

На правах рукописи

Юлдашев Михаил Николаевич

АДАПТИВНЫЙ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЙ АЛГОРИТМ  
КЛАССИФИКАЦИИ СОСТОЯНИЙ  
В БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и  
обработка информации (в технических системах)

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Москва – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

**Научный руководитель:** **Власов Андрей Игоревич**  
кандидат технических наук

**Официальные оппоненты:** **Юрков Николай Кондратьевич**  
Заслуженный деятель науки и техники РФ,  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Конструирование и  
производство радиоаппаратуры» ФГБОУ ВО  
«Пензенский государственный университет»

**Иванов Илья Александрович**  
кандидат технических наук,  
доцент департамента электронной инженерии  
Московского института электроники и  
математики имени А. Н. Тихонова  
Национального исследовательского  
университета «Высшая школа экономики»

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный  
технический университет»

Защита диссертации состоится «29» марта 2022 г. в 16 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.141.02 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Госпитальный пер., д. 10, ауд. 613м.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью, просьба направлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5 стр. 1, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.02.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Муратов Игорь Валентинович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** Беспроводные сенсорные сети (БСС) являются одним из перспективных направлений развития цифровых технологий в XXI веке. Ключевая идея БСС – автоматизация сбора информации об окружающей среде и управляемых объектах. БСС особенно полезны там, где присутствие человека в контролируемой зоне невозможно или сбор информации необходимо производить продолжительное время. БСС получили широкое распространение после активного развития современной микроэлектроники, технологий беспроводного взаимодействия и соответствующего аппаратного обеспечения.

Согласно дорожной карте Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций РФ по направлению развития «сквозной» цифровой технологии «Технологии беспроводной связи» (2019) БСС являются важной частью разработки интеллектуальных сенсорных сетей. Использование подобных сетей ориентировано на применение в таких направлениях, как информационная инфраструктура, цифровая трансформация промышленности, системы управления, государственное управление, «умный город» и цифровое здравоохранение. Также БСС являются важным элементом технологии «цифровые двойники», обеспечивая непрерывную синхронизацию объекта и его виртуальной модели при помощи множества датчиков.

За большим потенциалом использования БСС стоит немало научных и технических проблем, начинающихся еще с этапа проектирования. Данные проблемы имеют концептуально новый характер. Важность их решения заключается в том, что неучтенные детали могут существенно повлиять на функционирование всей сети в будущем. БСС обладают целым рядом особенностей по сравнению с традиционными сетями связи, поэтому требуется применение методов системного анализа, разработка новых методов проектирования и обеспечения устойчивого функционирования сети. Специфика применения БСС, а также ограниченные возможности сенсорных узлов порождают появление новых характеристик сети, таких как режимы развертывания сети, длительность жизненного цикла, зона покрытия, энергопотребление узлов сети. Поскольку все чаще БСС являются важным элементом в процессах внешних систем, то необходимо уделять большое внимание надежности и отказоустойчивости сети. В результате чего появилось немалое количество научных исследований, направленных на решение проблем исключительно в области беспроводных сенсорных сетей.

Исследования в области БСС активно проводятся с начала XXI века. За это время решено множество проблем построения и функционирования сенсорных сетей. Существенная часть данных исследований направлена на решение узкоспециализированных проблем, относящихся к конкретным областям применения БСС, и лишь небольшая часть исследований сфокусирована на общих задачах, присущих различным типам БСС. Результаты исследований нашли свое отражение в работах Akyildiz Ian F., Киричека Р. В., Кислякова М. А., Выборновой А. И., Окуневой Д. В., Бакина Е. А., Фомина А. Д., Линского Е. М.,

Иванова И. А., Пролетарского А. В. и других. В их работах исследованы современные технологии построения беспроводных сетей, представлен процесс их поэтапного проектирования – от системного анализа, планирования топологии, производительности и зоны действия до развертывания и тестирования сети. Рассмотрены особенности радиочастотного спектра, принципы модуляции, приведены технологии повышения производительности и механизмы защиты.

Как правило, узлом сети является сенсор, содержащий набор датчиков, процессор с внутренней памятью, приемо-передатчик и автономный элемент питания. Узел сети потребляет электроэнергию для сбора, обработки и передачи информации, также электроэнергия расходуется на маршрутизацию пакетов при топологии, отличной от топологии «звезда». Срок службы сенсорного узла сети напрямую зависит от срока службы элементов питания.

Элемент питания имеет ограниченный энергоресурс, при исчерпании которого узел сети прекращает функционировать, что может крайне негативно сказаться на работе БСС в целом. Получение энергии из окружающей среды не всегда является возможным, а увеличение объема энергоресурса несет повышенную опасность и увеличивает стоимость сенсора. В результате большая часть исследований по увеличению срока работы узла сети связана с уменьшением энергопотребления. Выбор энергоэффективных методов и алгоритмов сбора и передачи информации между узлами сети является одной из основных актуальных научных проблем при проектировании БСС.

К настоящему времени проблеме увеличения длительности жизненного цикла узла БСС посвящено большое количество исследований. Предложить общее решение для данной проблемы затруднительно из-за разнообразия целевых назначений и окружающей инфраструктуры БСС, поэтому для решаемой задачи важен контекст использования. Для различных приложений сенсорных сетей предлагается решать проблему с помощью энергоэффективных стандартов взаимодействия (например, IEEE 802.15 и его протокольной реализацией – ZigBee), методами кластеризации, агрегации данных, введением расписания отправки данных. Среди российских исследователей, занимавшихся энергоэффективностью в БСС, можно выделить работы Кучерявого А. Е., Кучерявого Е. А., Молчанова Д. А., Захаровой А. А., сотрудников компаний ООО «Высокотехнологичные системы», «MeshLogic» и др.

Повышение эффективности использования источника питания при мониторинге состояния сети позволит повысить срок эксплуатации сенсоров, тем самым снижаясь ресурсы на поддержание работоспособности сети. Предлагаемый автором адаптивный алгоритм принятия решения позволит автоматизировать конфигурирование сети, что особенно важно при технологии «цифровых двойников», когда на основе показаний с датчиков необходимо прогнозировать состояние объекта в будущем.

Актуальность данной работы заключается в разработке и исследовании нового способа и алгоритма передачи и обработки информации в БСС для повышения энергосбережения и адаптивности сети к параметрам окружающей среды.

**Целью работы** является разработка и исследование алгоритма классификации состояний в беспроводных сенсорных сетях, который отличается повышенными энергоэффективностью и адаптивностью к параметрам окружающей среды.

Для достижения поставленной цели в работе **решены следующие задачи**:

- проведен анализ энергопотребления в БСС с целью определения зависимости энергопотребления от выполняемых сенсором функций;
- исследованы основные направления применения существующих БСС с целью построения классификации функций БСС и формализации технических требований к разрабатываемому алгоритму классификации состояний в БСС;
- разработан адаптивный алгоритм классификации состояний в БСС на основе метода дерева решений с использованием базы знаний; разработан способ расчета количества передач данных для узла БСС, который позволяет оценить энергоэффективность предлагаемого алгоритма;
- разработана полунатуральная модель БСС, реализующая основные характеристики и поведение фактической эксплуатационной БСС, с целью исследования энергоэффективности разработанного алгоритма;
- проведено модульное тестирование основных блоков алгоритма для подтверждения корректности функционирования алгоритма.

**Методы исследования.** При выполнении работы были использованы методы системного анализа, теория сетевого взаимодействия, методы математического моделирования, теория вероятностей, методы машинного обучения, теория программирования высокого уровня, численные методы, методы тестирования программного обеспечения.

**Научная новизна** диссертационной работы:

- разработана классификация функций БСС, содержащая функции сбора данных, мониторинга, контроля, слежения и формирования управляющих команд, позволившая сформулировать общую задачу – принятие решения о состоянии сети;
- предложен способ классификации состояний в БСС с помощью метода решающего дерева, отличающийся от существующих методов адаптивностью к параметрам окружающей среды и позволяющий в автоматическом режиме настраивать параметры модели классификации;
- разработан энергосберегающий способ обработки информации в БСС, реализующий функцию принятия решения о состоянии сети, отличающейся от существующих алгоритмов использованием локального принятия решения о необходимости передачи данных по сети и позволяющий повысить энергоэффективность работы сенсора более чем на 70%;
- разработан способ расчета энергоэффективности работы БСС, учитывающий конфигурацию сети и динамику параметров окружающей среды, позволяющий рассчитать вероятностную оценку энергоэффективности работы алгоритма на основе количества передач данных по беспроводной сети.

**Достоверность научных результатов, выводов и рекомендаций диссертационной работы** подтверждены экспериментальными исследованиями разработанного алгоритма на полунатурной модели БСС. Полученные при исследовании результаты подтверждают снижение энергопотребления БСС более чем на 50% с точностью классификации более 99% при входных данных, имеющих поведение гауссовых процессов.

**Положения, выносимые на защиту:**

- классификация функций БСС, которая позволяет определить основные направления разработки методов и алгоритмов обработки информации в БСС и сформулировать общую задачу – принятие решения о состоянии сети;
- способ классификации состояний в БСС на основе метода дерева решений, обеспечивающий автоматизацию обработки информации в сети;
- алгоритм обработки информации при классификации состояний в БСС, отличающийся от существующих повышенным энергосбережением и адаптивностью сети к параметрам окружающей среды за счет использования метода решающего дерева и базы знаний, обеспечивающий сокращение количества передач данных по беспроводной сети, тем самым снижает энергопотребление;
- использование адаптивного энергосберегающего алгоритма для обработки входных данных, представленных в виде гауссовых процессов, позволяет сократить количество передач данных между сенсором и управляющим модулем более чем на 70%.

**Практическая ценность работы** состоит в том, что разработанный адаптивный энергосберегающий алгоритм обработки информации в БСС позволяет увеличить срок автономной службы сенсоров и всей сети в целом более чем на 50%, а также упростить процесс конфигурации БСС за счет автоматической адаптации алгоритма под решаемую задачу.

**Результаты работы**, представленные в виде адаптивного алгоритма классификации состояний в БСС, могут быть использованы в таких областях, как промышленность, сельское хозяйство, медицина и т.д. для контроля параметров окружающей среды и объектов. Сенсоры с увеличенным сроком автономной работы могут быть использованы в БСС, регулярный доступ к которым по каким-либо причинам затруднен или невозможен. Использование разработанного алгоритма при передаче данных между элементами сети позволяет снизить энергозатраты более чем на 50%.

**Внедрение системы.** Результаты работы использованы в НИР по Гранту РФФИ №17-07-00689 «Исследования методов синтеза распределенных сенсорных систем по критерию минимизации сетевой нагрузки», которые позволили ускорить процесс конфигурирования БСС на 20% за счет адаптивности алгоритма к параметрам окружающей среды.

Результаты работы использованы в НИР по Гос. заданию №: FSFN-2020-0041 «Фундаментальные исследования методов цифровой трансформации компонентной базы микро- и наносистем», которые позволили сократить энергопотребление сенсорной сети на 55%.

Отдельные результаты работы использованы в учебном процессе в рамках курса «Основы телекоммуникационных технологий» кафедры «Проектирование и технологии производства электронной аппаратуры» МГТУ им Н.Э. Баумана.

Результаты исследования могут найти свое применение в работе предприятий, занимающихся построением систем мониторинга и управления на базе беспроводных сенсорных сетей. Согласно дорожной карте Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций РФ по направлению развития «Технологии беспроводной связи», результаты работы будут актуальны при разработке перспективных интеллектуальных сенсорных сетей.

**Апробация работы** была проведена на научно-технических конференциях: International Conference Information Technologies in Business and Industry (Томск, 2018 г.), Всероссийский форум научной молодежи «Богатство России - 2018» в секции по направлению «Информационные технологии» (Москва, 2018), V Всероссийская научно-практическая конференция «Технологии разработки и отладки сложных технических систем» (Москва, 2018), IV Международная научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов «Энергосбережение и эффективность в технических системах» (Тамбовский государственный технический университет, 2017), International telecommunication conference on advanced micro- and nanoelectronic systems and technologies (AMNST 2017, Moscow, 01-02 июня 2017 г.), Международный симпозиум «Надежность и качество 2017» (Пенза, 2017), Молодежная международная научно-техническая конференция «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы - 2016» (Москва, 2016), VII Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем - 2016» (Зеленоград, 2016).

Результаты работы докладывались на научных семинарах кафедры «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» и кафедры «Системы автоматического управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

**Публикации.** Основные результаты работы опубликованы в 14 научных работах, из них 3 в изданиях, индексируемых в системах Scopus и Web of Science, 3 в журналах, рекомендованных ВАК РФ. На программную реализацию предлагаемого алгоритма получено Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ №2020665601 «Программный комплекс динамической классификации объекта на основе диапазонов предикатов дерева решений».

**Личный вклад автора.** Результаты, составляющие основное содержание диссертации, получены автором самостоятельно. В работе [1] автором предложена программно-алгоритмическая реализация энергоэффективного алгоритма на основе методов машинного обучения. В работах [2, 3, 4, 5, 10, 14] присутствует неразделимое соавторство в рамках научного руководства соавтором публикации. В работах [6, 8] автором предложена методика оценки надежностных характеристик беспроводных сенсорных сетей. Работы [7, 9, 11, 12, 13] выполнены непосредственно автором.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем диссертации составляет 135 страниц, включая 29 иллюстраций, список использованных источников и приложений. Библиография содержит 104 наименования, из них 46 из иностранных источников.

## Краткое содержание работы

**Во введении** содержится обоснование актуальности и научной новизны выбранной темы, а также практической значимости и достоверности результатов работы с точки зрения решения практических задач. Также во введении указана формулировка научной проблемы, решаемой в диссертации, цель работы и решаемые задачи. В заключении представлены научные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проанализированы принципы реализации БСС. БСС является сложной технической системой, где элементы системы – сенсоры и модуль управления, связи между элементами – беспроводное взаимодействие, входные данные – параметры контролируемого объекта, выходные данные – результат обработки информации с сенсоров, в том числе сформированные управляющие команды (см. Рисунок 1). БСС предназначены для автоматизированного сбора информации о контролируемом объекте с последующей обработкой информации и выработкой управляющего воздействия. При исследованиях в области БСС приходится решать такие задачи системного анализа, как анализ проблемы и выявление ее причин, выработка вариантов ее разрешения, декомпозиция и формализация БСС, использование имитационных моделей БСС для исследования предлагаемых решений.

Основная задача эффективного функционирования БСС – это снижение энергопотребления узла БСС. Анализ одного рабочего цикла узла сети показал, что около 70% энергии источника питания расходуется на коммуникацию (прием и передача данных по сети). Обобщенный график энергопотребления узла БСС представлен на Рисунке 2.

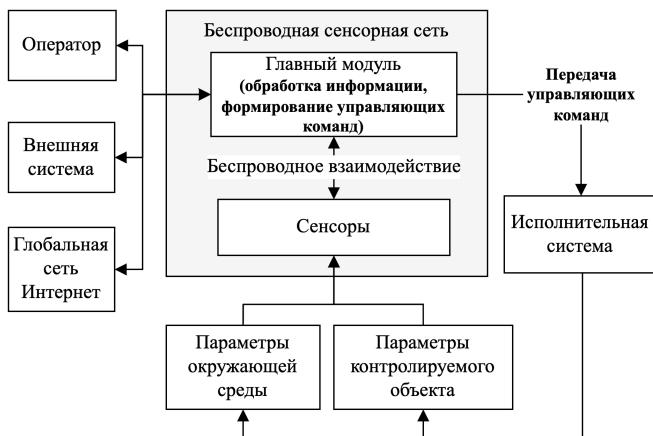


Рисунок 1. Структурная схема БСС

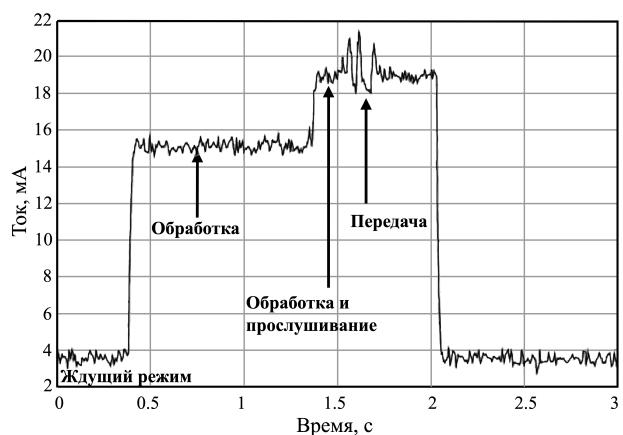


Рисунок 2. Осциллограмма работы сенсорного узла в зависимости от фазы обработки информации

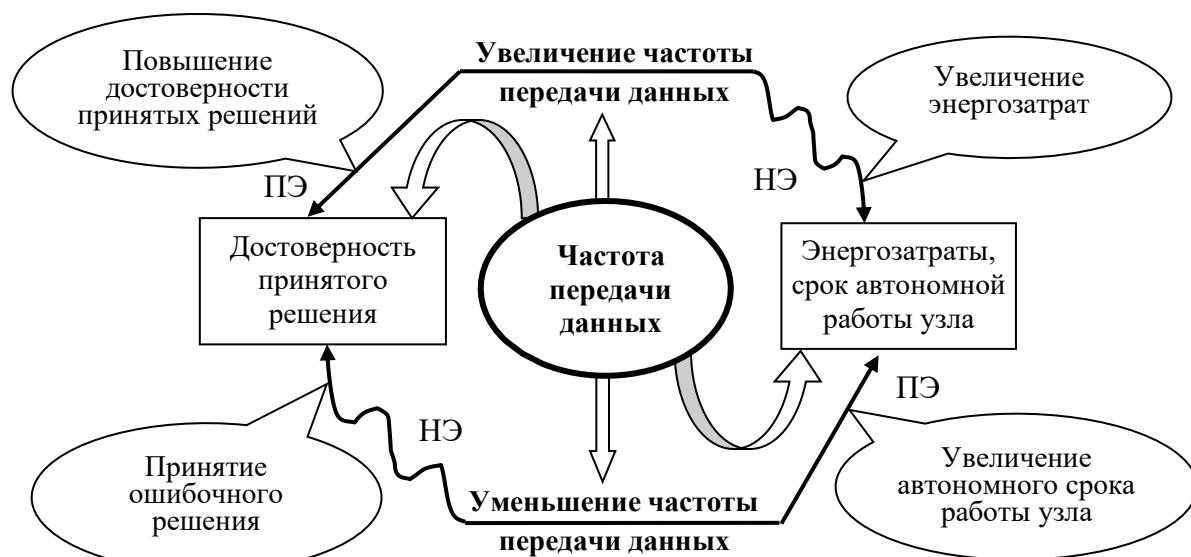
Представлен анализ существующих методов и средств, обеспечивающих увеличение времени автономной работы узла сети за счет использования эффективных алгоритмов передачи данных. Для этого предлагается использовать метод *Geographical Adaptive Fidelity*, энергетическую

балансировку при построении маршрута передачи данных, дискретный режим работы узла сети, расписание для передачи данных, агрегацию данных и другое.

Проведен анализ существующих применений БСС, на основе которого была разработана классификация функций БСС: сбор данных, мониторинг, контроль, слежение, формирование управляющих команд. Определено, что для функций мониторинга, контроля, слежения и формирования управляющих команд требуется на основе данных с узлов БСС классифицировать состояние сети.

При классификации состояний в БСС важным этапом является сбор текущих показаний сети. Данные представлены в структурированном виде с указанием временных меток, идентификатора сенсора и самих показаний. Главный модуль получает данные со всех сенсоров и принимает решение по заранее определенному алгоритму. Данные алгоритмы оперируют с информацией, поступившей в текущий момент времени, и представляют собой поведенческое описание системы. Подобные алгоритмы принятия решения имеют низкую гибкость и адаптацию ко внешним факторам.

При обеспечении взаимодействия элементов беспроводной сенсорной сети возникает вопрос о том, с какой частотой должны передаваться показания по сети к главному модулю. С увеличением числа сеансов связи растут энергозатраты, что ведет к сокращению времени автономной работы узла сети, с уменьшением – повышается вероятность пропуска важных событий, что может привести к неверному принятию решения (Рисунок 3).



ПЭ – положительный эффект, положительное влияние;  
НЭ – нежелательный эффект, нежелательное влияние.

Рисунок 3. Предметное противоречие частоты передачи данных

Разрешение противоречия достигается за счет использования «принципа вынесения», предложенного Г. С. Альтшуллером. В данном случае объектом вынесения является частота передачи данных, которая обязывает периодически передавать данные по сети. Если отказаться от периодической передачи данных, то требуется обеспечить альтернативную методику взаимодействия. Для этого предлагается использовать «принцип динамичности», то есть, когда

характеристика объекта или внешней среды должна меняться так, чтобы быть оптимальной на каждом этапе работы системы. В данном случае принцип динамичности можно характеризовать как передачу данных только тогда, когда в этом есть необходимость.

Таким образом, для решения технического противоречия предлагается разработать алгоритм обработки информации в беспроводных сенсорных сетях, который с одной стороны сократит количество сеансов связи, тем самым повысит энергоэффективность узла БСС, а с другой стороны будет гарантировать, чтобы главный модуль всегда обладал необходимой информацией о параметрах окружающей среды.

Для динамического определения частоты передачи данных предлагается использовать информацию из базы знаний, чтобы сенсоры самостоятельно принимали решение, когда необходимо передавать данные. Для реализации данного алгоритма эффективно использовать методы машинного обучения. Они ориентированы на построение математической модели поведения внешней среды, где параметры данной системы определяются путем обучения на выборке данных с сенсоров и результатов принятия решения главным модулем или оператором.

**Во второй главе** для формализации задачи классификации состояний в БСС представлена математическая модель, описывающая в общем виде набор параметров, с которым в дальнейшем следует оперировать предлагаемому алгоритму. Преимуществом данной модели является то, что происходит абстрагирование от технической реализации сенсорной сети, тем самым упрощается применение методов управления и обработки информации из смежных дисциплин.

Для математического описания задачи классификации введем несколько параметров входных данных:

$N$  – количество сенсоров в БСС,

$K$  – количество уникальных параметров внешней среды,

контролируемых датчиками (температура, влажность, и т.п.),

$X$  – множество показаний со всех сенсоров сети.

Каждый сенсор в определенный момент времени  $t \in T$  представлен вектором  $\vec{x}_n \in X$ , где  $n = 1..N$ . Данный вектор принадлежит К-мерному пространству значений, при этом элемент  $x_{nk}$  может быть выражен бинарным (срабатывание триггера) или количественным (значения температуры, влажности) признаком. Таким образом, значение  $x_{nk}$  характеризует показание датчика в составе  $n$ -го сенсора, который контролирует  $k$ -й параметр окружающей среды.

Таким образом, показания сенсорной сети описываются матрицей объектов-признаков:

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{21} & \dots & x_{N1} \\ x_{12} & x_{22} & \dots & x_{N2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{1K} & x_{2K} & \dots & x_{NK} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Также введем параметры для задачи классификации:

$S$  – количество состояний, которое может быть детектировано с помощью БСС (например, повышенная влажность, возгорание, утечка газа),

$Y$  – множество состояний в беспроводной сенсорной сети, которое можно представить в виде:

$$Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_S \end{pmatrix}. \quad (2)$$

В определенный момент времени БСС находится в состоянии  $y \in Y$ , которое может быть выражено бинарным или номинальным признаком.

Задача классификации состояний в беспроводной сенсорной сети заключается в установлении зависимости (отображения):

$$y^*: X \rightarrow Y. \quad (3)$$

В ходе анализа методов классификации в области машинного обучения было принято решение, что наиболее подходящей моделью при классификации состояний в БСС является решающее дерево. Во-первых, данная модель полностью решает задачу многоклассовой классификации. Во-вторых, модель легко интерпретировать, и процесс принятия решения похож на алгоритм работы оператора. В-третьих, модель позволяет классифицировать при наличии пропусков в данных. В-четвертых, модель решающего дерева позволяет выделить компоненты, дающие возможность выстроить дополнительную модель для локального принятия решения о необходимости передачи данных на базовую станцию.

Для того чтобы определить к какому классу относится входной объект, необходимо ответить на вопросы, стоящие в узлах решающего дерева, начиная с его корня. Вопросы имеют вид «значение параметра  $x_{nk}$  больше значения ...». Если ответ положительный, то осуществляется переход к правому узлу, если отрицательный – к левому, затем снова необходимо ответить на вопрос следующего узла. Так, в конце концов, достигается один из конечных узлов, где стоит указание, к какому классу следует отнести рассматриваемый объект. За счет прозрачной интерпретации работы алгоритма данный метод имеет высокую наглядность.

*Расчет энергоэффективности алгоритма классификации состояний в БСС.* Рассмотрим расчет энергопотребления по параметрам решающего дерева. Обозначим основные параметры модели обученного решающего дерева:  $v$  – количество узлов сети (в решающем дереве – предикаты),  $r$  – количество листьев дерева (в решающем дереве – состояние в сети). Определим граничные случаи при построении решающего дерева.

Минимальное дерево. Под минимальным деревом будем считать такое дерево, где каждому состоянию сети соответствует ровно один лист. В результате полученное дерево будет иметь минимальные значения  $v$  и  $r$ , то есть:

$$r_{min} = S, v_{min} = S - 1.$$

В простейшем случае в сети из одного сенсора, который контролирует один параметр окружающей среды ( $N = 1, K = 1$ ), чтобы сформировать  $v$  узлов,

достаточно для данного сенсора определить  $S - 1$  непересекающихся точек на области определения контролируемого параметра. В таком случае получим набор предикатов:

$$P_{min} = [p : p_i \in \mathbb{R}, i = 1..S - 1].$$

Предикаты  $P_{min}$  разбивают зону определения параметра  $x$  на  $S$  промежутков, которые будем называть *числовыми диапазонами*. Каждый числовой диапазон будет соответствовать одному из состояний сети. Таким образом, нахождения параметра в рамках одного числового диапазона означает, что БСС не изменяет своего состояния, следовательно, передавать данные на базовую станцию нет необходимости. Пример минимального решающего дерева и его соответствующих числовых диапазонов, сформированных на базе предикатов, представлены на Рисунке 4.

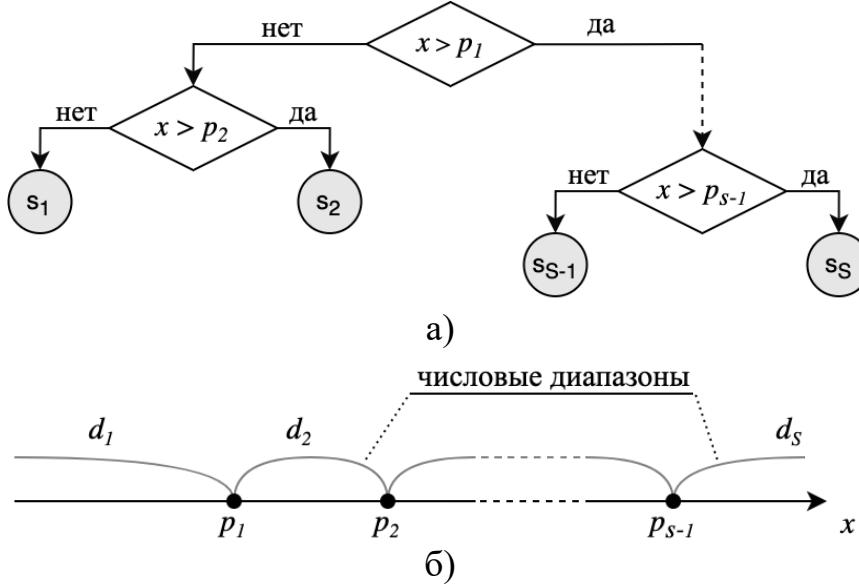


Рисунок 4. Минимальное дерево: а) пример минимального дерева и б) его числовые диапазоны на базе предикатов дерева

Полное дерево: ситуация, когда каждое показание  $x_{nk}$  (при  $c_{nk} = 1$ ) имеет  $S$  разделений, таким образом, содержит  $S - 1$  предикат. В результате количество узлов (предикатов) можно вычислить по формуле:

$$P_{max} = [p : p_i \in \mathbb{R}, i = 1..CN \cdot (S - 1)],$$

где  $CN$  – количество действительных показаний сети.

В результате получаем, что размер дерева варьируется в диапазоне:

$$P = [|P_{min}|, |P_{max}|] = [S - 1, CN \cdot (S - 1)]. \quad (4)$$

Количество показаний, участвующих в процессе классификации:

$$CN_{tree} = [1, CN],$$

причем ситуация  $CN_{tree} < CN$  означает, что не все показания сенсорной сети участвуют в принятии решения, следовательно, такие показания можно исключить из сети без влияния на процесс классификации.

Расчет количества сеансов связи при энергоэффективном методе передачи данных. Рассмотрим функцию изменения параметра окружающей среды  $x =$

$x(t)$ , а также набор предикатов  $P = [p : p_i \in \mathbb{R}, i = 1..v]$ , где  $v$  – количество предикатов обученного дерева.

Зададим функцию состояния сенсора  $S(t)$ , которая определяет принадлежность точки  $x(t)$  к промежутку  $d_i$ :

$$S(t) = \{p_i : p_i \leq x(t) < p_{i+1}\}.$$

На промежутке времени  $t \in [T_x, T_{x+1}]$  количество передач данных по сети можно вычислить через количество переходов переменной  $x(t)$  между промежутками  $d_1, \dots, d_P$ :

$$H = \sum_{t=T_x}^{T_{x+1}} \begin{cases} h, & S(t) \neq S(t+1) \\ 0, & S(t) = S(t+1) \end{cases}. \quad (5)$$

В выражении используется  $h$  – среднее количество передач при маршрутизации в топологиях «дерево» и «ячеистая», для топологии «звезда»  $h = 1$ .

Вычислим энергоэффективность алгоритма на основе числовых диапазонов. Для этого определим вероятность локального изменения состояния сенсора, то есть вероятность, когда значение  $x(t)$  сменило числовой диапазон в промежуток времени  $[t, t+1]$ :

$$KS_{nki}^t = \sum_{j=1, j \neq i}^S p(S_{nkJ}^{t+1} \mid S_{nki}^t),$$

где  $S_{nki}$  – условие, когда показание  $k$ -го параметра ( $k=1..K$ )  $n$ -го сенсора ( $n=1..N$ ) является  $i$ -м числовым диапазоном ( $i=1..P$ ). Таким образом, вероятность смены состояния БСС при изменении  $k$ -го параметра  $n$ -го сенсора может быть вычислена по формуле:

$$KS_{nk} = \sum_{i=1}^S KS_{nki}^t \cdot p(S_{nki}^t).$$

Другими словами,  $KS_{nk}$  – это вероятность того, что  $n$ -му сенсору необходимо передать показания  $k$ -го параметра на базовую станцию. Таким образом, вероятность того, что  $n$ -й сенсор выполнит передачу данных, можно вычислить по формуле:

$$KS_n = 1 - \prod_{k=1}^K (1 - p(KS_{nk})). \quad (6)$$

Выражение (6) получено из соображения того, что мы можем определить вероятность отсутствия передачи по сети как ситуацию, когда каждый из параметров сети не изменил своего числового диапазона. В результате при использовании предлагаемого энергосберегающего алгоритма,  $n$ -й сенсор сокращает количество передач по сети на  $(1 - KS_n)\%$ .

**В третьей главе** представлены результаты разработки программной реализации адаптивного энергосберегающего алгоритма классификации состояний в БСС. Алгоритм основывается на модели классификации – решающее дерево, что позволяет использовать базу знаний для энергоэффективного принятия решения. Процесс вычисления состояния сети при помощи дерева решений является идемпотентным, то есть, при условии одинаковых входных данных, гарантируется идентичность итогового

результата. Таким образом, если новые показания с сенсоров не изменились, то и состояние сети остается прежним.

При использовании предлагаемого алгоритма предполагается, что базовая станция будет получать показания с сенсоров в тот момент, когда БСС должна сменить свое состояние. В свою очередь базовая станция принимает решение о состоянии сенсорной сети на основе множества переданных данных от сенсоров. Таким образом, алгоритм энергоэффективной классификации состояний БСС состоит из двух этапов:

1. локальное принятие решения о смене состояния подсистемы (узла сети) и необходимости передачи данных на главный модуль;
2. принятие решения о текущем состоянии системы с учетом предыдущего состояния и новых показаний, полученных от сенсоров.

На Рисунке 5 представлена контекстная диаграмма работы адаптивного энергосберегающего алгоритма классификации состояний в беспроводной сети, которая отображает взаимодействие с внешней системой.



Рисунок 5. Контекстная диаграмма работы адаптивного энергосберегающего алгоритма классификации состояний в БСС

Также в третьей главе представлен первый уровень декомпозиции контекстной диаграммы, анализ функциональных требований к разрабатываемому алгоритму, блок-схема алгоритма и основные элементы программного кода с описанием логики классификации состояний в БСС.

**В четвертой главе** проведено экспериментальное исследование разработанного адаптивного энергосберегающего алгоритма обработки информации в БСС. Исследование состоит из трех частей: в первой части проводится модульное тестирование функциональных блоков алгоритма, во второй – исследование способа расчета вероятности передачи данных при стандартных распределениях контролируемой величины, в третьей – исследование энергоэффективности работы БСС при использовании разработанного алгоритма классификации состояний на полунатурной модели БСС.

Модульное тестирование функциональных блоков выполнено для функции определения числовых предикатов и функции локального принятия решения о необходимости передачи данных по сети. Модульное тестирование подтвердило, что разработанные функции производят вычисления корректно.

Для проверки достоверности расчетов энергоэффективности разработанного алгоритма были проведены исследования на различных моделях динамики параметров окружающей среды. Рассмотрено равномерное и нормальное распределения случайной входной величины. Результаты представлены на Рисунке 6. На рисунке слева представлено поведение случайной величины, справа – закрашенная область получена при помощи программной реализации алгоритма, пунктирная – при использовании разработанного способа расчета вероятности передачи данных по сети. Совпадение графиков доказывает достоверность полученных расчетов. При этом визуально можно выделить, что максимальное количество изменений состояния сети приходится на значение 0. Это объясняется тем, что вероятность попадания в положительную ось и отрицательную равновероятны.

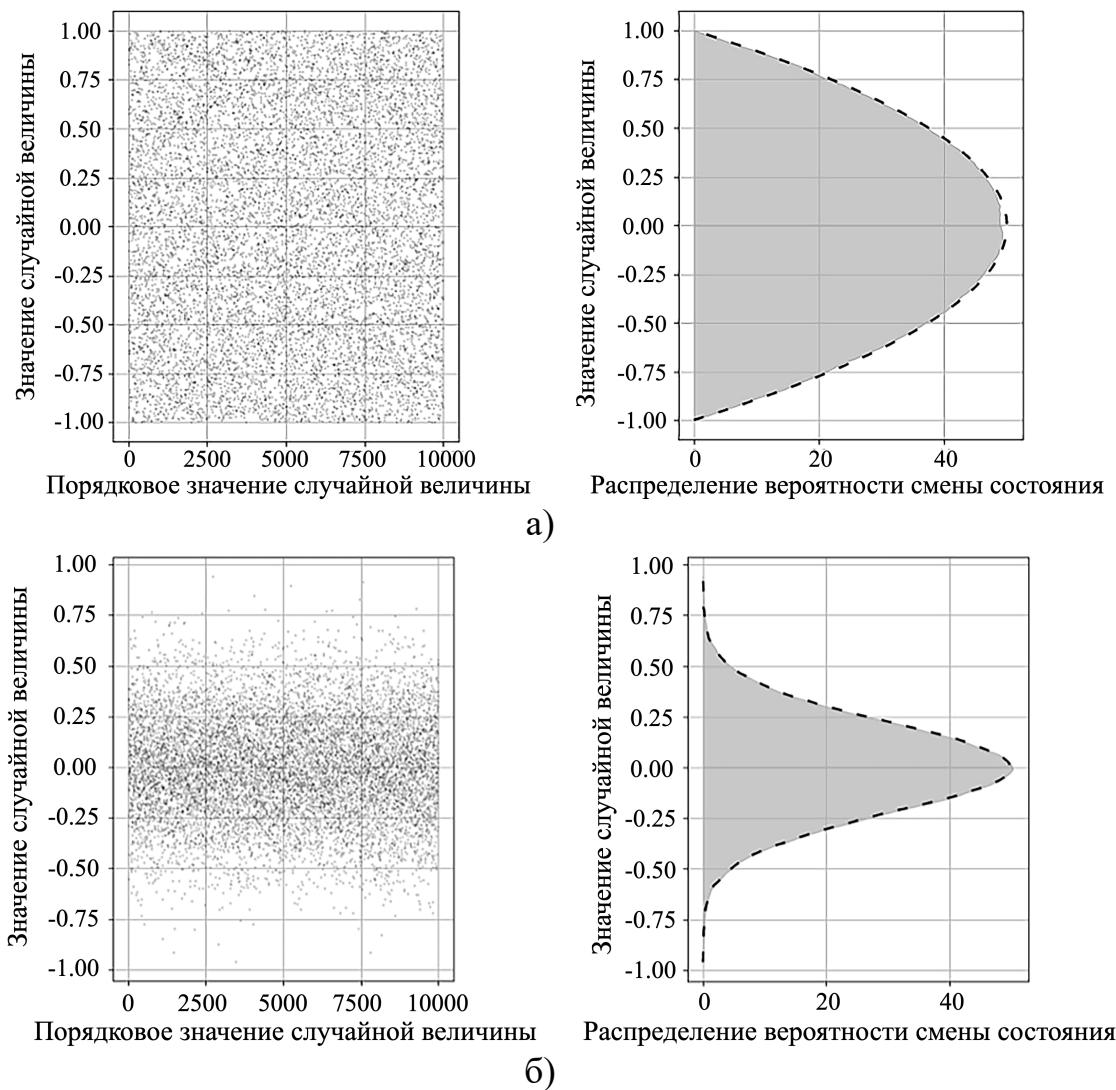


Рисунок 6. Графики моделирования случайных процессов и оценка вероятности передачи данных по сети:  
 а) равномерное распределение, б) нормально распределение

В состав полунатурной модели БСС входило переменное количество сенсоров, параметров окружающей среды, состояний сети, а также различные топологии. Каждый сенсор предоставлял информацию об определенных параметрах окружающей среды (например: влажность, температура, давление, освещенность). Динамика параметров окружающей среды была сгенерирована при помощи гауссовых процессов. Для генерации состояний сети на основе входных данных был использован алгоритм кластеризации k-means.

На первом этапе случайным образом было выбрано 40% данных, на которых было построено решающее дерево по алгоритму ID3. На втором этапе оставшиеся 60% данных были классифицированы с помощью полученной модели. Для оценки достоверности построенной модели была рассчитана точность классификации, равная  $(T) / (T + F)$ , где  $T$  – количество верных ответов,  $F$  – количество ошибочных ответов.

Результаты исследования разработанного алгоритма:

- *тестирование при различном количестве сенсоров,  $N$ :* точность классификации более 99.6%, с ростом  $N$  количество предикатов уменьшается, а энергоэффективность алгоритма растет с 73% до 96%;
- *тестирование при различном количестве параметров окружающей среды,  $K$ :* точность классификации более 99.3%, с ростом  $K$  уменьшается количество предикатов, а энергоэффективность растет с 88% до 97%;
- *тестирование при различном количестве состояний сети,  $S$ :* точность классификации более 99.4%, с ростом  $S$  увеличивается количество предикатов, падает энергоэффективность с 97% до 77%;
- *тестирование при различном количестве связей в сети,  $h$ :* точность классификации более 99%, остальные параметры без существенных изменений.

Из результатов исследования видно, что построенная модель решающего дерева дает точность классификации состояний в сенсорной сети более 99%. Таким образом доказано, что алгоритм удовлетворяет своим функциональным требованиям.

Энергоэффективность алгоритма (KS) зависит как от параметров БСС, так и от динамики входных данных. Для всех проведенных испытаний разработанного алгоритма установлено, что энергоэффективность работы БСС превышает 70%.

Тестирование при различном количестве сенсоров  $N$  показало следующую зависимость: чем больше сенсоров контролируют параметры окружающей среды, тем выше энергоэффективность алгоритма. Это можно обосновать тем, что при большем количестве сенсоров модели решающего дерева удается найти наиболее показательные входные данные. Тестирование при различном количестве состояний сети  $S$  показало следующую зависимость: чем больше состояний сети, тем ниже энергоэффективность алгоритма. Также установлено, что энергоэффективность сети при использовании предлагаемого алгоритма не зависит от топологии сети.

**В заключении** диссертационной работы представлены общие результаты исследования, которые были получены при выполнении работы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Для достижения поставленных целей в диссертационной работе решены актуальные научно-технические задачи и получены следующие результаты:

1. Проведен системный анализ способов энергопотребления в беспроводных сенсорных сетях, который определил, что 70% электроэнергии узла сети расходуется на коммуникацию по беспроводной сети;
2. Проведен системный анализ функций беспроводных сенсорных сетей в различных отраслях, который позволил сформировать классификацию функций БСС: сбор данных, мониторинг, контроль, слежение и формирование управляющих команд, и сформулировать общую задачу для разрабатываемого алгоритма – принятие решения о состоянии в БСС;
3. Разработан адаптивный энергосберегающий алгоритм обработки информации в БСС, реализующий принятие решения о классификации состояния сети на основе набора прецедентов;
4. Разработана программная реализация алгоритма классификации в БСС на программном языке Python;
5. Проведено экспериментальное исследование способа расчета вероятности передачи данных, которое подтвердило достоверность теоретических расчетов с погрешностью менее 1%;
6. Проведен сравнительный анализ предлагаемого алгоритма классификации состояний в БСС на математической модели и при исследовании на полунатурной модели, который показал, что при использовании алгоритма точность классификации составляет более 99%, а количество сеансов связи сокращается более чем на 70%.

### **Список работ, опубликованных автором по теме диссертации:**

1. Yuldashev M. N., Vlasov A. I., Novikov A. N. Energy-efficient algorithm for classification of states of wireless sensor network using machine learning methods // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Volume 1015, Issue 3, article id. 032153. DOI:10.1088/1742-6596/1015/3/032153. (0.8 п.л./0.4 п.л.).
2. Yuldashev M., Vlasov A. Performance Analysis of Algorithms for Energy-Efficient Data Transfer in Wireless Sensor Networks // 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2019. N.8743087. DOI: 10.1109/ICIEAM.2019.8743087. (0.6 п.л./0.3 п.л.).
3. Yuldashev M. N., Vlasov A. I. Mathematical model of the general problem of state classification in wireless sensor networks // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. N.012002. DOI: 10.1088/1757-899X/498/1/012002. (0.6 п.л./0.3 п.л.).
4. Юлдашев М. Н., Власов А. И. Анализ методов и средств обработки информации сенсорного кластера // Датчики и системы. 2018. № 1 (221). С. 24–30. (0.4 п.л./0.2 п.л.).

5. Юлдашев М. Н., Власов А. И. Гауссовские процессы в регрессионном анализе состояний беспроводной сенсорной сети с учетом электромагнитных помех // Технологии электромагнитной совместимости. 2017. № 3 (62). С. 35–43. (0.5 п.л. /0.3 п.л.).
6. Юлдашев М. Н., Адамов А. П., Адамова А. А. Классификация состояний беспроводной сенсорной сети с использованием методов машинного обучения // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2016. № 2. С. 248–251. (0.3 п.л./0.1 п.л.).
7. Юлдашев М. Н. Искусственный интеллект: проблемы обеспечения безопасности жизнедеятельности человека // Молодежный научно-технический вестник. 2017. № 4. С. 35–39. (0.4 п.л./0.4 п.л.).
8. Юлдашев М. Н., Адамов А. П., Адамова А. А. Методы обеспечения надежности в беспроводных сенсорных сетях по критерию сетевой нагрузки // Международный симпозиум «Надежность и качество». – Пенза: Пензенский Государственный Университет, 2019. Том 1. С. 197–199. (0.3 п.л./0.1 п.л.).
9. Юлдашев М. Н. Развитие беспроводных сенсорных сетей // Сборник трудов XVIII-я Молодежной международной научно-технической конференции «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы 2016». – Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. С. 398–401. (0.2 п.л./0.2 п.л.).
10. Юлдашев М.Н., Власов А. И. Анализ противоречий синтеза распределенных сенсорных сетей // Сборник трудов V Всероссийской научно-практической конференции «Технологии разработки и отладки сложных технических систем». – Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. С. 20–29. (0.5 п.л./0.3 п.л.).
11. Юлдашев М. Н. Энергосберегающая технология передачи данных в беспроводных сенсорных сетях // Материалы IV Международной научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов «Энергосбережение и эффективность в технических системах». Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2017. С. 177–178. (0.2 п.л. / 0.2 п.л.).
12. Юлдашев, М. Н. Энергоэффективный алгоритм передачи данных между элементами беспроводной сенсорной сети // Сборник докладов «Богатство России». Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. С. 110–111. (0.1 п.л. / 0.1 п.л.).
13. Юлдашев, М. Н. Анализ топологий и архитектур беспроводных сенсорных сетей // Сборник трудов Молодежной международной научно-технической конференции «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы» - Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. С. 398–401. (0.2 п.л. / 0.2 п.л.).
14. А.с. 2020665601, ФГБОУ ВО «МГТУ им Н. Э. Баумана» (НИУ). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программный комплекс динамической классификации объекта на основе диапазонов предикатов дерева решений» [Текст] // М. Н. Юлдашев, А. И. Власов – 2020664889; заявл. 20.11.2020; опубл. 27.11.2020. 1с.