

АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени «доктора философии» (PhD) по образовательной программе «8D06201 – Радиотехника, электроника и телекоммуникации»

ТУРЛЫКОЖАЕВА ДАНА АБДИКУМАРОВНА

ИНФОРМАЦИОННО-ЭНТРОПИЙНЫЙ МЕТОД МАРШРУТИЗАЦИИ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ

Актуальность работы. В настоящее время WMNs (от англ. Wireless Mesh Networks) представляют собой одну из наиболее значимых и динамично развивающихся технологий связи. Их популярность обусловлена такими ключевыми преимуществами, как простота развертывания, способность к самовосстановлению, самоорганизации, а также высокая экономичность. Благодаря этим характеристикам WMNs обеспечивают устойчивую и гибкую связь в условиях динамических и высоконагруженных сетевых сред, особенно в условиях сложной городской застройки, промышленных предприятий, а также в ситуациях, требующих высокой степени автономности сети.

Несмотря на значительный потенциал WMN, ряд существующих проблем затрудняет их оптимальное функционирование. Динамичная топология сети и постоянно меняющиеся условия канала затрудняют равномерное распределение узлов, что снижает быстродействие маршрутизации и может приводить к неравномерной загрузке. Традиционные алгоритмы маршрутизации испытывают трудности с адаптацией к этим изменениям, что отражается на пропускной способности и надежности связи. Влияние шума и мультипутевого распространения приводит к ошибкам приема сигналов и повышению BER, что негативно отражается на качестве демодуляции.

Для обеспечения надежной и адаптивной работы WMN в условиях динамично меняющейся топологии, переменных характеристик канала, высокого уровня шума и интерференции необходимо разработать инновационные методы, способные решать актуальные проблемы сети. В частности, требуется создание алгоритмов, обеспечивающих достоверный прием сигналов, равномерное распределение узлов для повышения быстродействия, а также выбор маршрутов с высокой пропускной способностью канала и минимизацией BER. Такая потребность обусловлена тем, что традиционные методы маршрутизации не всегда справляются с адаптацией к постоянным изменениям условий передачи, что негативно сказывается на качестве связи. Таким образом, разработка методов автоматической классификации модуляции, кластеризации сети и алгоритма маршрутизации на основе информационной энтропии является необходимой для оптимизации маршрутизации и повышения общей эффективности работы WMN.

Цель работы заключается в оптимизации сети и маршрутизации в WMN посредством разработки инновационных алгоритмов, включая алгоритм классификации типов модуляции для достоверного приема сигналов, CIEA для повышения быстродействия и IERA для улучшения надежности приема и пропускной способности сети.

Задачи исследования:

1. Разработка алгоритма классификации типов модуляций сигналов, направленного на уменьшение ошибок при приеме и повышение производительности маршрутизационных алгоритмов.
2. Разработка алгоритма CIEA основанного на теории 'box covering' для оптимального разделения WMN на кластеры, расчета фрактальной размерности сети и обеспечения быстродействия алгоритма маршрутизации.
3. Создание алгоритма маршрутизации, основанного на теории информационной энтропии (IERA), который строит маршруты на основе максимального значения условной информации пути и пропускной способности в WMNs для повышения скорости передачи данных и уменьшения битовой ошибки.

Методы исследования:

В данной работе используются методы теории графов, информационной теории, численного моделирования, включая NS3 и программную реализацию на Python, а также экспериментальная передача сигнала через MIMO-антенны. Метод 'box covering' из теории графов применяется для разбиения сложных сетей на кластеры, что позволяет анализировать их, оптимизируя процессы маршрутизации. Методы информационной теории сосредоточены на анализе информации, передаваемой через канал связи, что позволяет оценивать пропускную способность и битовую ошибку в сети. Взаимная информация используется как ключевой показатель для достоверной классификации сигналов, обеспечивая устойчивость алгоритма к шуму. Метод численного моделирования (NS3) применяется для тестирования существующих алгоритмов в контролируемых условиях. Он позволяет анализировать влияние параметров сети и сигналов, прогнозировать поведение системы и выявлять оптимальные настройки. Кроме того, проведен реальный эксперимент, включающий передачу сигнала через MIMO-антенны, что является трудоемким процессом, требующим точной настройки аппаратуры и учета физических характеристик канала связи. Полученные реальные сигналы были обработаны с использованием предложенного алгоритма классификации модуляции, что позволило подтвердить его эффективность на практике. Предложенные методы были реализованы на Python, что обеспечило их верификацию в численном моделировании. Для этого использовались библиотеки Python, включая NetworkX для моделирования сетей, NumPy и SciPy для вычислений, а также инструменты визуализации, такие как Matplotlib и Seaborn.

Объекты исследования: беспроводная ячеистая сеть (WMN).

Основные положения, выносимые на защиту

1. Алгоритм классификации модуляции, основанный на теории взаимной информации, обеспечивает корректное определение типа модуляции сложных телекоммуникационных сигналов при низком уровне отношения сигнал/шум (SNR), более чем 5 дБ.

2. Центровключающий эксцентриситетный алгоритм (CIEA), основанный на теории 'box covering' обеспечивает равномерное разделение беспроводной ячеистой сети (WMN) на кластеры по количеству маршрутизаторов (Routers), повышая быстродействие алгоритма маршрутизации на 20 микросекунд при 3280 узлах в сравнении с классическим алгоритмом Dijkstra.

3. Алгоритм маршрутизации (IERA), определяющий максимум условной информации как разность совместной и условной энтропии ансамбля (множества значений принятых сигналов с шумом), в сравнении с классическим алгоритмом Dijkstra обеспечивает повышение пропускной способности WMN на 5 Мбит/с по результатам численного моделирования для 100 узлов.

Научная новизна данной работы заключается в разработке инновационных алгоритмов оптимизации сети и маршрутизации в WMN, учитывающих фрактальные свойства сети, характеристики среды передачи и информационно-энтропийные критерии.

1. Разработанный алгоритм классификации типов модуляций впервые использует взаимную информацию для извлечения статистического признака модулированного сигнала, что позволяет учитывать взаимозависимости между переменными и повышает точность классификации на 50 % по сравнению с НОС-based алгоритмом.

2. Разработанный алгоритм CIEA, основанный на теории 'box covering', впервые использует концепцию эксцентриситета в своей реализации, что позволяет более оптимально покрыть сеть по сравнению с существующими алгоритмами кластеризации GC, OBCA, CBV и MEMB.

3. Разработанный алгоритм маршрутизации IERA впервые строит маршруты на основе максимального значения условной информации пути в WMN, что позволяет оптимизировать скорость передачи данных и снизить вероятность битовой ошибки по сравнению с существующими алгоритмами маршрутизации Dijkstra, ACO, OLSR и AODV.

Теоретическая и практическая значимость работы

Разработанные и реализованные алгоритмы, включая алгоритм классификации типов модуляции сложных сигналов, CIEA и IERA, обладают высокой теоретической и практической значимостью для WMNs. Их теоретическая значимость заключается в том, что они представляют собой инновационные подходы к оптимизации сети и маршрутизации, учитывая такие ключевые аспекты, как равномерное и оптимальное разделение сети на кластеры, вероятности ошибки канала и расположение шлюза. Практическая значимость подтверждается тем, что эти алгоритмы не только разработаны, но

и успешно реализованы в сценариях WMNs, решая конкретные задачи, с которыми сталкиваются операторы сети и конечные пользователи.

Алгоритм CIEA реализует равномерную кластеризацию сети, что способствует улучшению быстродействия алгоритма маршрутизации. В свою очередь, IERA, основанный на теории информационной энтропии, реализует выбор маршрутов с максимальной условной информацией, что повышает надежность передачи данных и снижает битовую ошибку. Доказательством практической применимости и эффективности этих алгоритмов является их успешное внедрение в патент на полезную модель, в рамках которого предложены кластерный маршрутизатор и маршрутизатор, основанный на информационной энтропии.

Личный вклад автора

Все основные результаты, выносимые на защиту, получены соискателем. Личный вклад автора включает проведение обзора литературы, написание и редактирование научных статей, что способствовало структурированию и обоснованию проводимого исследования; разработку и моделирование сетей в среде Python и NS3, что позволяет проводить детальный анализ работы беспроводных сетей и оценивать эффективность предложенных решений, включая задачи кластеризации сети; проведение расчетов фрактальных размерностей, необходимых для изучения топологических характеристик сети и анализа их влияния на процессы маршрутизации; реализацию существующих алгоритмов маршрутизации в Python и NS3 для проведения сравнительного анализа с разработанными методами; участие в разработке, программной реализации и тестировании предложенных алгоритмов, включая оптимизацию параметров и отладку кода; а также проведение эксперимента по получению реальных сигналов ММО для автоматической классификации модуляции, что подтвердило практическую работоспособность метода. Теоретическая часть разрабатывалась под руководством научного руководителя, а расчеты, программная реализация и экспериментальная работа выполнялись автором, при этом постановка задач и обсуждение результатов осуществлялись совместно с научными консультантами.

Достоверность результатов

Достоверность научных выводов работы подтверждается моделированием, численным анализом, экспериментальным анализом, литературными исследованиями, а также обоснованными теоретическими моделями и принципами, применяемыми в области WMNs и маршрутизации. Эти модели включают в себя взаимную информацию, условную информацию и фрактальную размерность, что обеспечивает глубокое понимание структуры сетей и эффективности маршрутизации, а также способствует разработке более совершенных алгоритмов для оптимизации работы WMNs.

Апробация работы

По материалам диссертационной работы опубликовано 8 печатных работ.

Статьи с высоким импакт-фактором по базе данных Thomson Reuters или в изданиях, входящих в международную научную базу данных Scopus:

1. Ussipov N., Akhtanov S., Zhanabaev Z., Turlykozhayeva D., Karibayev B., Namazbayev T., & Tang X. (2024). Automatic modulation classification for MIMO system based on the mutual information feature extraction. *IEEE Access*.

2. Akhtanov S. N., Turlykozhayeva D. A., Ussipov N. M., Ibraimov M. K., Zhanabaev Z. Zh., 2022. Centre including eccentricity algorithm for complex networks. *Electronics Letters*, 58(7), 283-285.

3. Zhanabaev Z., Akhtanov S., Turlykozhayeva D., Ussipov N., & Ibraimov M., (2022). Cluster router based on eccentricity. *Eurasian Physical Technical Journal*, 19(3 (41)), 84-90.

4. Turlykozhayeva D. A., Akhtanov S. N., Ussipov, N. M., Akhmetali A., Bolysbay A., Shabdan, Y., 2023. Routing Algorithm for Software Defined Network Based on Boxcovering Algorithm. In 2023 10th International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM) (pp. 1-5). IEEE.

5. Turlykozhayeva D. A., Akhtanov S. N., Baigaliyeva, A., Temesheva, S., Zhexebay D. M., Zaidyn M. & Skabylov A. (2024). EVALUATING ROUTING ALGORITHMS ACROSS DIFFERENT WIRELESS MESH NETWORK TOPOLOGIES USING NS-3 SIMULATOR. *Eurasian Physical Technical Journal*, 21(2 (48)), 70-82.

6. Turlykozhayeva, D., Waldemar, W., Akhmetali, A., Ussipov, N., Temesheva, S., & Akhtanov, S. (2024). Single Gateway Placement in Wireless Mesh Networks. *Physical Sciences and Technology*, 11(1-2).

7. Turlykozhayeva, D., Ussipov, N., Baigaliyeva, A., Temesheva, S., Bolysbay, A., Abrakhmatova, G., & Akhtanov, S. ROUTING METRIC AND PROTOCOL FOR WIRELESS MESH NETWORK BASED ON INFORMATION ENTROPY THEORY. *Eurasian Physical Technical Journal*. – 2023. – Т. 20. – №. 4 (46). – С. 90-98.

8. Turlykozhayeva, D. A., Akhtanov, S. N., Zhanabaev, Z. Z., Ussipov, N. M., & Akhmetali, A. (2025). A routing algorithm for wireless mesh network based on information entropy theory. *IET Communications*, 19(1), e70011.

Связь темы диссертации с планами научных работ

Диссертационная работа выполнена в соответствии с планами фундаментальных научно-исследовательских работ КН МНВО РК «Грантовое финансирование научных исследований» по теме: «AP19674715 – Маршрутизация беспроводных ‘mesh’ сетей на основе ‘box-covering’ алгоритмов». В рамках данного проекта автор работает научным сотрудником по настоящее время, участвуя в разработке и внедрении алгоритмов оптимизации сети и маршрутизации для WMN.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы и содержит три приложения. Работа изложена на 119 страницах, иллюстрируется 60 рисунками, приведено 46 формулы, 7 таблиц, 125 наименований библиографических источников.