

17. Жирнов, В. В. Интеллектуальная система радиолокационного обнаружения малозаметных воздушных объектов [Текст] / В. В. Жирнов, С. В. Солонская // Радиоэлектроника и информатика: Научно-технический журнал. – 2005. – Вып. 3. – С. 134–138.
18. Жирнов, В. В. Распознавание радиолокационных отметок по спектральному изображению с адаптивными весовыми коэффициентами [Текст] / В. В. Жирнов, С. В. Солонская // Радиоэлектроника и информатика: Научно-технический журнал. – 2006. – Вып. 1. – С. 121–124.
19. Тейз, А. Логический подход к искусственному интеллекту: от классической логики к логическому программированию [Текст] / А. Тейз, П. Грибомон и др. – М.: Мир, 1990. – 432 с.

У статті запропонований принцип розбиття бездротової сенсорної мережі, на пікомережі. Пропонується визначати фактори, які впливають на інтенсивність інформаційних потоків, використовуючи матрицю критеріїв. Розроблений алгоритм управління інформаційним потоком для вузла мережі. Для мурашиного алгоритму пропонується два підходи по його модифікації. Отримані результати можуть застосовуватися при проектуванні бездротових сенсорних мереж

Ключові слова: алгоритм оптимізації, алгоритм керування, інформаційні потоки, бездротові сенсорні мережі, пікомережа

В статье предложен принцип разбиения беспроводной сенсорной сети, на пикосети. Предлагается определять факторы, которые влияют на интенсивность информационных потоков, используя матрицу критериев. Разработан алгоритм управления информационным потоком для узла сети. Для муравьиного алгоритма предлагается два подхода по его модификации. Полученные результаты могут применяться при проектировании беспроводных сенсорных сетей

Ключевые слова: алгоритм оптимизации, алгоритм управления, информационные потоки, беспроводные сенсорные сети, пикосеть

УДК 621.396

DOI: 10.15587/1729-4061.2014.30419

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ В БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ

П. В. Галкин

Ассистент

Кафедра проектирования и
эксплуатации электронных аппаратов

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

пр. Ленина, 14, г. Харьков, Украина, 61166

E-mail: galkinletter@ukr.net

1. Введение

Беспроводные сенсорные сети (БСС) – это своеобразный шаг на пути перехода в эпоху цифровой реальности. Сеть БСС представляет собой новый тип информационно-коммуникационной системы, построенной для сбора информации и управления исполнительными устройствами с областью покрытия от нескольких метров до десятка километров. Такие сети представляют большой интерес для учёных по всему миру. Проведено много исследований по некоторым важным особенностям работы беспроводных сенсорных сетей, таким как: сохранение энергии и позиционирование узлов, кластеризация сети, составление модели сбора информации. В то же время остается актуальным вопрос разработки алгоритмов управления информационным потоком внутри сети, а также проведение оптимизации такого потока. Загруженность узлов информационными потоками является основным фактором при повышении качества обслуживания

(QoS) информационных потоков. Ведь при условии значительного значения интенсивности информационных потоков все остальные критерии оптимизации могут быть не важны. Следует также отметить, что области применения БСС постоянно увеличиваются и расширяются, создавая цифровую картину мира. При этом трафик внутри сети уже принимает стохастический характер и имеет признаки самоподобия.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Решением задачи повышения качества обслуживания в БСС занималась научная школа под руководством Л. С. Воскова [1]. В работе [1] рассматриваются основные проблемы при проектировании БСС, к таким относятся: нехватка энергетических ресурсов, низкая пропускная способность и ограниченная вычислительная мощность узлов. Также М. М. Комаров

и Л. С. Восков [1] отмечают, что в БСС трафик носит несбалансированный характер, таким образом вопрос управления информационным потоком при обеспечении качества обслуживания является актуальным.

Вопрос классификации беспроводных сенсорных сетей по видам нагрузки рассматривался Ермошкиной Д. Д. и Кучерявым А. Е. в работе [2]. Научная школа «Интернет вещей и самоорганизующиеся сети» Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича под руководством проф. Кучерявого А. Е. за последнее десятилетие провела целый ряд исследований, в которых рассматриваются разные аспекты работы БСС. Это еще раз подтверждает актуальность выбранной темы исследования.

В работе [3] рассмотрен подход к оптимизации маршрутов информационных пакетов в беспроводных сенсорных сетях на основе использования алгоритма Форда-Беллмана с учетом изменений состава узлов и топологии сети, пропускной способности каналов, загрузки узлов. Построены алгоритмы расчета критерийных функций для оптимизации маршрутов в смысле некоторого набора критериев. Следует отметить, что алгоритм Форда-Беллмана работает, когда БСС представляется в виде графа, он осуществляет поиск кратчайшего пути, при этом допускает рёбра с отрицательным весом.

Механизмы интеллектуального управления БСС предложены в работе [4], где отмечается, что важным моментом при работе автономной сенсорной сети является ее отказоустойчивость и поведение в случае перемещения узлов, отказа или отключения. Сенсорная сеть должна постоянно адаптироваться к изменению окружающей сетевой виртуальной среды. Для этого узел может постоянно следить за соседями, обновляя маршрутные таблицы на основе оценки мощности сигналов принимаемого сигнала – RSSI (англ. Received Signal Strength Indication).

Процесс обработки заявок с поддержкой качества обслуживания рассматривался в работе [5], где предложена модель управления процессом обработки заявок и рекомендуется строить процесс обслуживания заявок таким образом, чтобы не было необоснованных задержек высокоприоритетных заявок, пришедших во время обслуживания низкоприоритетных заявок большой сложности.

Сравнивая агрегационные алгоритмы в условиях различных архитектурных особенностей БСС [6], следует отметить, что существует четыре вида топологии в иерархических сетях:

- кластеризация;
- цепная архитектура (chain based architecture);
- древовидная;
- сеточная (grid based architecture).

Для кластерной топологии применимы алгоритмы CAG, EECDA, LEACH; для цепной архитектуры – PEGASIS, COSEN, E-PEGASIS, CHIRON; для древовидной топологии – TREEPSI, PERLA, TCDGP; для сеточной – GROUP, ATCBG.

При рассмотрении информационного обмена в сети БСС и критериев, по которым можно провести оптимизацию потока, нужно учитывать, чтобы сами критерии не были мультиколлинеарны [7].

В зависимости от связности сети бывают случаи, когда при низкой связанности участка сети, происходит дробление сети на несвязанные между собой группы узлов. Для решения данной проблемы необходимо обеспечить оптимизацию информационного потока таким образом, чтобы обеспечить безотказную работу узлов, которые ближе всего расположены к основной части сети, которая имеет большую связность, чем отдалённая группа узлов. Также решением проблемы удалённой группы узлов возможно использование спиральной антенны [8].

Алгоритм Форда-Беллмана (встречается также название алгоритм Беллмана-Форда [9]) рассмотрен в работах [3, 9]. Также существует алгоритм Дейкстры, Флойда, матричный метод, сравнение которых приводится в работе [9]. Автор говорит про невозможность нахождения оптимального маршрута по алгоритму Дейкстры, хотя на самом деле он хорошо работает, если известен конкретный узел-отправитель и узел-получатель. Для нахождения кратчайшего пути из любого узла в любой узел можно использовать алгоритм Флойда (алгоритм Флойда-Уоршелла), который является простым в реализации и имеет низкую вычислительную нагрузку.

В статье [10] предлагается метод, позволяющий найти параметры потоков на разных уровнях мультисервисной наложенной сети, для которых характерен наложенный принцип построения и наличие мультисервисных потоков. В БСС местоположение узлов, как правило, определяется на стадии синтеза сети, поэтому модель в виде многослойного графа может применяться также и для беспроводных сенсорных сетей.

В БСС находят применение также нейросетевые модели, например для нахождения локализации сети [11]. Кластеризация является одним из лучших вариантов уменьшения информационного потока, а также увеличения времени жизни БСС. С этой целью в работе [12] предложены два протокола кластеризации S-ЕЕСР и М-ЕЕСР. Как отмечалось в работах [1, 6], уменьшение энергопотребления узлов является важной задачей при работе БСС. Чтобы свести к минимуму потери энергии, в работе [13] предлагается алгоритм Color Based Topology Control (CBTC), в котором узлы подкрашиваются, так называемым “color_flag”, и в зависимости от цвета передают информацию соседним узлам, которые имеют такой же цвет. Можно сделать вывод, что такой алгоритм управления потоком данных хорошо подойдёт для системы «Умный дом», где существует ряд систем, подсистем которые объединяют в единую.

Для управления информационным потоком применяют также генетические алгоритмы [14], а избегание коллизий при высокой плотности пакетов данных [15] может быть реализовано за счет оптимизации процесса передачи данных. Такая оптимизация строится на формировании приоритета передачи для каждого узла сети, а также минимизации средней задержки доступа для каждого узла во время коммуникационного процесса.

Модель для оценки надежности БСС и рассмотренные уровни заряда батареи как ключевого фактора при работе сети приведена в работе [16]. В этой статье рассматривается передача данных по многопутевому методу, в качестве критерия оптимальности предлага-

ется уровень заряда источников питания узлов. Такой подход позволяет не потерять данных в ходе передачи потока информации через цепь узлов.

Для оптимизации маршрута возможно использовать направленную секторальную антенну [17]. Такой подход позволит не только улучшить определение координат, что отмечено в статье, но и оптимизировать передачу по секторам антенны. В случае совпадения направления сектора и направления на узел, с которым нужно связаться, удастся уменьшить расход на прием-передачу информации.

Мультимедийный метод сбора данных рассматривается в работе [18], при этом утверждается, что кластеризация является одним из методов уменьшения потребления энергии узлами БСС. Эвристический алгоритм HE-PDS в работе [19] предлагается дополнить межслойным взаимодействием (cross-layer coordination). В работе [20] предлагается энергосберегающая политика планирования пакета, которая учитывает временную корреляцию с соседними узлами при передаче данных. В работе [21] кроме низкого энергопотребления, как критерия при маршрутизации информационных потоков, берется во внимание критерий низкой задержки. Такой подход используется в алгоритме L2ER [21].

Существует два основных подхода к постановке и решению задачи маршрутизации. Первый, развивающийся в рамках алгоритмической теории графов, связан с поиском кратчайших путей на основании определенных весов и критериев, как показано в работах [3, 6, 9, 16]. К второму подходу относят потоковые модели, которые, в отличие от графокомбинаторных алгоритмов, вычисляют не только множество оптимальных в той или иной метрике доступных путей, но и определяют порядок распределения трафика вдоль каждого из них [22–24]. Для решения задач маршрутизации с обеспечением качества обслуживания хорошо себя зарекомендовал тензорный подход [23], основанный на многоаспектном представлении сети, как с точки зрения особенностей ее структурного построения, так и с позиций функциональной иерархии сетевых задач.

Однако, по мнению многих ученых, работающих в области сетевых технологий, компромиссным вариантом при выборе модели многопутевой маршрутизации, сочетающим адекватность описания и приемлемую сложность расчетов, является решение под технологию Traffic Engineering, что отмечено в работе [24]. При таком подходе сеть описывается в виде графа, а дуги представляют множество каналов связи. Каждый канал связи характеризуется пропускной способностью, а управление происходит распределением потоков данных по каналам связи с условием выполнения предотвращения перегрузки в каналах сети.

В работе [25] предлагается использовать множественный сбор информации (несколько узлов сбора информации) в БСС, для чего предлагается алгоритм LOCL.

В статье [26] предлагаются методы уменьшения потребления энергоресурса узлов и алгоритм их применения для увеличения времени жизни беспроводных сенсорных сетей с избыточным количеством узлов. В предлагаемом методе уменьшение объема данных осуществляется за счет создания на отдельных узлах сети по команде шлюза динамических очередей передачи

данных с заданными характеристиками: максимальная длина очереди передачи и ограничение передачи сообщений в единицу времени.

Модель управления потоками измерительной информации датчиков в беспроводных сенсорных сетях приводится в работе [27]. В работе [28] рассматривается комплекс программного обеспечения для сбора и детектирования событий в БСС с многомерным потоком данных. Принцип разделения потоков похож на представленный в работе [13], только в качестве критерия разделения используется вид передаваемой информации (зависит от типа сенсора, установленного на узле). Похожий способ управления передачей данных в беспроводной сенсорной сети, основанный на использовании отношений консенсуса для назначения приоритетов передаваемым данным, рассмотрен в работе [29]. Описана статистическая аналитическая модель для анализа поведения предложенного протокола передачи в условиях ограниченной пропускной способности сети, позволяющая обеспечить на необходимом уровне качество передачи измерительных данных.

В работе [30] описывается предлагаемый алгоритм маршрутизации для беспроводной сенсорной сети, который при своей простоте является робастным и адекватным при изменяющихся условиях для небольшого фрагмента сети.

Алгоритм дерева Штайнера для оптимизации маршрутов передачи данных можно применять для древовидной БСС [31], в качестве критерия оптимальности берется энергопотребление. Для иерархических моделей, в качестве критерия оптимизации маршрута можно применить трастовую оценку, овальную кривую криптографии (elliptic curve cryptography – ECC), серый анализ актуальности (grey relevance analysis) [32].

Одним из самых известных алгоритмов, обеспечивающих функционирование сенсорных сетей, является алгоритм LEACH (Low Energy Adaptive Cluster Hierarchy). Алгоритм LEACH предусматривает вероятностный выбор сенсорного узла на роль головного в начале функционирования сенсорной сети, а впоследствии – ротацию на основе энергетических характеристик сенсорных узлов. В работе [33] представлен алгоритм ED-LEACH, который пытается улучшить LEACH с целью повышения QoS, при этом в качестве критериев рассматривается дистанция до координатора, дистанция до центра зоны покрытия, ну и конечно энергия узла, как и в алгоритме LEACH.

Вопросы безопасности при информационном обмене в БСС также актуальны. С этой целью в работе [34] предложен метод обнаружения вредоносного узла с помощью двойного порогового детектирования.

Алгоритм асинхронного управления потоком рассмотрен в работе [35], который базируется на двойном методе декомпозиции Лагранжа для решения оптимизации путем разбиения проблемы на несколько. В качестве критериев для работы алгоритма рассматривается вопрос времени жизни узла сети, а также цена на организацию коммуникационного взаимодействия. В результате работы алгоритма мы получаем оценку для каждой передачи, а именно оценку веса взаимодействия, а также корреляционную оценку веса между взаимодействием и тратой энергии сети. Похожий асинхронный адаптивный алгоритм, который решает

проблему нахождения максимального потока в БСС рассматривается в работе [36]. Он основан на алгоритме проталкивания предпотока и использует местоположение узлов, а также уровень радиосигнала от узлов для нахождения начального градиента. Начальный градиент формирует значения, которые называются «высоты» узлов по которым дальше происходит управление информационным потоком в БСС.

Как было отмечено ранее, для нахождения оптимального алгоритма управления информационным потоком возможно применить алгоритмическую теорию графов и потоковыми моделями в рамках одного алгоритма. Такая задача была решена в работе [37], где рассматривается кластерная БСС. Вместо классических кластеров вводится понятие кластерные кольца, которые размещены приблизительно на одинаковом расстоянии от узла сбора. Поток пересылается между кластерными кольцами, а не между кластерами. Классическая концепция маршрутизации между кластерами преобразуется в концепцию управления потоком между кластером-кольцом и кластерами, находящимися между такими кластерными кольцами (во внутренней части кольца). Алгоритм управления потоком, названный в работе [37] adaptive flow control algorithm (AFC), сводится к определению оптимального потока до узла БСС, который способен передать нужную информацию координатору сети.

Основным фактором, влияющим на увеличение вероятности нарушения работы беспроводной сенсорной сети, является ограниченность ресурса энергоснабжения узла [38].

Возможны различные подходы, по которым можно оптимизировать сбор информации в БСС [39]. Также установлено, что гибридная модель сбора информации позволяет объединить несколько моделей для решения конкретной задачи работы сети.

В основе бионических алгоритмов лежат идеи самоорганизации и эволюции, которые человек перенимает у природы. Роевой интеллект описывает коллективное поведение децентрализованной самоорганизующейся системы. Рассматривается в теории искусственного интеллекта как метод оптимизации. Использование роевого интеллекта в решении NP-трудных задач рассматривается в привязке к разным прикладным задачам [40]. В работе [41] разработан модифицированный муравьиный алгоритм для оптимальной маршрутизации в сенсорных сетях. Выведена улучшенная формула определения эвристики муравья, что позволило минимизировать энергозатраты при передаче данных между узлами путем поиска минимального маршрута. В работе [42] предложен бионический алгоритм построения структуры самоорганизующейся беспроводной сенсорной сети, основанный на применении муравьиных, пчелиных и генетических алгоритмов. С помощью предлагаемого комбинированного алгоритма оптимизации осуществляется удаление избыточных транзитных узлов с целью получения желаемой структуры БСС.

В результате анализа приведенных литературных данных можно сделать вывод, что для решения задачи построения алгоритма управления информационным потоком в сети БСС можно применить алгоритмическую теорию графов, связанную с поиском кратчайших путей, на основании определенных весов и

критериев, как показано в работах [3, 6, 9, 16], а также потоковые модели, которые рассматривались в работах [22–24, 26, 35, 36]. Возможно также комбинировать эти два подхода, такая возможность в рамках одного алгоритма показана в работе [37]. Для управления потоком и построения сети возможно применить бионические алгоритмы, в основе которых лежит принцип самоорганизации [40–42]. При оптимизации информационного потока следует учитывать загруженность узлов, а также затрачиваемую ими энергию.

3. Цель и задачи исследования

Целью исследования является разработка алгоритма управления и оптимизации информационных потоков в беспроводной сенсорной сети.

Для решения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- определить принцип формирования модели БСС;
- определить факторы, которые влияют на интенсивность информационных потоков;
- разработать алгоритм управления информационным потоком;
- определить критерии, по которым можно провести оптимизацию потока;
- провести модернизацию алгоритма управления и оптимизации потока.

4. Разработка алгоритма управления и оптимизации информационных потоков в беспроводной сенсорной сети

4.1. Принцип формирования модели беспроводной сенсорной сети

Кластеризация является одним из методов уменьшения потребления энергии узлами БСС [18], а также одним из лучших вариантов уменьшения информационного потока [12]. Возможно также применить иные подходы к построению иерархической БСС, например, кластерные кольца [37]. Иерархический принцип построения БСС является, по сути, методом структурной оптимизации [44]. С целью использования преимуществ, присущих таким сетям, представим БСС, как предложено в работе [45] на основе гиперграфа (в частном случае возможно представление в виде мультиграфа):

$$G(\overset{\Theta}{N}), \quad (1)$$

где $\overset{\Theta}{N}$ – множество вершин гиперграфа, является множеством пикосетей (специально объединенное подмножествами узлов БСС), индекс Θ показывает, что это множество является пикосетью; I – множество информационных потоков между пикосетями.

Множество вершин гиперграфа состоит из p -пикосетей, образованных в БСС:

$$\overset{\Theta}{N} = \left\{ \overset{\Theta}{N}_1, \overset{\Theta}{N}_2, \dots, \overset{\Theta}{N}_p \right\}, \quad (2)$$

где p – количество пикосетей в БСС.

Множество ребер гиперграфа является множеством информационных потоков:

$$I = \{I_1, I_2, \dots, I_j\}, \quad (3)$$

где j – количество информационных потоков в БСС, которые возникают между пикосетями.

Представление БСС, описанное выражением (1), приведено на рис. 1.

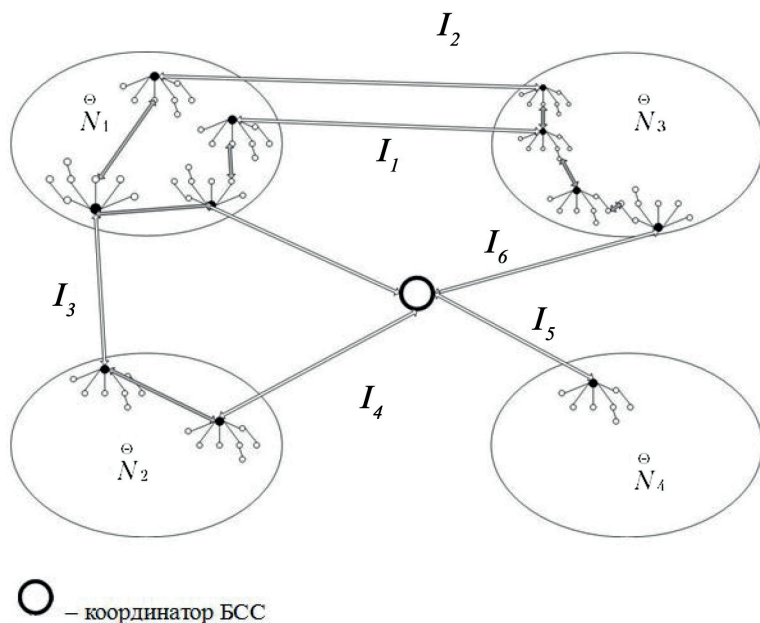


Рис. 1. Графовая модель беспроводной сенсорной сети

Как видно из рис. 1 в качестве узлов графа G выступает пикосеть с внутренней кластеризацией. Такой подход позволяет применить алгоритмическую теорию графов, а также потоковые модели в рамках одного алгоритма.

4. 2. Определение интенсивности информационных потоков

Интенсивность информационных потоков между пикосетями будет зависеть от вида и характера трафика, а также решаемой задачи сбора сетью. В ходе анализа литературы было установлено, что трафик внутри БСС принимает стохастический характер и имеет признаки самоподобия.

Таким образом, интенсивность информационных потоков можно характеризовать как функцию, зависящую от ряда критериев, например для потока I_i :

$$\lambda_i = F(k_1, k_2, \dots, k_n), \quad (4)$$

где λ_i – интенсивность информационного потока; $k_1 - k_n$ – факторы, которые влияют на интенсивность потока λ_i ; n – количество факторов, что влияют на поток I_i .

В выражении (4) факторы, которые влияют на интенсивность потока, могут носить прямой или обратный характер, т. е. уменьшать или увеличивать поток.

В области телекоммуникаций для моделирования случайных процессов прихода заявок до недавнего времени широко использовалось дискретное распределение Пуассона. Такое распределение может подходить, если сенсорный узел работает на основе модели, которая базируется на запросах, анализ такой модели и других приводится в работе [39]. В случае работы узла на основе запросов сам запрос может приходить от нескольких источников [2], а инициируемый таким потоком запросов поток данных от сенсорного узла может иметь распределение Пуассона [46].

Для обеспечения QoS и недопущения перегрузки каналов связи интенсивность потока должна удовлетворять условие:

$$\lambda_k \leq \phi_t, \quad (5)$$

где ϕ_t – пропускная способность канала для t -го тракта передачи; t – номер тракта передачи, k – номер потока.

Одна из проблем изучения трафика БСС заключается в том, что характеристики трафика в таких сетях в значительной мере зависят от приложения или сценария работы БСС [46]. Поэтому определить интенсивность потока без определения модели сбора информации практически невозможно.

С целью унификации разрабатываемого алгоритма управления потоком и для возможности применения многопутевой маршрутизации допустим возможность передачи данных узлом-отправителем из одной пикосети на множество узлов-получателей на пикосети, которая принимает данные, как показано на рис. 2:

$$N_k = \{n_k^1, n_k^2, \dots, n_k^z\}, \quad (6)$$

где N_i – множество узлов-получателей для потока i ; $n_k^1 \dots n_k^z$ – принимающие узлы; z – количество узлов-получателей связанное с потоком I_k .

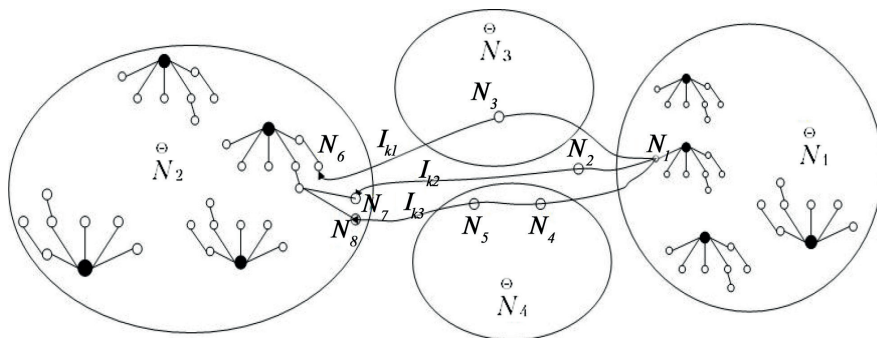


Рис. 2. Многопутевая маршрутизация с одной пикосети в другую

Как показано на рис. 2 передача данных из пикосети N_1 (узел N_1) проходит тремя разными маршрутами на узлы получатели N_6, N_7, N_8 в пикосети N_2 . Марш-

руты потока I_k проходят через пикосети $N_3^{\Theta}, N_4^{\Theta}$, а также узел N_2 , который еще не вошел ни в одну пикосеть.

4.3. Разработка алгоритма управления информационным потоком

Информационные потоки, которые приходят на пикосеть N_k^{Θ} можно представить в виде матрицы $\|P_k\|$:

$$P_k = \left\| \begin{array}{cccc} i_{11} & i_{12} & \dots & i_{1m} \\ i_{21} & i_{22} & \dots & i_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ i_{n1} & i_{n2} & \dots & i_{nm} \end{array} \right\| \quad I_1, I_2, \dots, I_n, \quad (7)$$

где n – количество потоков, что приходят на пикосеть N_k^{Θ} ; $V \in (1, m)$ – необходимое количество передач для потоков $I_1 - I_n$, количество столбцов равно количеству передач m .

Обращая внимание на то, что разные потоки информации требуют выполнения разного количества времени на обслуживание, введем матрицу – столбец $\|T\|$, которая показывает, сколько времени необходимо на выполнение n -го потока:

$$T = \left\| \begin{array}{c} t_1 \\ \dots \\ t_n \end{array} \right\|, \quad (8)$$

где t_n – время на выполнения n -го потока.

Узлы беспроводных сенсорных сетей имеют память [2, 38], которую предлагается использовать для создания буфера собираемой информации. Как известно из проведенных анализов энергопотребления узла БСС [1, 38], основная часть энергии источника питания тратится узлом на прием и передачу данных, а не на ее обработку. Поэтому предложение создания буфера собираемой информации является оправданным с точки зрения уменьшения энергозатрат узла БСС, актуальность чего подчеркивалась в работах [13, 20, 26, 31, 38].

Для оптимизации отправки пакетов и управления потоком данных предлагается адаптивный алгоритм управления работой приемопередатчика узла БСС.

Рассмотрим возможные факторы, которые влияют на длительность работы приемопередатчика:

- модель сбора информации определяет временные интервалы для информационного обмена [39];
- принимающий узел занят обработкой другого потока;
- узел находится в стадии конфигурации сети;
- объем передаваемых данных;

- пропускная способность канала;
- удаленность узла-получателя и др.

Предлагается ввести понятие «Утро», «День», «Вечер», «Ночь» для алгоритма. «День» – состояние, когда узел может передать данные, означает, что узел-приемник может принять эти данные. «Ночь» – узел-получатель не может принять данные, так как возможно занят приемом других данных, узлу-отправителю запрещается передавать данные. «Вечер» – узлу-получателю пришла новая заявка или он уходит в «спящий» режим. «Утро» – узел-отправитель собрал необходимые данные и готов их передать.

С учётом введённых понятий алгоритм управления передатчиком приведен на рис. 3.

Классическим способом синхронизации потоков в вычислительных ядрах процессоров является использование семафоров, частным случаем семафоров являются мьютексы [43]. Этот метод предлагается использовать и для БСС с целью ограничения доступа к некоторым узлам, в первом случае – с заданным количеством потоков, во втором – к узлам, принимающим аварийную сигнализацию, которая должна передаваться с минимальными задержками и потерями. Как и в классическом случае [43], предлагается использовать семафоры со счетчиками, если некоторые узлы выделяются из множества идентичных. При инициализации такого семафора в его счетчике указывается число обслуживающих потоков S . Каждая операция «ожидания» уменьшает значения счетчика семафора на 1, показывая, что некоторому потоку выделен один ресурс из возможного количества обслуживающих потоков.

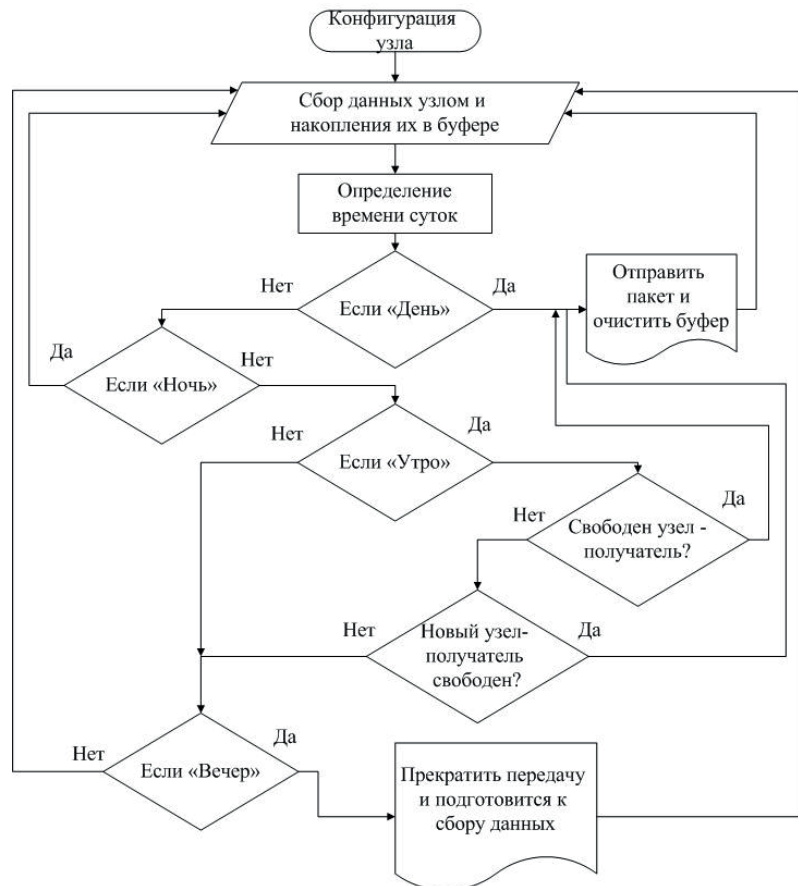


Рис. 3. Алгоритм управления передачей данных для узла БСС

4. 4. Критерии оптимизации информационного потока

Протоколы маршрутизации – как дистанционно-векторные, что основаны на Distance Vector Algorithm (DVA), так и состояние связей, что основаны на Link State Algorithm (LSA), определяют для трафика, направленного в конкретную пикосеть, кратчайший маршрут в соответствии с некоторой метрикой. В качестве метрики в классических телекоммуникационных сетях (ТКС) рассматривают номинальную пропускную способность каналов связи, задержки на промежуточных узлах. В БСС для метрики используют: уровень заряда источников питания узлов [16, 31], низкую задержку [21], трастовую оценку [32].

В ходе анализа литературы было отмечено, что в БСС характеристики трафика, а следовательно и информационных потоков в значительной мере зависят от модели сбора информации [39] или сценария работы БСС [46]. Поэтому с целью выбора критериев оптимизации информационного потока в БСС предлагается использовать матрицу критериев, которая строится для каждого набора потоков между пикосетями:

$$H_{\mu,\eta} = \left\| \begin{matrix} \xi_{11} \cdot k_{11} & \xi_{12} \cdot k_{12} & \dots & \xi_{1m} \cdot k_{1m} \\ \xi_{21} \cdot k_{11} & \xi_{22} \cdot k_{12} & \dots & \xi_{2m} \cdot k_{1m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \xi_{n1} \cdot k_{11} & \xi_{n2} \cdot k_{12} & \dots & \xi_{nm} \cdot k_{nm} \end{matrix} \right\| I_1, I_2, \dots, I_n, \quad (9)$$

где ξ_{nm} – весовой коэффициент влияния фактора k_{nm} в информационном потоке I_n между пикосетями μ и η .

Оптимизационная задача по совокупности критериев, что влияют на поток, может быть решена при помощи целевой функции, предложенной как для векторной оптимизации, так и на основе генетических алгоритмов, которые являются популярным методом решения сложных оптимизационных задач [40] и не являются предметом исследования в данной работе.

4. 5. Модернизация алгоритмов управления информационным потоком с целью их оптимизации

Для оптимизации управления информационным потоком предлагается использовать муравьиный алгоритм, классическая реализация которого рассматривалась в работе [42], а модифицированная версия – в работе [41].

В классическом варианте муравьиный алгоритм предложил Marco Dorigo в 1992 году для поиска оптимального пути в графе. Как отмечено в работе [41], на сегодняшний день существует пять основных модификаций муравьиного алгоритма Elitist Ant System, Ant-Q, Ant Colony System, Max-min Ant System, ASrank. Усовершенствования муравьиного алгоритма связаны с большим использованием истории поиска и более тщательным исследованием областей вокруг уже найденных удачных решений или с введением «элитных муравьев», новых механизмов выделения и испарения. Как отмечено в работе [41], на данный момент отсутствует универсальный алгоритм передачи данных, который сразу бы от конечного устройства направленно посылал пакет к координатору сети.

Методы генетических алгоритмов (муравьиного, алгоритма роя частиц) относятся к одному классу

методов эволюционной оптимизации. Особенностью этих методов является высокая сходимость.

Муравьиные алгоритмы подходят для реактивных протоколов маршрутизации, где маршруты существуют только тогда, когда они необходимы, то есть когда по ним ведется передача данных. Данный метод соотносится с введенным нами алгоритмом управления передачей данных для узла БСС.

Реактивный протокол работает следующим образом: при необходимости передать данные, узел-источник начинает широковещательную рассылку сообщения. Обработав ее, промежуточные узлы добавляют маршрут к узлу-источнику (обратный маршрут), и продолжают его широковещательную рассылку. Когда сообщение доходит до узла назначения, он формирует сообщение-подтверждение и отправляет его по уже сформированному обратному маршруту. На основе метода и с применением муравьиного алгоритма реализован Ant-based Routing Algorithm (ARA).

Для того, чтобы построить муравьиный алгоритм, необходимо [41, 42]:

- представить сеть в виде набора неориентированных взвешенных графов, по которым муравьи могут строить решения;
- определить значение следа феромона;
- определить эвристику поведения муравья во время построения решения;
- установить, возможен ли локальный поиск;
- опытным путем настроить параметры муравьиного алгоритма;
- также, в нашем случае, определить, какие пикосети будут принимать участие в алгоритме.

Муравей будет двигаться от узла i до узла j , используя вероятностно-пропорциональное правило с вероятностью [47]:

$$P_{i,j} = \frac{\tau_{i,j}^\alpha \left(\frac{1}{w_{i,j}}\right)^\beta}{\sum_{j \in M} \tau_{i,j}^\alpha \left(\frac{1}{w_{i,j}}\right)^\beta}, \quad (10)$$

где $\tau_{i,j}$ – количество феромонов на ребре от узла i до узла j ; $w_{i,j}$ – расстояние между узлами i и j ; M – множество узлов, которые можно посетить муравью; α – коэффициент, контролирующий влияние количества феромонов $\tau_{i,j}$; β – коэффициент, контролирующий расстояние между узлами i и j на выбор муравья.

Если в выражении (10) $\alpha = 0$, то будет выбран ближайший узел, что соответствует жадному алгоритму в классической теории оптимизации. Если $\beta = 0$, тогда работает лишь феромонное усиление, что влечет за собой быстрое вырождение маршрутов к одному субоптимальному решению.

После того, как муравей k успешно проходит маршрут по узлам, он оставляет на всех пройденных ребрах след феромонов, обратно пропорциональный длине пройденного пути:

$$\Delta\tau_{i,j,k} = \begin{cases} \frac{\chi}{L_k}, (i,j) \in T_k, \\ 0, (i,j) \notin T_k, \end{cases} \quad (11)$$

где χ – регулируемый параметр; k – муравей под номером k ; L_k – длина пути, пройденная муравьем k ; $\Delta\tau_{ij,k}$ – количество отложенного феромона муравьем k .

Обновление феромонов в классическом случае происходит по правилу:

$$\tau_{ij} = (1-p)\tau_{ij} + \Delta\tau_{ij}, \quad (12)$$

где p – скорость испарения феромона; τ_{ij} – количество феромонов на ребре от узла i до узла j .

В муравьиный алгоритм введем принцип семафора с тремя состояниями. Пусть узел j БСС передает аварийную сигнализацию, тогда муравей не может на него пойти – семафор «Красный», а муравей не прокладывает по этой дуге феромон. В случае обслуживания узлом потока семафор – «Желтый», муравей может пойти, и отложить феромон, но с меньшим коэффициентом. В случае отсутствия обслуживания потока семафор – «Зелёный», муравей применяет классический метод.

Введем в формулу (10) предложенный принцип семафора:

$$P_{ij} = \frac{\tau_{ij}^{\alpha} \left(\frac{1}{w_{ij}} \right)^{\beta}}{\sum_{j \in M} \tau_{ij}^{\alpha} \left(\frac{1}{w_{ij}} \right)^{\beta}} S, \quad (13)$$

где S – состояние семафора.

Семафор принимает значения:

$$S=0, \text{ при «Красном» сигнале;} \quad (14)$$

$$S=1, \text{ при «Зелёном», сигнале;} \quad (15)$$

$$0 < S < 1, \text{ при «Желтом» сигнале.} \quad (16)$$

Предложенный принцип работы муравьиного алгоритма позволяет организовать передачу аварийной информации, которая должна передаваться с наивысшим приоритетом.

Идею разработанного алгоритма управления передачей данных для узла БСС с целью оптимизации можно также переложить на муравьиный алгоритм. Пусть муравьи проводят исследования в сети только «Днем». «Утром» идёт процесс обновления феромонов (12). В режимах «Вечер» и «Ночь» исследования сети не проводятся. Если использовать локальное время для каждой пикосети N_p , то получается, что в разных сегментах сети, процесс обновления феромонов будет рассинхронизирован. Такой подход можно использовать в случае, когда пикосеть представляет собой достаточно большую сеть, так как муравьиные алгоритмы эффективны при on-line оптимизации процессов в распределенных нестационарных системах, которыми есть трафик в сетях.

Муравьиные алгоритмы серьезно исследуются европейскими учеными с середины 90-х годов [47]. С целью сокращения временных затрат и ресурсоемкости существующих способов автоматического выбора маршрута в сетях сбора информации в последнее время актуальность получило научное направление

Natural Computing – «природные вычисления» [40–42], а также для проектирования любых нечетких систем [48]. Предложенные два подхода для модификации муравьиного алгоритма позволяют учесть спецификацию Y.1541 [49], которая определяет приоритет обслуживания, и соответственно обеспечить QoS для БСС.

5. Результаты разработки алгоритма управления и оптимизации информационных потоков в беспроводной сенсорной сети

Для изучения маршрутов передачи данных в беспроводных сенсорных сетях все чаще применяют Natural Computing – «природные вычисления». Идея муравьиного алгоритма, который используется в данной работе, основывается на моделировании поведения муравьёв. В природе они обладают способностью быстро находить кратчайший путь от муравейника к источнику пищи и адаптироваться к изменяющимся условиям, находя новый кратчайший путь.

В результате проведённых исследований разработан алгоритм управления передачей данных для узла БСС, основанный на временном разделении.

Метод семафоров предлагается использовать для БСС с целью ограничения доступа к некоторым узлам, в первом случае – с заданным количеством потоков, во втором – к узлам, принимающим аварийную сигнализацию, которая должна передаваться с минимальными задержками и потерями.

Для оптимизации информационных потоков в беспроводных сенсорных сетях можно применять как алгоритмическую теорию графов, так и потоковые модели.

С целью выбора критериев оптимизации информационного потока в БСС предлагается использовать матрицу критериев, которая строится для каждого набора потоков между пикосетями.

Для использования преимуществ, присущих сетям с кластеризацией, выбрано представление БСС на основе гиперграфа [45].

Для муравьиного алгоритма предлагается два подхода по его модификации.

Первый подход основывается на алгоритме управления передачей данных для узла БСС, рис. 3. Второй – предлагает ввести принцип семафора (13), рис. 4.

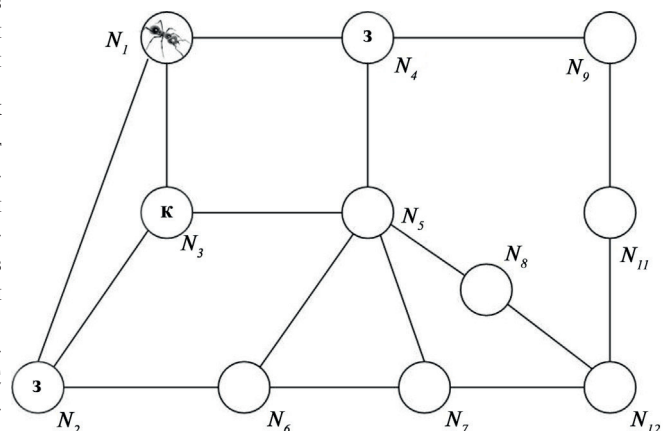


Рис. 4. Работа муравьиного алгоритма с применением семафоров

Как видно из рис. 4, у муравья, который находится на узле N_1 , есть возможность пойти только на узлы N_2 и N_4 , где горит «Зелёный», в то время как узел N_3 обслуживает узел с высоким приоритетом.

6. Обсуждение результатов разработки алгоритма управления и оптимизации информационных потоков в беспроводной сенсорной сети

Возможности использования беспроводных сенсорных сетей простираются во многие сферы деятельности. Проведено много исследований по некоторым важным особенностям работы беспроводных сенсорных сетей, таким как: сохранение энергии и позиционирование узлов, кластеризация сети, составление модели сбора информации. В данной работе рассматривался вопрос разработки алгоритмов управления информационным потоком внутри сети, а также проведения оптимизации такого потока.

Предложенный муравьиный алгоритм с использованием семафоров может применяться не только для задач оптимизации маршрутизации и оптимизации трафика, но и для других задач с большими размерностями областей поиска. Муравьиные алгоритмы хорошо подходят для применения вместе с процедурами локального поиска, позволяя быстро находить начальные точки для них.

Проведение имитационного эксперимента с предложенными алгоритмами предполагается одним из программных средств имитационного моделирования, или системы MATLAB [48].

Для направленной маршрутизации можно применять муравьиный алгоритм, который предложен в работе [41].

Проведённый анализ литературных источников будет полезен для исследователей БСС, которые занимаются разными аспектами их функционирования.

Другие результаты работы в виде алгоритма управления потоком данных узла, критерии оптимизации в

виде матрицы, алгоритмы на базе муравьиных могут применяться при проектировании и разработке БСС.

7. Выводы

В статье предложен принцип формирования модели БСС, основанный на разбиении сети на пикосети, который описывается при помощи гиперграфа, что дает возможность использования преимуществ, характерных для кластеризации.

Учитывая, что характеристики трафика сенсорной сети зависят от модели сбора информации [39] и сценария работы БСС [46], предлагается определять факторы, которые влияют на интенсивность информационных потоков, используя матрицу критериев. В работе также разработан алгоритм управления информационным потоком для узла сети. Выявлено, что в качестве критерия, по которому необходимо проводить оптимизацию потока, может быть целевая функция минимизации энергопотребления с использованием матрицы критериев. Как отмечено в анализе литературы [13, 20, 26, 31, 38], минимизация энергопотребления – один из самых актуальных и фундаментальных вопросов работы БСС. Для муравьиного алгоритма предлагается два подхода по его модификации. Один – на основе алгоритма управления передачей данных для узла БСС и дополнительно использования буфера на узле. Вторая модификация предлагает ввести принцип семафора. Две модификации могут рассматриваться как отдельные модифицированные муравьиные алгоритмы.

8. Благодарности

Выражаю благодарность своей семье за поддержку при написании статьи, а также компании Texas Instruments за поддержку исследований беспроводных сенсорных сетей в рамках European University Program.

Литература

1. Восков, Л. С. Повышение качества обслуживания в беспроводных стационарных сенсорных сетях с автономными источниками питания [Текст] / Л. С. Восков, М. М. Комаров // Качество. Инновации. Образование. – 2012. – № 1 (80). – С. 51–55.
2. Ермошкина, Д. Д. Классификация беспроводных сенсорных сетей по видам нагрузки [Текст] / А. Е. Кучерявый, Д. Д. Ермошкина // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2011. – Т. 5, № 7. – С. 64–65.
3. Kudryashov, S. V. Optimal routing of data flows in wireless sensor networks [Текст] / S. V. Kudryashov // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2008. – Vol. 47, Issue 2. – P. 282–295. doi: 10.1134/s1064230708020159
4. Акимов, А. А. Системы поддержки принятия решений на базе беспроводных сенсорных сетей с использованием интеллектуального анализа данных [Текст] / А. А. Акимов, В. Е. Богатырев, А. Г. Финогеев // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». – 2010. – № 1. – С. 225–229. – Режим доступа: <http://elibrary.ru/download/71795022.pdf>
5. Крутолапов, А. С. Обеспечение качества обслуживания в сетях информационного обмена [Текст] / А. С. Крутолапов // Вестник ВИ ГПС МЧС России. – 2013. – № 1. – С. 18–22. – Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/obespechenie-kachestva-obsluzhivaniya-v-setyah-informatsionnogo-obmena>
6. Anitha, C. L. Comparative Analysis of Data Aggregation Algorithms Under Various Architectural Models in Wireless Sensor Networks [Text] / C. L. Anitha, R. Sumathi // BIJIT-BVICAM's International Journal of Information Technology. – 2014. – Vol. 6, Issue 2. – P. 757–763. – Available at: <http://bvica.ac.in/bijit/downloads/pdf/issue12/05.pdf>
7. Грицюк, В. И. Модифицированные устойчивые методы выбора модели [Текст] / В. И. Грицюк // Вісник НТУ «ХПІ». – 2013. – № 8 (982). – С. 25–28. – Режим доступа: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/5129>

8. Борисенко, А. С. Моделирование и расчет антенн для Zigbee сетей [Текст] / А. С. Борисенко // Вісник Національного технічного університету ХПІ. Збірник наукових праць. Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – 2013. – № 37 (1010). – С. 17–26. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/j-pdf/vcpimm_2013_37_5.pdf
9. Борисенко, А. С. Методы оптимизации для mesh сети в ZigBee [Текст] / А. С. Борисенко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 1, № 9 (61). – С. 24–29. – Режим доступа: URL: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/9497/8265>
10. Агеев, Д. В. Синтез наложенных телекоммуникационных сетей с учетом единиц данных и применением многослойного графа [Текст] / Д. В. Агеев // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 4, № 9(64). – С. 49–51. – Режим доступа: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/16393/13894>
11. Chuang, P.-J. Effective neural network-based node localisation scheme for wireless sensor networks [Text] / P.-J. Chuang, Y.-J. Jiang // Wireless Sensor Systems, IET. – 2014. – Vol. 4, Issue 2. – P. 97–103. doi: 10.1049/iet-wss.2013.0055
12. Kumar, D. Performance analysis of energy efficient clustering protocols for maximising lifetime of wireless sensor networks [Text] / D. Kumar // Wireless Sensor Systems, IET. – 2014. – Vol. 4, Issue 1. – P. 9–16. doi: 10.1049/iet-wss.2012.0150
13. Muhammad, A. K. An Energy Efficient Color Based Topology Control Algorithm for Wireless Sensor Networks [Text] / A. K. Muhammad, K. Asfandiyar, K. S. Said, A. Azween // Wireless Sensor Networks. – 2013. – Vol. 5, Issue 1. doi: 10.4236/wsn.2013.51001
14. Khosravi, H. Optimal Node Scheduling for Desired Percentage of Coverage in Wireless Sensor Networks [Text] / H. Khosravi // Wireless Sensor Networks. – 2012. – Vol. 4, Issue 5. – P. 127–132. doi: 10.4236/wsn.2012.45018
15. Sudha, M. N. Minimization of Collision in Energy Constrained Wireless Sensor Network [Text] / M. N. Sudha, M. L. Valarmathi, G. Rajsekar, M. K. Mathew, N. Dineshraj, S. Rajbarath // Wireless Sensor Networks. – 2009. – Vol. 1, Issue 4. – P. 350–357. doi: 10.4236/wsn.2009.14043
16. Dâmaso, A. Reliability of Wireless Sensor Networks [Text] / A. Dâmaso, N. Rosa, P. Maciel // Sensors. – 2014. – Vol. 14, Issue 9. – P. 15760–15785. doi: 10.3390/s140915760
17. Hong, S.-H. Localization algorithm in wireless sensor networks with network mobility [Text] / S.-H. Hong, B.-K. Kim, D.-S. Eom // IEEE Transactions on Consumer Electronics. – 2010. – Vol. 55, Issue 4. – P. 1921–1928. doi: 10.1109/TCE.2009.5373751
18. Ha, I. An Energy-Efficient Data Collection Method for Wireless Multimedia Sensor Network [Text] / I. Ha, M. Djuraev, B. Ahn // International Journal of Distributed Sensor Networks. – 2014. – Vol. 2014. – P. 1–8. doi: 10.1155/2014/698452
19. Zhang, J. Energy-Efficient Policy Based on Cross-Layer Cooperation in Wireless Communication [Text] / J. Zhang, H. Jiang, H. Jiang, C. Chen // International Journal of Distributed Sensor Networks. – 2014. – Vol. 2014. – P. 1–11 doi: 10.1155/2014/831686
20. Zhong, X. Energy-Efficient Wireless Packet Scheduling with Quality of Service Control [Text] / X. Zhong, C.-Z. Xu // Mobile Computing, IEEE Transactions on. – 2007. – Vol. 6, Issue 10. – P. 1158–1170. doi: 10.1109/TMC.2007.1012
21. Rehman, R. A. L2ER: Low-Latency and Energy-Based Routing Protocol for Cognitive Radio Ad Hoc Networks [Text] / R. A. Rehman, B.-S. Kim // International Journal of Distributed Sensor Networks. – 2014. – Vol. 2014. – P. 1–9. doi: 10.1155/2014/963202
22. Лемешко, А. В. Особенности математического описания процессов многоадресной маршрутизации потоковыми моделями [Текст] / А. В. Лемешко, А. Кинан // Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. – 2014. – № 1. – С. 94–98. – Режим доступа: http://skf-mtusi.ru/fileadmin/page_res/nr/sb2014-1.pdf
23. Лемешко, А. В. Результаты исследования тензорной модели многопутевой маршрутизации с обеспечением качества обслуживания в телекоммуникационных сетях [Текст] / А. В. Лемешко, О. Ю. Евсеева, С. В. Гаркуша // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2013. – Т. 13, № 4. – С. 38–54.
24. Лемешко, А. В. Усовершенствование потоковой модели многопутевой маршрутизации на основе балансировки нагрузки [Текст] / А. В. Лемешко, Т. В. Вавенко // Проблемы телекоммуникаций. – 2012. – № 1 (6). – С. 12–29. – Режим доступа: http://pt.journal.kh.ua/2012/1/1/121_lemeshko_multipath.pdf
25. Shah-Mansouri, V. Lexicographically Optimal Routing for Wireless Sensor Networks With Multiple Sinks [Text] / V. Shah-Mansouri, A. H. Mohsenian-Rad, V. W. S. Wong // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2009. – Vol. 58, Issue 3. – P. 1490–1500. doi: 10.1109/TVT.2008.928898
26. Коваленко, И. Г. Методы увеличения продолжительности функционирования беспроводных сенсорных сетей с избыточным количеством узлов [Текст] / И. Г. Коваленко // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2014. – № 1. – С. 44–54. – Режим доступа: http://www.dut.edu.ua/uploads/p_130_10609916.pdf#page=44
27. Русаков, А. М. Модель управления потоками измерительной информации датчиков в беспроводных сенсорных сетях [Текст] / А. М. Русаков // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2010. – № 4. – С. 37–39.
28. Пойда, А. А. Распределенное детектирование событий в многомерных потоках данных в беспроводных сенсорных сетях [Текст] / А. А. Пойда, М. Н. Жижин, Д. П. Медведев, А. Е. Москвитин, А. В. Андреев // Механика, управление и информатика. – 2011. – № 5. – С. 162–182.
29. Муравьев, С. В. Передача данных в беспроводных сенсорных сетях с приоритетами на основе агрегирования предпочтений [Текст] / С. В. Муравьев, Е. В. Тараканов // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320, № 5. – С. 111–116.

30. Новоселов, С. П. Метод построения таблицы маршрутизации для беспроводной сенсорной сети [Текст] / С. П. Новоселов, Е. В. Рак // Технологический аудит и резервы производства. – 2013. – Т. 2, № 1(10). – С. 42–44. – Режим доступа: <http://journals.urau.ru/tarp/article/view/12958/10847>
31. Zou, P. Low energy WSN data aggregation algorithm based on improved aggregation tree model [Text] / P. Zou, Y. Liu // International Journal of Sensor Networks. – 2014. – Vol. 15, Issue 3. – P. 149–156. doi: 10.1504/ijsn.2014.063895
32. Xiao P. A new trusted roaming protocol in wireless mesh networks [Text] / P. Xiao, J. He, Y. Chen, Y. Fu // International Journal of Sensor Networks. – 2013. – Vol. 14, Issue 2. – P. 109–119. doi: 10.1504/IJSNET.2013.056610
33. Fard, E. S. Routing Protocol of Wireless Sensor Network (ED-LEACH) [Text] / E. S. Fard, M. H. Nadimi // International Journal of Sensors and Sensor Networks. – 2014. – Vol. 2, Issue 3. – P. 26–30.
34. Lim, S. Y. Malicious Node Detection Using a Dual Threshold in Wireless Sensor Networks [Text] / S. Y. Lim, Y.-H. Choi // Journal of Sensor and Actuator Networks. – 2013. – Vol. 2, Issue 1. – P. 70–84. doi: 10.3390/jsan2010070
35. Chen, J. Utility-based asynchronous flow control algorithm for wireless sensor networks [Text] / J. Chen, W. Xu, S. He, Y. Sun, P. Thulasiraman, X. Shen // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2010. – Vol. 28, Issue 7. – P. 1116–1126. doi: 10.1109/jsac.2010.100916
36. Homayounnejad, S. AAA: Asynchronous Adaptive Algorithm to solve Max-Flow Problem in wireless sensor networks [Text] / S. Homayounnejad, A. Bagheri, A. Ghebleh // MIPRO, 2011 Proceedings of the 34th International Convention. – Opatija. IEEE, 2011. – P. 440–445.
37. Moon, S.-H. Energy-efficient flow control and routing for clustered wireless sensor networks [Text] / S.-H. Moon, S.-J. Han, S. Park // The International Conference on Information Networking (ICOIN), 2013. – P. 83–88. doi: 10.1109/ico.2013.6496356
38. Галкин, П. В. Анализ энергопотребления узлов беспроводных сенсорных сетей [Текст] / П. В. Галкин // ScienceRise. – 2014. – № 2 (2). – С. 55–61. doi: 10.15587/2313-8416.2014.27246
39. Галкин П. В. Аналіз моделей та оптимізації збору інформації в бездротових сенсорних мережах [Текст] / П. В. Галкин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – Т. 5, № 9 (71). – С. 24–30. doi: 10.15587/1729-4061.2014.28008
40. Курейчик, В. М. Использование роевого интеллекта в решении NP-трудных задач [Текст] / В. М. Курейчик, А. А. Кажаров // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 7. – С. 30–36.
41. Коваленко, А. М. Разработка алгоритма направленной маршрутизации для беспроводных сенсорных сетей. [Текст] / А. М. Коваленко, В. А. Дидук, Е. Г. Трофименко // Труды Одесского политехнического университета. – 2011. – Вып. 1 (35). – С. 151–154.
42. Мочалов, В. А. Гибридный биконический алгоритм синтеза структуры беспроводной сенсорной сети [Текст] / В. А. Мочалов // Т-COMM: Телекоммуникации и транспорт. – 2013. – Т. 7, № 10. – С. 72–77.
43. Путря, Ф. М. Аппаратные методы синхронизации потоков в многоядерном вычислительном кластере [Текст] / Ф. М. Путря, И. А. Медведев // Всероссийская научно-техническая конференция "Проблемы разработки перспективных микро- и нано-электронных систем (МЭС)". Сборник трудов. – 2010. – № 1. – С. 346–351.
44. Галкин, П. В. Повышение эффективности сбора информации в беспроводных сенсорных сетях [Текст] : сб. науч. тр. / П. В. Галкин // Экономика, наука производство. – Москва: Издательство «Московский государственный открытый университет им. В. С. Черномырдина», 2011. – С. 42–44.
45. Галкин, П. В. Модель беспроводной сенсорной сети на основе гиперграфа [Текст] : сб. матер. фор. / П. В. Галкин // 17-й Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». Т. 4. – Харьков: ХНУРЕ, 2013. – С. 71–72.
46. Выборнова, А. И. Исследование характеристик трафика в беспроводных сенсорных сетях [Текст] : дис. ... к. т. н.: 05.13.15 / А. И. Выборнова. – Санкт-Петербург, 2014. – 183 с.
47. Dorigo, M. Ant Colony Optimization [Текст] / M. Dorigo, T. Stützle. – Cambridge, MA: MIT Press, 2004. – 321 p.
48. Штовба, С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB [Текст] / С. Д. Штовба. – М.: Горячая линия–Телеком, 2007. – 288 с.
49. Recommendation Y1541 Network performance objectives for IP-based services [Text] / ITU-T, 2011. – P. 1–66.