), а затем падает ниже него (завершение события). На рис. 1 приведена блок-схема потока данных на узле согласно описанному подходу к распределенному отслеживанию.

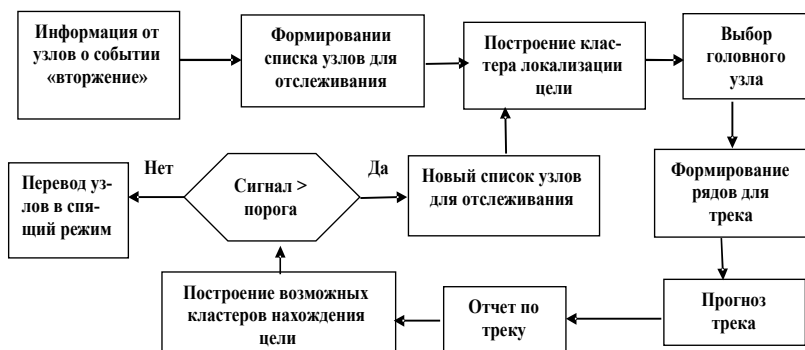


Рис. 1. Блок-схема потока данных

Несколько потоков выполняются одновременно, а система слежения представляет собой одноранговую сеть меньшей размерности. Все узлы выполняют одну и ту же логику. Это подход позволяет значительно повысить энергоэффективность сети.

1) На первом этапе активизируются узлы, фиксирующие событие «вторжение». Порог доверия устанавливается таким образом, чтобы предотвратить ложное срабатывание. Создается для каждого узла новая запись трека. Предварительно атрибуты узла сети ориентированы на местоположение.

2) Информация о маршруте цели от узла-кандидата непрерывно принимается и сохраняется. Определяется тип цели каждым узлом.

3) Формируется кластер узлов, локализующих цель.

4) Выполняется выбор головного узла кластера. Оценки параметров являются входными данными для алгоритма отслеживания. Информация агрегируется с треком, который наилучшим образом соответствует текущим данным. Очереди, в которых местоположение цели и узла близки, рассматриваются в первую очередь. Это соответствует пику сигнала временного ряда от узла кластера. Атрибуты цели и данные временного ряда прошлых измерений используются для прогнозирования.

5) Оценивается прогнозный трек на основе последней информации и обновляется список узлов, участвующих в отслеживании.

6) Формируется отчет по результатам отслеживания цели.

7) Передается отчет в пункт управления. Узлы с низким уровнем сигнала переводятся в спящий режим.

Оценка локальных параметров выполняется с использованием подхода, ориентированного на местоположение. Алгоритм позволяет формировать кластер слежения динамически в пределах ограниченного пространственно-временного окна. Головной узел выбирается из списка узлов-кандидатов с самым сильным сигналом в кластере. Линейная регрессия с использованием тригонометрии расположения узлов используется для оценки положения цели, скорости и курса.

Подход предполагает решение ряда проблем, среди которых следует выделить две основные. Первая – это разработка эффективных методов обмена информацией между локальными узлами в зоне вторжения, вторая – организация совместной обработки сигналов группой узлов на основе собранной информации о состоянии среды в зоне их ответственности в результате наступления событий. Рассмотрены подходы, лежащие в основе алгоритмов обнаружения, локализации и отслеживания, а также основные аспекты их реализации. Предлагаемые решения учитывают ограничения, связанные с возможностями локальных узлов, сетью в целом и маршрутизацией. Источником данных для предлагаемых алгоритмов являются сигналы от сенсоров, у которых мощность сигнала имеет выраженный максимум в зависимости от расстояния от цели и до узла сети. Полученные результаты распространяются на проблему отслеживания множества объектов, что предполагает оценку применимости методов идентификации и классификации в условиях, когда наблюдается наложение воспринимаемых сигналов сенсорами разными объектами. Обсуждаются алгоритмы для решения таких задач.

Важнейшей характеристикой приложений на базе РБСС является длительность жизненного цикла [Бородин и др., 2021], [Mikusz et al., 2014], [Xu et al., 2004] определяемая возможностями энергетической системы сенсорной сети [Shit et al., 2018]. Поток вторжений быстро движущихся целей в сенсорную сеть оказывает наиболее сильное воздействие на длительность ее жизненного цикла [Shit et al., 2018]. Это ставит перед разра-

ботчиками ряд проблем. Возможные подходы и варианты их решения рассматривались в [Chen et al., 2001]. Повышение живучести системы защиты предложено реализовать путем наделения ее набором следующих функций: 1) *Распределенная обработка* (CSP). 2) *Обработка данных по событию*. 3) *Агрегирование информации*. 4) *Динамическая кластеризация* [Виноградов и др., 2021].

8. Входные данные для обнаружения и локализация объектов РБСС

Объект проникновения в процессе движения генерирует сигналы. Величина уровня мощности воспринимаемого сенсорами сигнала (англ. *RSSI* – *Received Signal Strength Indicator*) определяется расстоянием 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 [Suryadevara et al., 2015] [Dan et al., 2015]. Событие «обнаружение цели» будет возникать тогда, когда выход сенсора узла превышает некоторый порог, величина которого регулируется так, чтобы величина частоты ложной тревоги не превышала некоторую настраиваемую норму. Значение сигнала при перемещении объекта воспринимается широкополосно, то есть все узлы, в радиусе восприятия которых находится цель, ее «слышат». Узлы, «слышащие» цель осуществляют считывание значений спектра сигнала цели в определенные моменты времени при ее движении. Тем самым формируется пространственная и временная выборка поля фактической сигнатуры цели. Характер изменения поля пространственно-временной сигнатуры определяет требуемую частоту дискретизации в пространстве-времени и количество активизируемых узлов. В работах [Brooks et al., 2002] [Dan et al., 2015] 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 цели и от 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 меньше 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.

Заключение

Для повышения возможностей применения РБСС в военных приложениях исследования и разработки должны быть направлены на создание: отечественных одно кристаллических процессоров, разработку алгоритмов идентификации нескольких одновременных событий; классификации объектов и событий в задачах обнаружения; миниатюризации и интеграции различных типов датчиков, повышение их надежности; форматов и стандартов для выходов датчиков и коммуникаций. Востребованными проблемами являются: разработка алгоритмов Sensor Data Mining на основе методов искусственного интеллекта и интеллектуального анализа данных, синтеза и генерации знаний на основе бортовой осведомленности и онтологий. Для повышения жизненного цикла РБСС требуется разработка новых источников питания, и энергоэффективных протоколов коммуникации.

Список литературы

- [Бородин и др., 2021] Бородин А.С., Волков А.Н., Мутханна А.С.А., Кучерявый А.Е. Искусственный интеллект в сетях связи пятого и последующих поколений. Электросвязь. – 2021. – № 1. – С. 17-22.
- [Виноградов и др., 2021] Виноградов Г.П., Емцев А.С., Федотов И.С. Беспроводные сенсорные сети в защищаемых зонах // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 1. – С. 19-30.
- [Виноградов и др., 2021] 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. 005-018. – DOI: 10.15827/0236-235X.133.005-018.
- [Виноградов и др., 2020] Виноградов Г.П., Прохоров А.А., Шепелев Г.А. Паттерны в системах управления автономными робототехническими комплексами // Виноградов Г.П., Прохоров А.А., Шепелев Г.А. Паттерны в системах управления автономными системами // Мягкие измерения и вычисления. – 2020. – № 12.
- [Brooks et al., 2002] Brooks R. and Griffin C. Traffic model evaluation of ad hoc target tracking algorithms // to be published in the International Journal of High-Performance Computing Applications, Special Issue on Sensor Networks, 2002.
- [Chen et al., 2001] Chen J.C., Hudson R.E., and Yao K. A Maximum likelihood parametric approach to source localization // Proc. ICASSP'2001, Salt Lake City, UT, 2001. – P. 1043-1046.
- [Dan et al., 2015] Dan Li, Kerry D. Wong, Yu H. Hu, Akbar M. Sayeed. Detection, Classification and Tracking of Targets in Distributed Sensor Networks // Источник: <http://www.ecece.wisc.edu/~sensit>. Дата обращения: 09.01.2021.
- [Hsua et al., 2012] Hsua J.M., Chenb C.C., Li C.C. POOT: An efficient object tracking strategy based on short-term optimistic predictions for face-structured sensor networks, Elsevier International Journal of Computers and Mathematics with Applications. – 2012. – Vol. 63, Issue 2. – P. 391-406.

- [**Mikusz et al., 2014**] Martin Mikusz. Towards an understanding of cyber-physical systems as industrial software-product-service systems // Conference paper in Procedia CIRP. – 2014.
- [**Rippin et al., 2012**] Rippin B. Pearls of wisdom: wireless networks of miniaturized unattended ground sensors // SPIE, Orlando, USA, 2012. – 8388-17
- [**Shit et al., 2018**] Shit R.C., Sharma S., Puthal D., Zomaya A.Y. Location of things (lot): a review and taxonomy of sensors localization in Iot infrastructure // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2018. – Vol. 20, No. 3. – P. 2028-2061. – Look at: Look at: Google Scholar.
- [**Shit et al., 2019**] Shit R.C., Sharma S., Puthal D. et al. Ubiquitous localization (UbiLoc): a survey and taxonomy on device free localization for smart world // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2019. – Vol. 21, No. 4. – P. 3532-3564. – Look at: Google Scholar.
- [**Suryadevara et al., 2015**] Suryadevara N.K., Mukhopadhyay S.C., Kelly S.D.T. and Gill S.P.S. WSN-based smart sensors and actuator for power management in intelligent buildings // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. – 2015. – Vol. 20, No. 2. – P. 564-571. – Look at: Google Scholar.
- [**Toor et al., 2017**] Toor A.S. and Jain A.K. A survey on wireless network simulators // Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. – 2017. – Vol. 6, No. 1. – P. 62-69. – Look at: Google Scholar.
- [**Xu et al., 2004**] Xu Yingqi, Winter Julian, Lee Wang-Chien. Prediction-based strategies for energy saving in object tracking sensor networks // Proceedings - 2004 IEEE International Conference on Mobile Data Management. – 2004. – P. 346-357. – 10.1109/MDM.2004.1263084.
- [**Winkler et al., 2008**] Winkler M., Tuchs K.-D., Hughes K., and Barclay G. Theoretical and practical aspects of military wireless sensor networks // in Journal of Telecommunications and Information Technology. – 2/2008. – P. 37-45.
- [**Vinogradov, 2020**] Vinogradov G.P. Patterns in Intelligent Systems. Russian Advances in Fuzzy Systems and Soft Computing: selected contributions to the 8-th International Conference on Fuzzy Systems, Soft Computing and Intelligent Technologies (FSSCIT-2020), June 29 – July 1, 2020, Smolensk, Russia. CEUR Workshop Proceedings, 2020, 2782. – P. 208-216.