



# Оптимизация многополосных сетей через обучение с подкреплением

УДК 621.39

**А.И. ПОПОВ**, преподаватель кафедры автоматизированных систем управления ФГКВООУ ВО “Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного” МО РФ кандидат технических наук, **А.Д. НАЗАРОВ**, адъюнкт кафедры сетей связи и систем коммутации, **К.О. СИМОНОВА**, адъюнкт кафедры сетей связи и систем коммутации

## Введение

В современных беспроводных сетях ретрансляционная связь является широко используемой и исследуемой топологией сети [1]. Основная причина ее использования — расширение зоны покрытия и повышение вероятности передачи пакетов данных. В ситуациях, когда узлу-источнику (УИ) необходимо передать определенные пакеты узлу-получателю (УП) при слабом беспроводном канале связи (из-за сильных помех и плохих условий передачи), может быть использован ретрансляционный узел (РУ) в качестве промежуточного узла для пересылки.

Идея последовательности РУ может быть использована для расширения в ситуациях, когда УИ и УП полностью утратили связь. Однако в обычной ретрансляционной сети использование промежуточного узла обычно вносит большую задержку в пакеты УИ — УП. Причина этого заключается в том, что РУ сначала ожидает полного приема пакетов данных от УИ, а когда они получены, тот же самый выделенный канал используется для пересылки УП. Этот традиционный метод ретрансляции данных называется Decode and Forward (DF) [2].

Для уменьшения недостатков традиционной ретрансляционной топологии вместо ожидания полного приема пакетов от УИ и последующего освобождения выделенного канала, а затем пересылки этого же пакета данных на свой УП РУ может немедленно начать пересылку данных по другому каналу любой другой полосы частот для одновременного приема и передачи. Этот процесс показан на рис. 1, где РУ

получает данные от УИ на  $i$ -м канале  $j$ -й полосы ( $c_{ij}$  РУ $_1$ ) и пересылает те же данные следующему узлу по  $k$ -му каналу из другого ( $l$ ) диапазона ( $c_{kl}$   $r_1$   $r_2$ ). Это и называется многодиапазонной связью.

Учитывая возможности современных технологий, можно предположить наличие радиоприемников, способных поддерживать различные диапазоны приемопередающих частот (например, IEEE 802.11ax, работающий на частотах 2,4 и 5 ГГц [3], миллиметровые волны и т. д.), которые по-разному реагируют на потери трафика, замирания, радиопомехи и другие физические явления. Как следствие, существует большое количество условий функционирования канала в различных частотных диапазонах [4], [5].

Использование многодиапазонной связи требует наличия доступа к каналу и эффективных методов управления передачей пакетов. Для решения проблемы различий в скорости передачи данных при приеме и передаче пакетов в одно и то же время необходимо рассмотреть вопрос, как получить доступ к ограниченному диапазону частот. В результате возникает сложная с точки зрения вычислений задача, в которой необходимо оптимизировать распределение каналов с использованием доступных многополосных частот, чтобы минимизировать задержку пакетов данных в ретрансляционной сети.

Распределение многодиапазонных каналов для РУ является проблемой, зависящей от времени, необходимого для принятия оптимального решения, которое не должно приводить к дополнительным задержкам.

Как видно из рис. 1, необходимо принять решение относительно частотных каналов, используемых РУ для передачи данных в УП. При решении этой задачи необходимо иметь один централизованный сервер, который принимает решения о распределении каналов для всей сети на основе данных о текущей сети передачи данных (СПД), полученных от РУ, в то время как при распределенном подходе РУ должны принимать свои индивидуальные решения в соответствии с локальной обстановкой в фрагменте. Централизованный подход требует полной информации и координации от РУ, чтобы обеспечить принятие оптимального решения, которое может оказаться неактуальным после реализации [6], [7]. Такой подход непрактичен и не подходит для динамически меняющейся сети, зависящей от времени.

Таким образом, необходимо использовать распределенный подход при решении задачи распределения многодиапазонных каналов для РУ, обеспечивающего достоверные, своевременные и оптимальные результаты.

В различных работах рассматривались распределенные алгоритмы [6], [7] для решения этой задачи в допущении стабильных условий канала и статических узлов. В данной работе рассматривается динамическая ретрансляционная сеть с нестабильными канальной структурой и мобильными узлами. Эта сложная высокодинамическая среда ретрансляционной сети требует нового решения на основе распределенного подхода.

Статью целиком читайте  
в бумажной версии журнала

**ОПТИМИЗАЦИЯ МНОГОПОЛОСНЫХ СЕТЕЙ ЧЕРЕЗ ОБУЧЕНИЕ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ**  
*OPTIMIZATION OF MULTIBAND NETWORKS VIA REINFORCEMENT LEARNING*

УДК 621.39

**ПОПОВ Андрей Иванович** (кандидат технических наук),  
**НАЗАРОВ Алексей Дмитриевич** (адъюнкт), **СИМОНОВА Карина Олеговна** (адъюнкт)  
(ФГКВОУ ВО "Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного" МО РФ)

В статье предложена математическая модель для оптимизации производительности многополосных ретрансляционных сетей, ориентированных на современные беспроводные системы связи. Главная цель исследования — минимизация задержек при передаче данных и улучшение качества обслуживания за счет эффективного распределения частотных каналов. В отличие от традиционных централизованных методов предлагается подход, основанный на Марковском процессе принятия решений и алгоритме обучения с подкреплением Q-Learning, что позволяет узлам сети принимать автономные решения в условиях высокой динамики и мобильности.

Предложенная модель может быть применена для оптимизации работы сетей нового поколения, обеспечивая высокую пропускную способность и низкие задержки, что делает ее актуальной для широкого круга исследователей и специалистов.

*The article proposes a mathematical model for optimizing the performance of multiband relay networks designed for modern wireless communication systems. The main goal of the research is to minimize data transmission delays and improve Quality of Service through efficient frequency channel allocation. Unlike traditional centralized methods, the proposed approach is based on a Markov Decision Process and Q-Learning reinforcement learning algorithm, allowing network nodes to make autonomous decisions in highly dynamic and mobile environments.*

*The model addresses the issue of channel distribution in multiband networks, such as 5G, considering the specifics of modern network technologies, where it is important to account for user mobility and changing channel parameters.*

**Ключевые слова:** машинное обучение, обучение с подкреплением, система поддержки принятия решений Маркова, Q-обучение, многополосная связь, ретрансляционная сеть.

**Keywords:** machine learning, reinforcement learning, Markov decision support system, Q-Learning, multi-band communication, relay network.

#### Литература

1. Хайров Э.М., Бегишев В.О. Модель оценки задержки передачи пакетов в сетях 5G в виде системы массового обслуживания с групповым обслуживанием и прогулками прибора/ В сборнике материалов Всероссийской конференции "Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем". Москва. 17 — 21 апреля 2023 г. — М.: РУДН. 2023. С. 46 — 50.
2. Qin D., Wu W., Zhou T. Performance optimization for decode and forward cooperative cognitive radio networks// Wireless Communications and Mobile Computing. 2023. P. 8828761.
3. Мжельский А.А., Панасюк Ю.Н. Преимущества и перспективы развития миллиметрового диапазона волн/ В сборнике материалов 5-й Всероссийской молодежной научной конференции, посвященной Дню радио и связи и 75-летию Победы в Великой Отечественной войне "Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития". 2020. [Электронный ресурс]. Дата обращения: 03.09.2024.
4. Вишневский В.М. Новый комплекс математических моделей, методов, алгоритмов и программ управляемых стохастических систем для оценки производительности и проектирования телекоммуникационных сетей следующего поколения: Отчет о НИР № 16-49-02021. Российский научный фонд. 2018.
5. Овчинников В.В. Адаптивное эквалайзирование сигналов с быстрой ППРЧ для преодоления дисперсионных искажений и повышения скрытности широкополосной КВ-связи: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. — Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева — КАИ". 2021. 163 с.
6. Скатков А.В. Модель векторной оптимизации сетей критического назначения/ В сборнике материалов Всероссийской научно-технической конференции "Информационные технологии и информационная безопасность в науке, технике и образовании "Инфотех-2019". Севастополь. 18 — 20 сентября 2019 г. — М.: ФГАОУ ВО "Севастопольский государственный университет". 2019. С. 16 — 19.
7. Аверина Т.А., Курочка П.Н., Жегульская М.В. Совершенствование процесса принятия решений на основе теории массового обслуживания// Вестник Южно-Уральского государственного университета: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2018. Т. 18. № 4. С. 115 — 126.
8. Шведов А.В., Гадасин Д.В., Клыгина О.Г., Тремасова Л.А. Оптимизация маршрутизации в сети при помощи гамильтонова цикла и марковского процесса принятия решений// DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2023. Т. 13. № 3. С. 42 — 49.
9. Ажжалова А.Ж., Мухарский Д.В., Жак И.Н. Применение обучения с подкреплением для управления моделью экономической системы/ В сборнике материалов II Всероссийской научной конференции "Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения". Тольятти. 22 — 24 апреля 2019 г. — Издатель: Качалин Александр Васильевич. 2019. С. 313 — 321.
10. Перегудов М.А., Уманский А.Я., Стешковой А.С. Оценка эффективности процедуры распределенной синхронизации элементов сети цифровой радиосвязи в условиях деструктивных воздействий// Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 1. С. 126 — 151.

11. Egashira N., Yano K., Tsukamoto S., Webber J., and Kumagai T. Low latency relay processing scheme for WLAN systems employing multiband simultaneous transmission/ Proceedings of the Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)./ IEEE. San Francisco, CA, USA. March 19 — 22, 2017. Pp. 1 — 6.
12. Грандхи С.А., Саммоур М., Леви Д.С. Способы и системы для обеспечения эффективной работы множества режимов в системе беспроводной локальной сети (WLAN)/ Патент RU 2413370 С2. Патентообладатель: "Интердиджитал Текнолоджи Корпорейшн" (US). Заявка 2008131951/09 от 03.01.2007. Опубликовано: 27.02.2011. Бюллетень № 6.
13. Репкин Д.А., Сухих П.Н., Чукаев К.Н. Определение топологии сети радиорелейной связи методами математического моделирования и оптимизации/ В сборнике материалов Всероссийской ежегодной научно-практической конференции "Общество, наука, инновации" (НПК-2014). Киров. 15 — 26 апреля 2014 г.— Вятский государственный университет. 2014. С. 1466 — 1469.
14. Анисимов Д.В. Модель и алгоритмы управления параметрами канального уровня беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11, функционирующих в составе распределенных систем: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. — Ордена Трудового Красного Знамени федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский технический университет связи и информатики". 2017. 146 с.
15. Zhou Y., Zhang T., & Li M. Distributed synchronization and optimization in wireless communication networks under interference constraints// IEEE Transactions on Wireless Communications. 2020. Vol. 19. No. 8. Pp. 5097 — 5109.
16. Jones D., Smith P., Liu W. Relay-assisted multi-band communication: Improving QoS in next-generation WLANs/ Proceedings of the International Conference on Communications (ICC). IEEE. 2018. Pp. 115 — 120.
17. Zhang Z., Zhang L., & Li H. Reinforcement learning-based resource allocation for cognitive radio networks with dynamic spectrum access// IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2020. Vol. 69. No. 2. Pp. 1786 — 1797.
18. Bai F., Zhang W., & Li Z. A new multi-mode communication system for wireless local area networks (WLANs)// IEEE Access. 2020. Vol. 8. Pp. 102493 — 102506.
19. Li W., Zhou Z., & Chen X. Adaptive multiband relay strategies for low-latency WLAN networks// IEEE Access. 2020. Vol. 8. Pp. 10543 — 10554.
20. Kim S., Park J., & Han Y. Multiband transmission schemes for low-latency communication in IEEE 802.11ax systems// IEEE Transactions on Wireless Communications. 2019. Vol. 18. No. 5. Pp. 2473 — 2486.
21. Chen X., Li W., & Zhao Z. Adaptive equalization for high-speed communication in multiband wireless systems// IEEE Transactions on Communications. 2021. Vol. 69. No. 10. Pp. 6895 — 6905.
22. Zhang Y., Wang X., & Li Z. Vector optimization for critical network systems in dynamic environments// Journal of Network and Computer Applications. 2020. Vol. 103. Pp. 84 — 96.
23. Liu W., Zhang S., & Xu L. Topology optimization for relay networks using mathematical modeling and optimization techniques// IEEE Transactions on Network and Service Management. 2021. Vol. 18. No. 2. Pp. 124 — 135.