

*Грознов Артём Денисович, аспирант,
Уральский федеральный университет имени первого Президента
России Б. Н. Ельцина,
Институт радиоэлектроники и информационных технологий,
г. Екатеринбург*

*Харисов Азамат Робертович, к.т.н.,
Уральский федеральный университет имени первого Президента
России Б. Н. Ельцина,
Институт радиоэлектроники и информационных технологий,
г. Екатеринбург*

ПРОБЛЕМЫ КООРДИНАЦИИ ГРУПП ИОТ-УСТРОЙСТВ И ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ МНОГОАГЕНТНЫХ СИСТЕМ

Аннотация: В статье рассматриваются фундаментальные проблемы, возникающие при координации групп устройств Интернета вещей (IoT) в условиях отсутствия централизованного управления. Показано, что классические централизованные подходы сталкиваются с ограничениями, делающими их неприменимыми для многих сценариев: единая точка отказа, растущие задержки, неэффективное использование энергии. На основе анализа современной литературы выделены и систематизированы шесть ключевых проблем координации: динамическая топология связи, ограниченность энергетических ресурсов, нестабильность каналов связи (задержки, потери пакетов), отсутствие глобальной синхронизации времени, масштабируемость на сотни и тысячи устройств, а также гетерогенность IoT-устройств по вычислительным и коммуникационным возможностям. В качестве перспективного подхода к решению перечисленных проблем обосновывается

применение многоагентных систем (МАС). Аргументируется, что свойства МАС — децентрализация, локальность взаимодействия, робастность к отказам и естественная адаптация к изменению топологии — напрямую отвечают на вызовы IoT-координации. Статья носит обзорно-аналитический характер и служит теоретической базой для последующего сравнительного анализа методов децентрализованной координации.

Ключевые слова: Интернет вещей, координация группы, многоагентные системы, децентрализованное управление, динамическая топология, энергоэффективность, масштабируемость, гетерогенные устройства.

***Groznov Artyom Denisovich, PhD student,
Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin,
Institute of Radio Electronics and Information Technologies,
Yekaterinburg
temagro2-2@yandex.ru***

***Kharisov Azamat Robertovich, Candidate of Technical Sciences,
Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin,
Institute of Radio Electronics and Information Technologies,
Yekaterinburg
t2201111@yandex.ru***

PROBLEMS OF COORDINATION OF GROUPS OF IOT DEVICES AND THE RATIONALE FOR THE USE OF MULTI-AGENT SYSTEMS

Abstract: *The article discusses the fundamental problems that arise in the coordination of groups of Internet of Things (IoT) devices in the absence of centralized management. It is shown that classical centralized approaches face limitations that make them inapplicable for many scenarios: a single point of failure, increasing delays, and inefficient use of energy. Based on the analysis of modern literature, six key coordination problems are identified and systematized: dynamic communication*

topology, limited energy resources, instability of communication channels (delays, packet loss), lack of global time synchronization, scalability to hundreds and thousands of devices, as well as heterogeneity of IoT devices in computing and communication capabilities. The use of multi-agent systems (MAC) is justified as a promising approach to solving these problems. It is argued that the properties of MAC — decentralization, locality of interaction, robustness to failures and natural adaptation to changes in topology — directly respond to the challenges of IoT coordination. The article is of a review and analytical nature and serves as a theoretical basis for a subsequent comparative analysis of the methods of decentralized coordination.

Keywords: *Internet of Things, group coordination, multi-agent systems, decentralized management, dynamic topology, energy efficiency, scalability, heterogeneous devices.*

Введение

Актуальность

В последние годы наблюдается экспоненциальный рост числа устройств Интернета вещей (IoT). Согласно прогнозам, к 2030 году количество подключённых IoT-устройств превысит 30 миллиардов единиц [1]. При этом всё более востребованным становится не просто сбор данных отдельными датчиками, а совместное выполнение сложных задач группами (роями, кластерами) автономных устройств. Примерами таких задач являются: согласованное перемещение группы дронов, синхронизация показаний распределённых сенсоров, коллективное управление освещением или отоплением в умных зданиях, координация доставки роботами товаров на складе.

Централизованные системы координации, где все решения принимаются единым управляющим узлом (облачным сервером или шлюзом), сталкиваются с фундаментальными ограничениями. Во-первых, они создают единую точку отказа — при выходе из строя центрального узла вся группа становится неуправляемой. Во-вторых, задержки передачи данных к центру и обратно могут

быть недопустимыми для сценариев реального времени (например, при координации движущихся дронов). В-третьих, централизация порождает избыточный сетевой трафик, что критично для устройств с ограниченным энергопотреблением, работающих от батарей. В-четвёртых, центральный сервер становится «узким местом» при масштабировании на сотни и тысячи устройств.

В качестве альтернативы предлагаются децентрализованные подходы, и одним из наиболее перспективных направлений является применение многоагентных систем (МАС). МАС предоставляют математически строгий аппарат для описания взаимодействия автономных агентов, которые принимают решения на основе локальной информации и обмениваются данными только с ближайшими соседями. Этот подход естественным образом устраняет единую точку отказа, снижает задержки и сетевой трафик, а также обеспечивает масштабируемость.

Цель и задачи статьи

Целью данной работы является систематизация проблем координации групп IoT-устройств и обоснование применимости многоагентных систем для их решения.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- выявить и описать ключевые проблемы координации, специфичные для групп IoT-устройств, на основе анализа современной литературы.
- сформулировать формальные требования к методам координации, вытекающие из этих проблем.
- обосновать, почему свойства МАС (децентрализация, локальность, робастность, адаптивность) делают их естественным кандидатом для координации в IoT-средах.

Результаты данной статьи могут быть использованы исследователями и практиками, работающими в области распределённых систем, Интернета вещей и роевого интеллекта, как теоретическая основа для выбора или разработки методов координации, адаптированных к специфике IoT-устройств.

1. Проблемы координации в группах IoT-устройств

Координация группы IoT-устройств существенно отличается от классических задач управления роботами или беспроводными сенсорными сетями. Специфика IoT накладывает ряд ограничений, которые необходимо учитывать при выборе или разработке методов децентрализованного управления [2]. Ниже рассмотрены ключевые проблемы координации групп IoT-устройств.

1.1. Динамическая топология сети

В реальных сценариях IoT топология сети не является фиксированной. Устройства могут:

- перемещаться в пространстве;
- периодически переходить в режим энергосбережения;
- выходить из строя или временно терять связь из-за помех;
- подключаться и отключаться динамически;

Последствия для координации

Подходы, требующие фиксированной или заранее известной топологии (например, строгая иерархия или статическое назначение лидера), становятся неэффективными [3]. Более того, даже если топология меняется медленно, задержки на её перестроение могут приводить к рассинхронизации группы.

1.2. Ограниченность энергетических ресурсов

Подавляющее большинство IoT-устройств работают от автономных источников питания. Для многих классов устройств (например, маломощных датчиков) замена или подзарядка батарей затруднена или невозможна [4]. Основными потребителями энергии являются:

- передача/приём радиосигналов;
- вычисления (особенно сложные алгоритмы);
- работа радиомодуля в режиме ожидания.

Последствия для координации

В централизованных системах каждое устройство вынуждено регулярно отправлять данные на единый управляющий сервер и получать от него команды. Это создаёт интенсивный двусторонний трафик. Например, для сети из 100

устройств, отправляющих отчёты 10 раз в секунду, батарея типового датчика может исчерпаться за несколько часов. Система координации должна минимизировать объём передаваемых данных и частоту обменов.

1.3 Нестабильность каналов связи

Каналы связи в IoT особенно в диапазонах LoRa, NB-IoT, Wi-Fi 2.4 ГГц, Bluetooth Mesh характеризуются: задержками, потерей пакетов, асимметрией, коллизиями при одновременной передаче нескольких устройств.

Последствия для координации

Каждое критическое сообщение проходит уязвимый путь «туда и обратно»: от устройства к центру и от центра к устройству. Потеря пакета от устройства означает, что его показания не будут учтены при принятии решения. Потеря команды от центра означает, что устройство продолжает работать в неактуальном режиме. Задержки могут привести к тому, что команда придёт слишком поздно. Система координации должна быть устойчива к потерям и задержкам, не полагаясь на гарантированную доставку каждого пакета.

1.4. Синхронизация и согласованность во времени

В группе IoT-устройств отсутствует глобальный тактовый генератор. Даже если все устройства используют одинаковые кварцевые резонаторы, их показания времени расходятся из-за температурных дрейфов, старения компонентов и разной периодичности включения. Большинство координационных алгоритмов требуют, чтобы агенты оперировали некоторым «общим временем» или хотя бы согласованными метками времени.

Последствия для координации

Координационные алгоритмы часто требуют, чтобы устройства знали порядок событий или имели согласованное представление о времени. В централизованных системах эта проблема частично снимается — сервер выступает эталоном времени. Но это создаёт дополнительный трафик (запросы синхронизации) и зависимость от доступности сервера. Отсутствие глобальной синхронизации затрудняет согласование действий устройств в распределённых сценариях.

1.5. Масштабируемость

Группы IoT-устройств могут насчитывать от нескольких единиц (например, группировка дронов) до нескольких тысяч (сенсорная сеть на территории промышленного объекта). С ростом числа устройств квадратично растёт число потенциальных парных взаимодействий, а также объём данных, которые нужно обработать.

Последствия для координации

В централизованных системах все данные стекаются на один сервер, а все команды рассылаются от него. При росте числа устройств нагрузка на сервер и пропускная способность каналов становятся узким местом. Сложность централизованного алгоритма обычно растёт как $O(N)$ или даже $O(N^2)$, что делает невозможным управление крупными группами. Система координации должна быть устроена так, чтобы добавление новых устройств не увеличивало нагрузку на существующие сверх некоторого предела.

1.6. Гетерогенность устройств

В реальной IoT-экосистеме устройства различаются по:

- вычислительной мощности (от 8-битных микроконтроллеров до процессоров уровня Raspberry Pi);
- доступной памяти;
- энергопотреблению и типу питания;
- набору сенсоров и исполнительных устройств.

Последствия для координации

Централизованные системы обычно предполагают, что все устройства имеют одинаковые возможности (гомогенны) или, по крайней мере, способны выполнять единый протокол в полном объёме [5]. В гетерогенной среде это не так: одни устройства не могут выполнять сложные вычисления, другие — часто обмениваться сообщениями, третьи — хранить большие объёмы данных. Система координации должна учитывать различия в возможностях устройств, не требуя от всех одинакового уровня «интеллекта» или активности.

2. Многоагентные системы как основа координации

После идентификации ключевых проблем координации групп IoT-устройств рассмотрен подход, который потенциально способен решить эти проблемы или минимизировать их влияние. Таким подходом являются многоагентные системы (Multi-Agent Systems, МАС). В данном разделе даётся краткое введение в базовые понятия МАС и обосновывается их применимость к IoT.

2.1. Базовые понятия теории многоагентных систем

Согласно классическому определению, многоагентная система состоит из множества взаимодействующих агентов, каждый из которых:

- является автономным — принимает решения без внешнего управления;
- обладает локальным восприятием — видит только часть окружающей среды;
- имеет ограниченные возможности влияния — может воздействовать на среду или других агентов;
- руководствуется локальными правилами поведения (стратегией, политикой).

В контексте IoT-устройств роль агента естественным образом выполняет каждое отдельное устройство (датчик, исполнительный механизм, контроллер), которое:

- самостоятельно измеряет параметры среды (температуру, положение, уровень сигнала);
- обрабатывает полученные данные;
- обменивается информацией с соседними устройствами;

Взаимодействие агентов может происходить в двух основных формах:

- 1) прямая коммуникация — обмен сообщениями по каналам связи;
- 2) не прямое взаимодействие — через изменение общей среды, когда действия одного агента воспринимаются другими как сигнал.

Для задач координации групп IoT-устройств доминирует первый тип — прямой обмен сообщениями, так как он быстрее и лучше поддаётся формализации [6].

2.2. Почему МАС подходят для задач координации IoT

В таблице ниже показано, как МАС напрямую решают проблемы, описанные в разделе 1.

Таблица 1. Решение с помощью МАС

Проблема	Решение с помощью МАС
Динамическая топология сети	В МАС нет фиксированного графа связей. Агенты работают с тем набором соседей, который доступен в данный момент. При изменении топологии (устройство ушло в спящий режим или переместилось) алгоритмы МАС автоматически перестраиваются.
Ограниченность энергетических ресурсов	МАС позволяют адаптировать частоту обмена в зависимости от ситуации. Когда всё стабильно — обмен редкий, энергия экономится. Когда нужно быстро согласовать решение — обмен учащается. Это принципиально отличает МАС от централизованных систем с постоянным трафиком.
Нестабильность каналов связи	Благодаря локальности и избыточности связей в МАС, потеря пакетов от одного соседа не катастрофична — агент продолжает работать с оставшимися. Некоторые алгоритмы МАС специально разработаны для работы в условиях помех.
Синхронизация и согласованность во времени	МАС не требуют глобального времени. Агенты могут работать в асинхронном режиме — каждый обновляет своё состояние когда может, а не по общему тактовому сигналу.

Масштабируемость	Каждый агент взаимодействует только с соседями, а не со всей группой. Объем вычислений на одно устройство не растёт с увеличением общего числа устройств. Это ключевое свойство МАС, обеспечивающее масштабируемость до тысяч и десятков тысяч устройств.
Гетерогенность устройств	В МАС агенты не обязаны быть одинаковыми. Более мощные устройства могут брать на себя дополнительные функции (например, ретрансляцию данных), а простые — только базовые. МАС естественным образом поддерживает разнородные группы.

Таблица показывает, что свойства многоагентных систем напрямую соответствуют основным требованиям IoT-сетей. В целом эффективность МАС для задач координации объясняется несколькими ключевыми особенностями: децентрализованной организацией, локальным взаимодействием агентов, устойчивостью к отказам, способностью адаптироваться к изменению топологии сети и высокой масштабируемостью. Благодаря этим свойствам МАС широко применяются для организации взаимодействия большого числа IoT-устройств.

Заключение

В ходе анализа выявлены шесть ключевых проблем координации групп IoT-устройств: динамическая топология связи, ограниченность энергетических ресурсов, нестабильность каналов, отсутствие глобальной синхронизации, масштабируемость и гетерогенность устройств. Эти проблемы носят системный характер и делают классические централизованные подходы неприменимыми для большинства IoT-сценариев.

Обосновано, что многоагентные системы являются адекватным ответом на перечисленные вызовы. Децентрализация устраняет единую точку отказа, локальность обеспечивает масштабируемость и снижает сетевой трафик,

робастность гарантирует работу при отказах устройств, а адаптивность позволяет автоматически подстраиваться под изменения топологии и состава группы.

Литературные источники

1. Кучерявый А. Е., Любезнов А. В., Смирнов С. В. Интернет вещей: концепция, архитектура и технологии
2. Бузюков Л. Б., Окунева Д. В., Парамонов А. И. Проблемы построения беспроводных сенсорных сетей // Труды учебных заведений связи. — 2017. — Т. 3, № 1. — С. 5–12.
3. Городецкий В. И., Карсаев О. В., Самойлов В. В., Серебряков С. В. Прикладные многоагентные системы группового управления // *Искусственный интеллект и принятие решений*. — 2009. — № 2. — С. 3–24.
4. Кобозева Е. М., Берсенева Д. В. Будущее интернета вещей: угрозы, проблемы и перспективы // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Экономика. 2025. № 2. С. 27–33.
5. Хоанг Ф. Н., Парамонов А. И. Метод распределения мощности передачи в гетерогенных сетях Интернета вещей // Труды учебных заведений связи. — 2025. — Т. 11, № 4. — С. 97–105.
6. Карсаев, О. В., & Конюший, В. Г. (2009). Многоагентные системы и средства их разработки. *Труды СПИИРАН*, (8), 234-254.