

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

TECHNOLOGICAL BASIS FOR IMPROVING RELIABILITY AND PRODUCT QUALITY

УДК 621.3

DOI 10.21685/2307-4205-2020-4-9

К. А. Муравьев, И. О. Алябьев, Д. С. Синютина, А. И. Шушуев

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ

K. A. Murav'ev, I. O. Alyab'ev, D. S. Sinyutina, A. I. Shushuev

ALGORITHMS MIC DESIGN OF WIRELESS SENSOR NETWORKS

Аннотация. В работе проанализированы технологические платформы для построения беспроводных сенсорных сетей. Проведено комплексное сравнение схмотехнических решений типовых узлов. Произведена классификация архитектур и аппаратных решений сенсорных сетей. Предложена типовая структура узла беспроводной сенсорной сети. Обобщены основные аспекты применения для базовых платформ энергоэффективных беспроводных сенсорных сетей. Показано, что основная тенденция развития энергоэффективных беспроводных сенсорных сетей состоит в том, что маломощные устройства из низкого ценового сегмента преобладают в сборе ограниченного, однотипного набора данных, в то время как устройства из верхнего ценового сегмента используются для требовательных приложений и глобальной координации, организации, установки параметров сети. Предложен способ для работы устройств с высокой вычислительной мощностью. Предложен способ модернизации этих узлов для более эффективной работы в области применения.

Ключевые слова: беспроводные сенсорные сети, сенсоры, энергопотребление, энергоэффективность, отказоустойчивость, алгоритмы управления, микроконтроллер.

Abstract. The paper analyzed technology platforms for building wireless touch networks. Complex comparison of schematic solutions of typical units was carried out. The architectures and hardware solutions of sensor networks have been classified. Disclosed is a typical structure of a wireless sensor network node. The main aspects of application for basic platforms of energy-efficient wireless sensor networks are summarized. It has been shown that the main trend of the development of energy efficient wireless sensor networks is that low-power devices from the low price segment prevail in the collection of a limited, single-type set of data, while devices from the upper price segment are used for demanding applications and global coordination, organization, setting of network parameters. Disclosed is a method for operating devices with high computational power. Disclosed is a method of modernising these units for more efficient operation in the field of application.

Keywords: wireless sensor networks, sensors, power consumption, energy efficiency, fault tolerance, control algorithms, microcontroller.

Введение

Беспроводные сенсорные сети активно внедряются в различных отраслях, позволяя эффективно решать сложные задачи автоматизации и управления, мониторинга и контроля, оперируя большими массивами входящих и обрабатываемых исходных данных [1–5]. Взаимодействуя с управляющими устройствами, датчики создают распределенную, самоорганизующуюся систему сбора, обработки и передачи информации [6].

Беспроводная сенсорная сеть – это самоорганизующаяся AD HOC сеть, т.е. сеть с децентрализованным режимом работы, когда клиентские станции взаимодействуют непосредственно друг с другом без точки доступа [7, 8]. Таким образом, понятие «самоорганизующаяся сеть» определяется как система, в которой отдельные устройства «умеют» сами находить друг друга и формировать сеть, более того, в случае выхода из строя какого-либо из узлов оставшиеся могут перенастраиваться, переориентироваться, устанавливая новые маршруты для передачи сообщений.

Каждый узел представляет собой миниатюрное устройство, оснащенное сенсорами. Их значительное количество и размещение в ключевых точках мониторинга ситуации или изучаемых процессов позволяет осуществлять сбор информации с больших площадей в течение длительного времени, что в свою очередь предоставляет возможность отслеживать и анализировать явления, ранее недоступные.

Одним из главных достоинств и конкурентных преимуществ технологии сенсорных сетей является способность функционирования без необходимости прокладки дорогостоящих кабелей вместе со вспомогательным оборудованием (кабельными каналами, клеммами, шкафами и т.д.). А поскольку сенсорная сеть поддерживает основные интерфейсы и протоколы, которые применяются в нашей стране в настоящее время, есть реальная возможность интегрировать ее в существующую сеть без проведения дополнительной масштабной и дорогостоящей реконструкции.

Целью работы является анализ и обобщение способов алгоритмического проектирования беспроводных сенсорных сетей с точки зрения энергоэффективности, генерации структурной схемы узла беспроводной сенсорной сети с минимальным энергопотреблением.

Используя предлагаемый авторский подход генерационного синтеза, конкретный функционал узлов формируется исходя из конкретного класса решаемых задач. Применение модульных решений позволит сгладить существующие различия между типовыми конкретными узлами. Дальнейшее расширение количества возможных вариантов базовых компонентов аппаратно-программной платформы благотворно повлияет на решение конкретной задачи за счет дальнейшей типизации, унификации и стандартизации.

Анализ алгоритмического проектирования беспроводных сенсорных сетей

В сенсорной сети узлы обычно взаимодействуют посредством беспроводной связи – радио, инфракрасного излучения или оптических сигналов [9–12]. Инфракрасная связь сравнительно дешева и проста в производстве, доступна без лицензии и защищена от помех электрических приборов, но требование прямой видимости между отправителем и получателем усложняет использование данной технологии в беспроводных сенсорных сетях [13–15]. В случае использования оптических сигналов предъявляются дополнительные требования к узлам сети – антенны узлов должны обладать нужной высотой и мощностью излучения для связи с другими устройствами, что требует повышенного энергопотребления, в противном случае могут возникнуть ошибки и большие помехи [13–15]. В беспроводной сенсорной сети наилучшим вариантом является использование радиосвязи, в частности, полос частот для промышленных, научных и медицинских целей ISM, которые доступны без лицензий в большинстве стран. Основными преимуществами использования ISM является широкий спектр частот и доступность по всему миру. Они не привязаны к конкретному стандарту, тем самым дают большую свободу для реализации энергосберегающих стратегий в сенсорных сетях. Для организации радиосвязи между узлами в беспроводной сенсорной сети чаще всего используются следующие технологии передачи данных: ZigBee, Bluetooth или Wi-Fi [16–20]. Их сравнительный анализ приведен в табл. 1.

Протоколы ZigBee дают возможность создавать самоорганизующиеся и самовосстанавливающиеся сенсорные сети. В этом случае устройства сети благодаря встроенному программному обеспечению обладают способностью при включении питания сами находить друг друга и форми-

ровать сеть, а в случае выхода из строя какого-либо из узлов – устанавливать новые маршруты для передачи данных. Протоколы ZigBee позволяют устройствам находиться в спящем режиме большую часть времени, что значительно продлевает срок службы батареи.

Таблица 1

Сравнительный анализ технологий организации связи узлов беспроводных сенсорных сетей

Параметры	Стандарты		
	ZigBee (IEEE 802.15.4)	Bluetooth (IEEE 802.15.1)	Wi-Fi (IEEE 802.11b)
Частоты	0,868/0,915/2,4 ГГц	2,4 ГГц	2, 4, 5–6 ГГц
Количество каналов	1/10/16	79	14
Скорость передачи	20–250 Кбит/с	3 Мбит/с	11 Мбит/с – 10 Гбит/с
Радиус действия устройств	10–100 м	10 м	20–300 м
Полоса пропускания канала	0,3/0,6 МГц; 2 МГц	1 МГц	22 МГц
Количество устройств в сети	65 536	7	10
Потребляемый ток	30 мА, в режиме ожидания 3 мА	40 мА, в режиме ожидания 0,2 мА	400 мА, в режиме ожидания 20 мА
Области применения	Удаленный мониторинг и управление	Передача мультимедийной информации	Замещение проводного соединения

Сенсорные сети могут быть реализованы также на основе беспроводной технологии Bluetooth. Специально для беспроводных сенсорных сетей была разработана версия спецификации ядра технологии Bluetooth v.4.0, получившая название Bluetooth Low Energy (BLE), характеризующаяся низким энергопотреблением. Устройства, использующие BLE, могут работать более года на одной миниатюрной батарее без подзарядки.

Беспроводные сети Wi-Fi изначально были задуманы как способ замены проводных вычислительных сетей. Однако относительно высокие скорости передачи делают перспективным возможное применение в тех самоорганизующихся сенсорных сетях, в которых необходимо передавать большие объемы информации в реальном времени, например, видеосигналы.

Как видно из таблицы, за счет меньшего потребления энергии и, как следствие, большего времени работы, а также большего радиуса действия устройств, чем у устройств Bluetooth, наилучшим вариантом для беспроводных сенсорных сетей является ZigBee.

Беспроводные сенсорные сети могут быть классифицированы на основе различных концепций – в зависимости от типа и метода развертывания узлов в сети, от их расположения, от окружающей среды и т.д. (рис. 1).



Рис. 1. Классификация архитектур сенсорных сетей

Рассмотрим классификацию беспроводных сенсорных сетей подробнее. На основе способа функционирования сенсорные сети принято подразделять на проактивные и реактивные. В проактивной беспроводной сенсорной сети узлы периодически проверяют среду и передают данные, представляющие интерес. В реактивных сетях узлы оперативно реагируют лишь на внезапные и резкие изменения в области сенсорного поля. Очевидно, что затраты энергии происходят во время

приема или передачи данных, выполнения контрольно-измерительных операций, в связи с чем пребывание максимального количества узлов в «спящем режиме», значительно увеличивает продолжительность автономной работы всей системы.

В зависимости от составляющих узлов беспроводные сенсорные сети могут быть разделены на два основных типа – гомогенные (однородные) и гетерогенные (неоднородные). В гомогенных беспроводных сенсорных сетях все сенсорные узлы одинаковы с точки зрения энергии батареи и аппаратной сложности. Гетерогенные же сенсорные сети могут содержать несколько типов различных узлов, с различными энергетическими и функциональными возможностями, что дает ряд преимуществ (рис. 2).



Рис. 2. Гетерогенная модель беспроводной сенсорной сети

Для выбора варианта использования энергоресурсов в гетерогенных сетях прибегают к методам балансировки нагрузки – распределению заданий между несколькими сетевыми устройствами [21–26]. Вычислительная неоднородность сети может уменьшить задержку обработки информации для ближайших узлов, а гетерогенность сетевых ресурсов – сократить время обслуживания запросов. Средний расход энергии также перераспределяется между узлами разных типов, снижая ее потребление, а использование в гетерогенной сети узлов с высокой пропускной способностью и мощными радиопередатчиками значительно повышает надежность передачи данных во всей сети, обеспечивает отказоустойчивость работы сети [27–30].

По критерию структуры сети беспроводные сенсорные сети разделяют на одноранговые и иерархические. В одноранговой сети все узлы выполняют одинаковые задачи, передача данных на базовую станцию осуществляется непосредственно. В иерархических сетях узлы подразделяются на головные и сенсорные. Сенсорные узлы собирают данные, а головные занимаются их обработкой, анализом и передачей на базовую станцию. Данный раздел принято связывать с топологией сети. К иерархическим топологиям относятся «звезда» и «кластерное дерево». В этом случае сеть разбивается на сегменты, в которых объекты функционально разделяются на координаторы и конечные узлы. Координатор осуществляет глобальную координацию, организацию и установку параметров сети, осуществляет выход во внешнюю сеть. Конечные узлы, в свою очередь, выполняют только прикладные действия – сбор информации и управление удаленным объектом. Хотя данный способ организации сети ввиду его особенностей подходит для решения ограниченного спектра задач, он выделяется наименьшими затратами энергии, так как координаторы в таких топологиях чаще всего напрямую подключены к стационарной сети. К одноранговой сети относится топология «точка-точка», в которой разделения на сегменты не требуется. Узлы могут общаться между собой в пределах области видимости, самостоятельно организовывать сети и адекватно реагировать на изменения топологии сети. Такая гибкость в использовании позволяет организовывать более сложные конфигурации сети, решать широкий спектр нестандартных задач, но, к сожалению, с данной топологией связан увеличенный расход энергии ввиду резкого возрастания времени пребывания узлов в рабочем состоянии.

По отношению к методу размещения сенсорных узлов выделяют сети со случайным и с детерминированным размещением узлов. При случайном размещении сенсорные узлы могут быть случайным образом разбросаны по некоторой области. Детерминированное размещение предполагает размещение узлов в соответствии с предварительно определенным планом построения сети.

Беспроводные сенсорные сети могут быть классифицированы в зависимости от способности менять свое географическое положение на статичные и мобильные. Мобильные сенсорные узлы применяются при мониторинге движущихся объектов.

С учетом размерности пространства применения выделяют двухмерные и трехмерные сенсорные сети, что накладывает отпечаток на радиус покрытия сенсорного узла, а также на особенности работы протоколов передачи данных.

Для дополнительного увеличения продолжительности автономной работы узлов беспроводной сенсорной сети стоит отдать предпочтение энергосберегающим протоколам передачи данных, таким как LEACH, OEDSR, RT2.

Алгоритм LEACH является модификацией базового протокола TDMA. Представляет собой иерархический протокол, ключевой задачей которого является минимизация энергии, необходимой для создания и обслуживания кластеров сенсоров. LEACH имеет существенный недостаток – отсутствие информации о текущем энергетическом состоянии узла, что негативно влияет на надежность передачи данных в системе.

Энергетическая же выгодность протокола OEDSR заключается в том, что все узлы находятся в режиме ожидания или состоянии сна, а при возникновении события «просыпается» только подсеть рядом с местом возникновения события.

Протокол RT2 также делит сеть, но уже на сенсорные и активные узлы, первые из которых осуществляют обнаружение события, а вторые – обрабатывают данные и передают информацию. Это также выгодно сказывается на энергоэффективности.

Не стоит также забывать, что на потребление энергии оказывают влияние способы локализации узлов беспроводной сенсорной сети. Особенно хочется выделить метод локализации по уровню силы сигнала (RSSI) и радиоинтерференционную систему позиционирования (RIPS).

Наряду с программными способами увеличения энергоэффективности следует отметить и аппаратные, которые заключаются в замене первичного непerezаряжаемого источника питания на перезаряжаемый, а также подключение устройства к преобразователю энергии. Существует множество постоянно доступных источников энергии – свет, вибрации, температурный дифференциал, магнитная энергия и преобразователи, способные использовать эту энергию, соответственно – фотогальванический, электростатический или электромагнитный, термоэлектрический и индуктивный. Эффективность и мощность каждого преобразователя варьируются. Суть алгоритмического метода синтеза БСС состоит в последовательном использовании программных и аппаратных методов обеспечения энергоэффективности за счет использования типовых узлов БСС.

Анализ типовой структуры узла сенсорной сети

Рассмотрим обобщенную структуру узла беспроводной сенсорной сети (рис. 3).

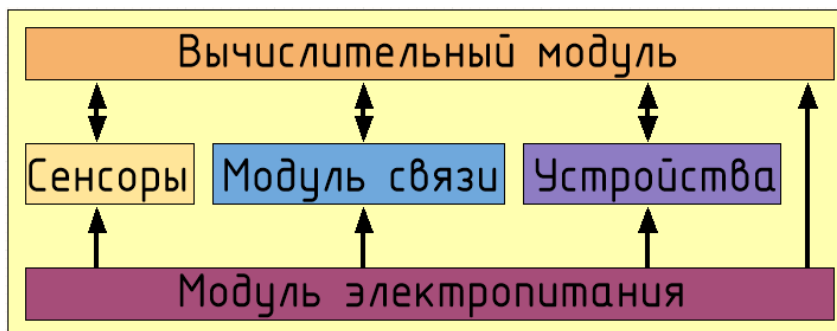


Рис. 3. Обобщенная архитектура узла сенсорной сети

Узел беспроводной сенсорной сети, как видно из рисунка, состоит из вычислительного модуля, модуля электропитания, модуля беспроводной связи, а также исполнительных устройств и различного рода сенсоров, считывающих информацию из окружающей среды [31–33].

Рассмотрим каждый элемент структуры подробнее. Вычислительный модуль представляет собой микроконтроллер – микропроцессор со встроенной памятью, таймерами и оборудованием для подключения внешних устройств, таких как датчики, исполнительные устройства и радиопередатчики. Вычислительный модуль запускает программное обеспечение беспроводного сенсорного узла. Для корректной работы устройства микроконтроллер должен иметь низкое энергопотребление, а также наличие аппаратных ресурсов для работы узла в составе сети.

Датчики (сенсоры) и исполнительные устройства дают возможность узлу взаимодействовать с окружающим физическим миром.

Модуль беспроводной связи нужен для организации взаимодействия между узлами сети. В качестве данного модуля используют трансиверы. Стоит отметить, что из аппаратных средств узла именно радиоприемопередатчик обычно является наиболее энергоемким компонентом.

Модуль электропитания предназначен для обеспечения долговременной бесперебойной работы узла сенсорной сети. Батарейки являются самым распространенным источником питания для современных платформ. При рациональном выборе остальных компонентов, а также наличии программного обеспечения энергетического менеджмента срок службы узла на литиевых батареях увеличивается. Рассмотрим основные типовые модульные аппаратные решения проектирования узлов сенсорной сети (рис. 4).

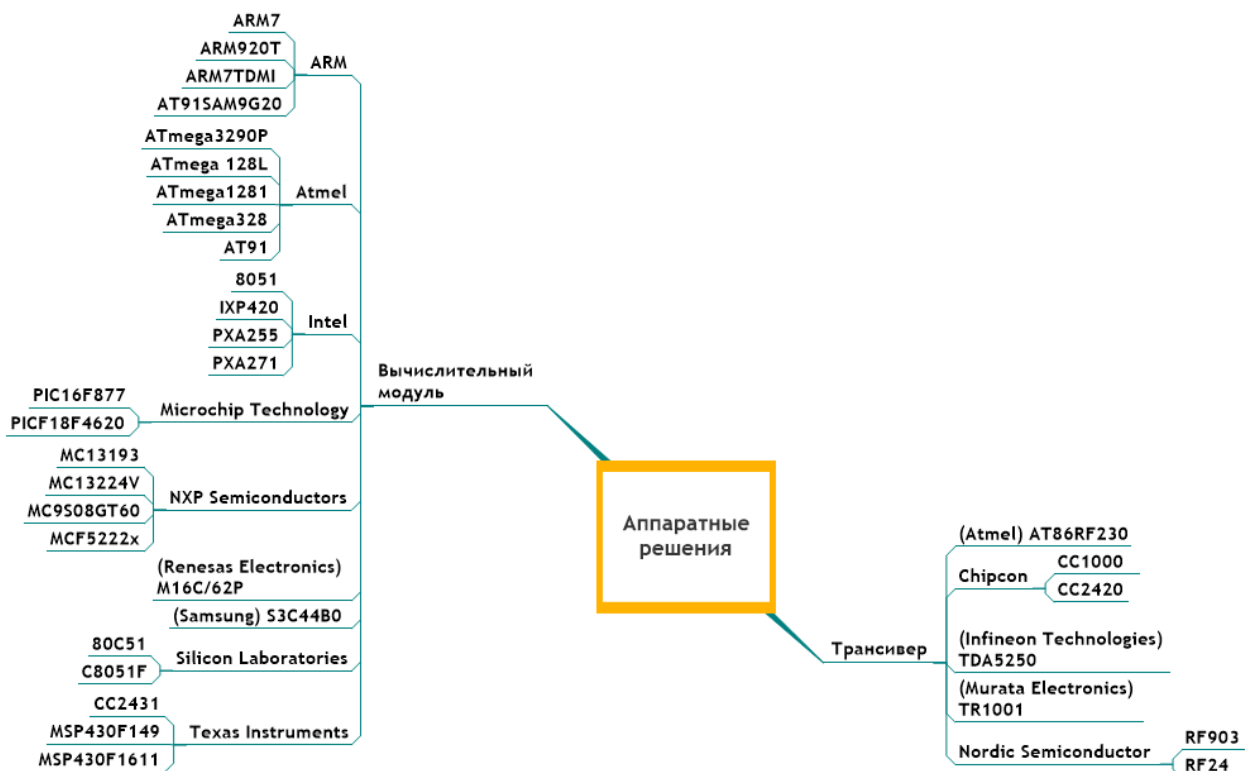


Рис. 4. Классификация аппаратных решений сенсорных сетей

Исходя из приведенной классификации, можно сделать вывод о том, что критически необходимы для работы компонентами являются: вычислительный модуль, модуль электропитания и модуль беспроводной связи. В то время как сенсоры, добавляемые производителем на плату платформы, являются лишь приятным дополнением, так как с помощью разъемов, размещенных на плате, можно подключить все требуемые расширения. Из рисунка видно, что на данный момент на рынке аппаратного обеспечения присутствует большое количество различных электронных комплектующих, подходящих для реализации узла беспроводной сенсорной сети, что дает производителям аппаратно-программных платформ большой простор для ее модернизации и расширения функционала под решение конкретных, стоящих в повестке дня задач. При этом для сокращения сроков проектирования на первый план выходят задачи модельного анализа БСС на начальных этапах проектирования [31–33].

Концепция эффективной платформы для проектирования беспроводных сенсорных сетей

На основании проведенного анализа существующих аппаратно-программных платформ было выявлено, что минимизация энергопотребления беспроводной сенсорной сети напрямую связана с использованием стека протоколов ZigBee. Для улучшения показателей сама платформа, на которой базируется узел, должна удовлетворять ряду следующих аппаратных требований:

- минимальное энергопотребление приемопередатчика и модуля обработки полученных данных;
- отсутствие встроенных датчиков и исполнительных устройств. Все необходимые сенсоры должны подключаться с помощью разъемов расширения с целью экономии электроэнергии на не использующихся устройствах;
- наличие алгоритмически аппаратного уменьшения энергопотребления.

Исходя из требований к узлу беспроводной сенсорной сети, можно предложить улучшенную типовую структурную схему (рис. 5). Данная схема помимо классических элементов включает также таймер и коммутатор. Их структурное назначение состоит в том, чтобы удерживать наиболее энергоемкие элементы платформы выключенными или в спящем режиме, когда они не требуются [34, 35]. В базовом варианте таковыми элементами могут быть модуль беспроводной связи и вычислительный модуль.

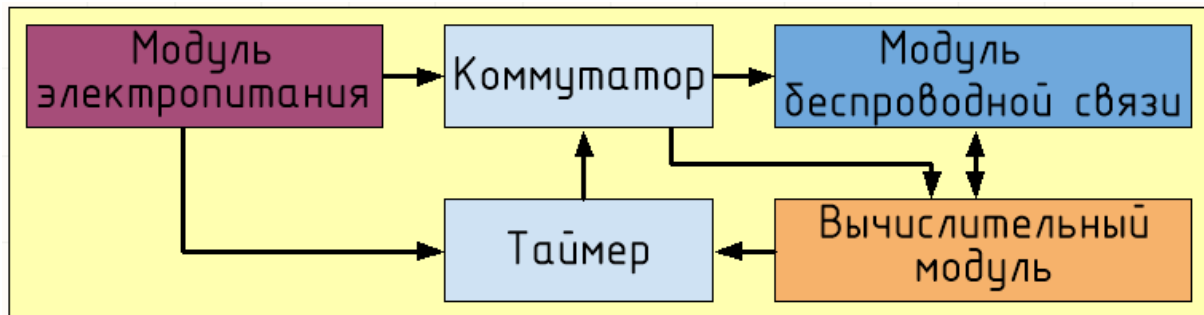


Рис. 5. Концепция эффективной платформы для проектирования беспроводных сенсорных сетей

Данная типовая схема работает следующим образом:

1. Таймер подает сигнал на коммутатор, чтобы он подключил модуль беспроводной связи и вычислительный модуль к питанию.
2. Модуль беспроводной связи получает информацию по беспроводному каналу связи и передает ее вычислительному модулю.
3. Вычислительный модуль принимает информацию и обрабатывает ее требуемым образом.
4. По необходимости вычислительный модуль отправляет модулю беспроводной связи обработанную или новую информацию, которую необходимо передать.
5. В случае надобности передачи информации модуль беспроводной связи передает ее по беспроводным каналам связи в сети, по окончании передачи модуль беспроводной связи посылает вычислительному модулю сигнал о том, что передача закончена.
6. Вычислительный модуль, получив все необходимые сигналы от модуля беспроводной связи, посылает сигнал таймеру, что все необходимые задачи выполнены и можно отключать питание.
7. Таймер, получив сигнал об окончании работ, посылает сигнал коммутатору о необходимости отключения энергоемких элементов от питания. Через некоторое количество тактов таймера переходим к шагу 1.

Заключение

В работе основное внимание уделено практической реализации типовых узлов беспроводных сенсорных сетей на основе современных коммерчески доступных аппаратных средств, обеспечивающих минимальное энергопотребление. Можно констатировать, что рынок БСС устройств делится на две категории: бюджетные устройства и устройства высокого класса.

Конкретный функционал узлов формируется чаще всего исходя из узкого класса решаемых задач, но модульные решения могут сгладить существующие различия между конкретными моделями. Дальнейшее расширение количества возможных вариантов базовых компонентов аппаратно-программной платформы благотворно влияет не только на решение какой-то определенной задачи, но и на весь рынок беспроводных сенсорных сетей в целом за счет дальнейшей типизации, унификации и стандартизации.

Отдельные результаты получены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ по проекту «Фундаментальные исследования методов цифровой трансформации компонентной базы микро- и наносистем».

Библиографический список

1. Володин, К. И. Информационная система сопровождения разработки встраиваемого программного обеспечения для беспроводных сенсорных сетей / К. И. Володин, А. И. Переходов // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 1 (9). – С. 85–90.
2. Design methods of teaching the development of internet of things components with considering predictive maintenance on the basis of mechatronic devices / A. I. Vlasov, A. V. Yudin, V. A. Shakhnov, K. A. Usov, M. A. Salmina // International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. – Vol. 12, № 20. – P. 9390–9396.
3. Власов, А. И. Системный анализ технологии обмена и хранения данных BLOCKCHAIN / А. И. Власов, А. А. Карпунин, И. П. Новиков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2017. – № 3 (55). – С. 75–83.
4. Демидов, Д. Е. Повышение времени жизни беспроводных сенсорных сетей с использованием нечеткой логики / Д. Е. Демидов, Н. В. Будылдина // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 3 (23). – С. 50–58.
5. Власов, А. И. Анализ методов и средств обработки информации сенсорного кластера / А. И. Власов, М. Н. Юлдашев // Датчики и системы. – 2018. – № 1 (221). – С. 24–30.
6. Исследование алгоритмов кластеризации в беспроводных сенсорных сетях // Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. – URL: http://diss.vlsu.ru/uploads/media/Diss_Nasser.pdf (дата обращения: 30.04.2020).
7. Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring / A. Mainwaring, J. Polastre, R. Szewczyk, D. Culler, J. Anderson // Ad Hoc & Sensor Wireless Networks. – 2004. – № 47. – P. 399–423.
8. Власов, Д. С. Исследование качественных показателей беспроводных AD-HOC сетей / Д. С. Власов, Д. С. Коновалов, К. А. Муравьев // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2019. – Т. 1. – С. 155–158.
9. Краснобрый, Б. В. Анализ беспроводных сенсорных сетей на основе стандарта ZIGBEE / Б. В. Краснобрый, И. В. Лавров, К. А. Муравьев, А. И. Чебова // Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы : сб. XV Молодеж. науч.-техн. конф. – Москва, 2013. – С. 306–314.
10. Зимин, Д. В. Анализ проблем энергоэффективности беспроводных сетей передачи данных на базе стека протоколов ZIGBEE / Д. В. Зимин, К. А. Муравьев // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2016. – Т. 1. – С. 195–197.
11. Санталов, Г. Д. Методика проектирования электронных устройств в концепции «Интернета вещей» / Г. Д. Санталов, К. А. Муравьев, В. В. Леонидов // Проектирование и технология электронных средств. – 2019. – № 1. – С. 10–22.
12. Муравьев, К. А. Анализ принципов построения самоорганизующихся сенсорных сетей / К. А. Муравьев, Д. Г. Манушян // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2018. – Т. 1. – С. 296–301.
13. Лаборатория физических основ и технологий беспроводной связи. – URL: <https://wl.unn.ru/study/?page=4> (дата обращения: 07.03.2020).
14. Общие сведения о беспроводных сенсорных сетях. – URL: <https://sibstutis.ru/upload/4b6/%D0%92%D0%9A%D0%A0.pdf> (дата обращения: 30.04.2020).
15. Дядюнов, А. Н. Моделирование беспроводных сенсорных сетей / А. Н. Дядюнов, К. Н. Кузнецов // Научный вестник МГТУ ГА. – 2009. – № 139. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-besprovodnyh-sensornyh-setey> (дата обращения: 28.04.2020).
16. Адамов, А. П. Протоколы обмена в беспроводных сенсорных сетях регистрации событий / А. П. Адамов, А. А. Адамова, С. Г. Семенцов, А. Т. Темиров // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 3 (23). – С. 124–132.
17. Камакин, А. С. Разработка защищенного метода передачи данных между устройствами и анализ скорости передачи информации / А. С. Камакин, А. А. Павельев // Технологии инженерных и информационных систем. – 2019. – № 4. – С. 3–9.

18. Муравьев, К. А. Анализ протоколов передачи данных самоорганизующихся сенсорных сетей / К. А. Муравьев, Т. А. Цивинская, Д. Г. Манушян // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2019. – Т. 2. – С. 142–145.
19. Власов, А. И. Анализ методов и средств обработки информации сенсорного кластера / А. И. Власов, М. Н. Юлдашев // Датчики и системы. – 2018. – № 1 (221). – С. 24–30.
20. Денисенко, Н. А. Исследования сенсорной сети датчиков давления / Н. А. Денисенко, А. В. Лавров, К. А. Муравьев, А. И. Чебова // Датчики и системы. – 2013. – № 9 (172). – С. 51–55.
21. Муравьев, К. А. Методы управления сетевым трафиком гетерогенных распределенных телекоммуникационных систем / К. А. Муравьев, В. В. Терехов // Проектирование и технология электронных средств. – 2017. – № 2. – С. 15–21.
22. Муравьев, К. А. Программно-аппаратный комплекс мониторинга распределенных телекоммуникационных систем / К. А. Муравьев, В. В. Терехов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2017. – Т. 1. – С. 324–329.
23. Yuldashev, M. N. Energy-efficient algorithm for classification of states of wireless sensor network using machine learning methods / M. N. Yuldashev, A. I. Vlasov, A. N. Novikov // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1015. – P. 032153.
24. Vlasov, A. I. Load balancing in big data processing systems / A. I. Vlasov, K. A. Muraviev, A. A. Prudius, D. A. Uzenkov // International Review of Automatic Control. – 2019. – Vol. 12, № 1. – P. 42–47.
25. Yuldashev, M. N. Mathematical model of the general problem of state classification in wireless sensor networks / M. N. Yuldashev, A. I. Vlasov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – P. 012002.
26. Власов, А. И. Методы упреждающего прогнозирования состояния широкополосной сети связи / А. И. Власов, В. В. Иванов, И. А. Косолапов // Программные продукты и системы. – 2011. – № 1. – С. 3–6.
27. Адамов, А. П. Беспроводные сенсорные сети с нулевой мощностью / А. П. Адамов, А. А. Адамова // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2018. – Т. 1. – С. 261–264.
28. Адамов, А. П. Повышение надежности элементов сенсорной сети за счет снижения токопотребления чувствительного элемента сенсора / А. П. Адамов, А. А. Адамова, С. Г. Семенцов, А. Т. Темиров // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 4 (28). – С. 136–141.
29. Адамов, А. П. Энергоэффективные технические решения для беспроводных сенсорных сетей / А. П. Адамов, А. А. Адамова, С. Г. Семенцов // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 4 (28). – С. 142–148.
30. Иванова, Г. С. Анализ алгоритмов консенсуса в блокчейн-системах / Г. С. Иванова, К. А. Володин // Технологии инженерных и информационных систем. – 2019. – № 1. – С. 35–44.
31. Prisyazhnuk, S. P. Method of wireless sensor networks simulation / S. P. Prisyazhnuk, K. A. Muraviev, A. S. Zakharova // Proceedings 2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC). – 2018. – P. 8570125.
32. Муравьев, К. А. Анализ показателей качества систем передачи данных / К. А. Муравьев, В. В. Терехов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2018. – Т. 1. – С. 128–133.
33. Власов, А. И. Гауссовские процессы в регрессионном анализе состояний беспроводной сенсорной сети с учетом электромагнитных помех / А. И. Власов, М. Н. Юлдашев // Технологии электромагнитной совместимости. – 2017. – № 3 (62). – С. 35–43.
34. Бетанов, В. В. Радиочастотные методы локализации в беспроводных сенсорных сетях / В. В. Бетанов, Л. С. Восков, Р. О. Курпатов // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. – 2011. – № 2. – С. 44–49.
35. Восков, Л. С. Сравнительный анализ методов локализации в беспроводных сенсорных сетях / Л. С. Восков, Р. О. Курпатов // Качество. Инновации. Образование. – 2011. – № 3. – С. 35–39.

References

1. Volodin K. I., Perekhodov A. I. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2015, no. 1 (9), pp. 85–90. [In Russian]
2. Vlasov A. I., Yudin A. V., Shakhnov V. A., Usov K. A., Salmina M. A. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017, vol. 12, no. 20, pp. 9390–9396.
3. Vlasov A. I., Karpunin A. A., Novikov I. P. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Simulation]. 2017, no. 3 (55), pp. 75–83. [In Russian]
4. Demidov D. E., Budyldina N. V. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2018, no. 3 (23), pp. 50–58. [In Russian]
5. Vlasov A. I., Yuldashev M. N. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2018, no. 1 (221), pp. 24–30. [In Russian]
6. *Issledovanie algoritmov klasterizatsii v besprovodnykh sensornykh setyakh* [Investigation of clustering algorithms in wireless sensor networks]. Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet telekommunikatsiy im.

- prof. M. A. Bonch-Bruevicha. Available at: http://diss.vlsu.ru/uploads/media/Diss_Nasser.pdf (accessed 30.04.2020). [In Russian]
7. Mainwaring A., Polastre J., Szewczyk R., Culler D., Anderson J. *Ad Hoc & Sensor Wireless Networks*. 2004, no. 47, pp. 399–423.
 8. Vlasov D. S., Konovalov D. S., Murav'ev K. A. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2019, vol. 1, pp. 155–158. [In Russian]
 9. Krasnobryzhiy B. V., Lavrov I. V., Murav'ev K. A., Chebova A. I. *Naukoemkie tekhnologii i intellektual'nye sistemy: sb. XV Molodezh. nauch.-tekhn. konf.* [Science-intensive technologies and intelligent systems: sat. XV. sci. - tech. conf.]. Moscow, 2013, pp. 306–314. [In Russian]
 10. Zimin D. V., Murav'ev K. A. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2016, vol. 1, pp. 195–197. [In Russian]
 11. Santalov G. D., Murav'ev K. A., Leonidov V. V. *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv* [Design and technology of electronic devices]. 2019, no. 1, pp. 10–22. [In Russian]
 12. Murav'ev K. A., Manushyan D. G. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2018, vol. 1, pp. 296–301. [In Russian]
 13. *Laboratoriya fizicheskikh osnov i tekhnologiy besprovodnoy svyazi* [Laboratory of Physical Fundamentals and Technologies of Wireless Communication]. Available at: <https://wl.unn.ru/study/?page=4> (accessed 07.03.2020). [In Russian]
 14. *Obshchie svedeniya o besprovodnykh sensorykh setyakh* [Overview of Wireless Sensor Networks]. Available at: <https://sibsutis.ru/upload/4b6/%D0%92%D0%A%D0%A0.pdf> (accessed 30.04.2020). [In Russian]
 15. Dyadyunov A. N., Kuznetsov K. N. *Nauchnyy vestnik MGTU GA* []. 2009, no. 139. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-besprovodnyh-sensornykh-setey> (accessed 28.04.2020). [In Russian]
 16. Adamov A. P., Adamova A. A., Sementsov S. G., Temirov A. T. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2018, no. 3 (23), pp. 124–132. [In Russian]
 17. Kamakin A. S., Pavel'ev A. A. *Tekhnologii inzhenernykh i informatsionnykh sistem* [Engineering and information system technologies]. 2019, no. 4, pp. 3–9. [In Russian]
 18. Murav'ev K. A., Tsivinskaya T. A., Manushyan D. G. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2019, vol. 2, pp. 142–145. [In Russian]
 19. Vlasov A. I., Yuldashev M. N. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2018, no. 1 (221), pp. 24–30. [In Russian]
 20. Denisenko N. A., Lavrov A. V., Murav'ev K. A., Chebova A. I. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2013, no. 9 (172), pp. 51–55. [In Russian]
 21. Murav'ev K. A., Terekhov V. V. *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv* [Design and technology of electronic devices]. 2017, no. 2, pp. 15–21. [In Russian]
 22. Murav'ev K. A., Terekhov V. V. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2017, vol. 1, pp. 324–329. [In Russian]
 23. Yuldashev M. N., Vlasov A. I., Novikov A. N. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018, vol. 1015, p. 032153.
 24. Vlasov A. I., Murav'ev K. A., Prudius A. A., Uzenkov D. A. *International Review of Automatic Control*. 2019, vol. 12, no. 1, pp. 42–47.
 25. Yuldashev M. N., Vlasov A. I. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019, p. 012002.
 26. Vlasov A. I., Ivanov V. V., Kosolapov I. A. *Programmnye produkty i sistemy* [Software products and systems]. 2011, no. 1, pp. 3–6. [In Russian]
 27. Adamov A. P., Adamova A. A. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2018, vol. 1, pp. 261–264. [In Russian]
 28. Adamov A. P., Adamova A. A., Sementsov S. G., Temirov A. T. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2019, no. 4 (28), pp. 136–141. [In Russian]
 29. Adamov A. P., Adamova A. A., Sementsov S. G. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2019, no. 4 (28), pp. 142–148. [In Russian]
 30. Ivanova G. S., Volodin K. A. *Tekhnologii inzhenernykh i informatsionnykh sistem* [Engineering and information system technologies]. 2019, no. 1, pp. 35–44. [In Russian]
 31. Prisyazhnuk S. P., Murav'ev K. A., Zakharova A. S. *Proceedings 2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC)*. 2018, p. 8570125.
 32. Murav'ev K. A., Terekhov V. V. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2018, vol. 1, pp. 128–133. [In Russian]
 33. Vlasov A. I., Yuldashev M. N. *Tekhnologii elektromagnitnoy sovместимости* [Electromagnetic compatibility technologies]. 2017, no. 3 (62), pp. 35–43. [In Russian]

34. Betanov V. V., Voskov L. S., Kurpatov R. O. *Izvestiya Rossiyskoy akademii raketnykh i artilleriyskikh nauk* [Proceedings of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences]. 2011, no. 2, pp. 44–49. [In Russian]
35. Voskov L. S., Kurpatov R. O. *Kachestvo. Innovatsii. Obrazovanie* [Quality. Innovation. Education]. 2011, no. 3, pp. 35–39. [In Russian]

Муравьев Константин Александрович
старший преподаватель,
кафедра проектирования и технологии
производства электронной аппаратуры,
Московский государственный технический
университет им. Н. Э. Баумана
(Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1)
E-mail: kostiktakaya@gmail.com

Алябьев Илья Олегович
студент,
Московский государственный технический
университет им. Н. Э. Баумана
(Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1)
E-mail: olego9942@gmail.com

Синютина Дарина Сергеевна
студент,
Московский государственный технический
университет им. Н. Э. Баумана
(Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1)
E-mail: dsin76@yandex.ru

Шушуев Артемий Игоревич
студент,
Московский государственный технический
университет им. Н. Э. Баумана
(Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1)
E-mail: assassin1th@gmail.com

Muravyev Konstantin Aleksandrovich
senior lecturer,
sub-department of design and production technology
of the electronic equipment,
Bauman Moscow state technical University
(building 1, 5 2nd Baumanskaya street,
Moscow, Russia)

Alyabyev Ilya Olegovich
student,
Bauman Moscow state technical University
(building 1, 5 2nd Baumanskaya street,
Moscow, Russia)

Sinyutina Darina Sergeyevna
student,
Bauman Moscow state technical University
(building 1, 5 2nd Baumanskaya street,
Moscow, Russia)

Shushuyev Artemy Igorevich
student,
Bauman Moscow state technical University
(building 1, 5 2nd Baumanskaya street,
Moscow, Russia)

Образец цитирования:

Муравьев, К. А. Алгоритмическое проектирование беспроводных сенсорных сетей / К. А. Муравьев, И. О. Алябьев, Д. С. Синютина, А. И. Шушуев // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 4 (32). – С. 79–89. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-4-9.