

## **ОТЗЫВ**

### **члена диссертационного совета**

доктора технических наук, профессора Котенко Игоря Витальевича  
на диссертацию Сунь Цюши на тему: «Машинное обучение для оптимизации  
распределения ресурсов в беспроводных системах связи»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по  
специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и  
комплексы программ.

### **Актуальность темы исследования.**

В связи с растущей популярностью компьютеров, мобильных телефонов и планшетов системы мобильной связи играют ключевую роль в обеспечении связи между мобильными устройствами и передатчиками, такими как точки доступа (AP) и базовые станции (BS). За последние несколько десятилетий системы мобильной связи прошли путь от первого поколения (1G) до четвертого поколения (4G), а на очереди - сети связи пятого поколения (5G) и B5G. Достижение эффективной конфигурации системы связи, позволяющего увеличить пропускную способность как минимум в 1000 раз, снизить энергопотребление на несколько порядков и увеличить спектральную эффективность в 10 раз для сетей 5G и за пределами 5G (B5G) по сравнению с 4G, по-прежнему остается сложной задачей. Ресурсы представляют собой пропускную способность, частоту и время в системе беспроводной связи. В системе беспроводной связи количество информации, которое может быть получено приемником, ограничено доступными ресурсами и стратегией распределения ресурсов, реализуемой передатчиком. Различные стратегии распределения ресурсов приводят к разной производительности системы. Эффективная стратегия распределения ресурсов направлена на эффективное выделение ограниченных ресурсов приемнику, что помогает полностью использовать ограниченные ресурсы для оптимальной работы системы. Поэтому очень важно разработать эффективную схему распределения ресурсов. Кроме того, распределение ресурсов должно быть адаптировано к новым технологиям связи, чтобы лучше соответствовать соответствующим требованиям сервисов 5G и B5G.

### **Научная новизна.**

1. Предлагается новый фреймворк глубокого обучения, который использует эвристический алгоритм для создания обучающего набора данных и применяет обучение с учителем для анализа отображения состояния системы на оптимальный вектор распределения мощности. Алгоритм удовлетворяет требованиям беспроводных систем к низкой задержке и по производительности близок к эвристическому алгоритму.

2. Задача распределения ресурсов в беспроводной сети связи представлена как задача оптимизации графа, и предложены модели обучения с учителем и без учителя на основе графовых нейронных сетей. Кроме того, разработан новый

алгоритм GNN для гетерогенных сетей связи с графовой структурой, который основан на двухслойном механизме внимания и может эффективно использовать свойства узлов графов.

3. Предложен гетерогенный мультиагентный алгоритм обучения с подкреплением, основанный на теории среднего поля, который в основном направлен на решение проблем распределения ресурсов и управления помехами в крупномасштабных сверхплотных сетевых системах с гетерогенными агентами.

### **Степень достоверности.**

Исследование Сунь Цюши проведено на основе проведения имитационных экспериментов предложенного алгоритма. Результаты работы были представлены на нескольких российских и международных конференциях и научных семинарах известных научных школ в области математики и вычислительной техники. Основные результаты работы опубликованы в шести статьях, четыре из которых опубликованы в международных журналах в области прикладной математики, вычислительной техники, искусственного интеллекта, индексируемых в Scopus и/или Web of Science. Список журналов: Mathematics (SCI Q2), Applied Intelligence (SCI Q2), Informatics and Automation (Scopus Q3), Vestnik of Saint Petersburg University (Scopus Q2).

### **Теоретическая и практическая значимость работы.**

Диссертационное исследование - теоретически и практически значимо. С практической стороны оптимизация стратегии распределения ресурсов в беспроводных сетях связи позволяет повысить качество и уровень обслуживания сети, помогает операторам связи лучше удовлетворять запросы пользователей, а также снижает стоимость оборудования для повышения экономической эффективности и конкурентоспособности рынка. С теоретической стороны, данное исследование позволяет улучшить существующие алгоритмы и предоставляет новые алгоритмы оптимизации для сложных систем связи, сходимости и устойчивости алгоритмов проверена с помощью математических доказательств, анализа сложности и экспериментов, что обеспечивает прочную основу для дальнейших научных исследований.

### **Содержание работы.**

Диссертация состоит из пяти глав, введения и заключения. Во вводной главе подробно описана мотивация, основной вклад и методология работы.

Глава 1 посвящена однородным сотовым сетям, для которых решается невыпуклая NP-трудная задача управления мощностью системы, для поиска приближенных к оптимальным решениям используются эвристические алгоритмы. Приводится сравнение производительности классических эвристических алгоритмов с целью выбора оптимального эвристического алгоритма. Дается оценка эффективности предложенных алгоритмов машинного обучения.

Главы 2 и 3 посвящены проблеме распределения мощности в однородных сетях Device-to-Device (D2D), и предлагается алгоритмический фреймворк, сочетающий глубокое обучение и эвристики. Фреймворк позволяет напрямую

обучать отображению состояний канала на оптимальные векторы распределения мощности, что относится к подходу сквозного обучения, при котором метки обучающего множества генерируются эвристическими алгоритмами на случайных реализациях сети. В качестве нейросетевых структур для обучения параметров модели используются глубокие нейронные сети (Deep Neural Networks, DNN) (гл. 2) и графовые нейронные сети (Graph Neural Networks, GNN) (гл. 3) соответственно. Учитывая топологию сети, использование GNN для управления стратегией распределения ресурсов обеспечивает более высокую эффективность обучения.

В главе 4 рассматриваются более сложные гетерогенные системы D2D-связи, в которых главная цель заключается в максимизации суммарной скорости всей системы путем совместной оптимизации конфигурации формирования луча и распределения мощности. В предложенном алгоритме Enhanced Graph Attention Network (EGAT) для обучения графовой нейросетевой модели используется обучение без учителя, а предложенные алгоритмы Graph Attention Networks (GAT) и EGAT фокусируются на GAT с пространственной областью и вводят свойства узлов для повышения эффективности обучения. Экспериментальные результаты показывают, что предложенные алгоритмы превосходят эталонные алгоритмы.

В главе 5 рассматривается сверхбольшая плотная гетерогенная мультиагентная система D2D-коммуникаций, где автор предлагают алгоритм, основанный на мультиагентном обучении с подкреплением (Multi-agent Reinforcement Learning, MARL) и играх типа среднего поля (Mean-field Type Game, MFTG). Теория среднего поля позволяет уменьшить пространство действий агентов одного типа, что делает возможным решение крупномасштабных систем. Содержание этой главы посвящено проблеме масштабируемости, рассматривая взаимодействие между агентами с различными средними полями для обеспечения адекватного распределения ресурсов в гетерогенных мультиагентных системах.

В диссертации всесторонне исследуются вопросы распределения ресурсов в различных сценариях, сочетаются традиционные эвристические методы с передовыми методами машинного обучения, предлагая новые решения для оптимизации беспроводных систем связи.

#### **Замечания и комментарии.**

Работа, в целом, хорошо организована. Исследование выглядит интересным, а технический вклад - значимым. В оформлении и содержании диссертации нет серьезных недостатков, которые ухудшили бы общее впечатление от работы. Есть ряд замечаний и комментариев, которые могут быть учтены автором диссертации в будущих научных исследованиях:

1. В работе в недостаточной степени показано, учитывает ли предложенный подход, основанный на данных, временные зависимости и изменчивость беспроводного канала.

2. В главе 4 говорится о том, как в предлагаемой системе Heterogeneous Node and Edge Graph Neural Network (HNENN) контролируется компромисс

между агрегированием признаков узла и вершины, но не показано, существуют ли гиперпараметры, позволяющие выполнить эту балансировку.

3. Не представлено решения проблемы переключения при сопряжении между устройствами, например, когда текущий временной интервал соединяет устройство 1 и устройство 2, а следующий временной интервал соединяет устройство 1 и устройство 3.

4. В работе присутствует большое количество сокращений, и часть из них не раскрыта.

#### Заключение.

Приведенные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы, ее теоретической значимости и практической ценности и носят рекомендательный характер в части углубления и расширения масштабов исследования. С учетом всего вышесказанного считаю, что содержание диссертации Сунь Цюши соответствует специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ; диссертация является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, имеющей значение для развития соответствующей отрасли знаний. Нарушений пунктов 9, 11 Порядка присуждения Санкт-Петербургским государственным университетом ученой степени кандидата наук соискателем ученой степени мною не установлено. Диссертация соответствует критериям, которым должны отвечать диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, установленным приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», а ее автор - Сунь Цюши заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

#### Член диссертационного совета:

Доктор технических наук, профессор,  
главный научный сотрудник лаборатории проблем компьютерной безопасности,  
заслуженный деятель науки Российской Федерации,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
«Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр  
Российской академии наук»

Котенко Игорь Витальевич

Даю согласие на обработку персональных данных.

Адрес места основной работы: 199178, г. Санкт-Петербург, 14-я линия Васильевского острова, 39

Рабочий телефон: +7 (812) 328-34-11

Адрес эл. почты: [ivkote@comsec.spb.ru](mailto:ivkote@comsec.spb.ru)

Подпись руки

*Котенко И. В.*

заверяю

Заместитель начальника отдела кадров СПб ФНИИ ИТ

Т.Е. Николаева

«10» сентября 2024 г.

