

УДК 621.391

doi 10.54708/22259309_2025_13286

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕСУРСОВ В КОГНИТИВНЫХ РАДИОСЕТЯХ: ГИБРИДНЫЙ ПОДХОД И ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Р. О. Сальников¹, И. К. Мешков²

¹kosshak17@yandex.ru, ²mik.ivan@bk.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНИТ)

Аннотация. В работе рассматривается подход к оптимизации использования ресурсов в когнитивных радиосетях. Рассмотрен предложенный ранее гибридный алгоритм на основе методов имитации отжига и поиска с запретами (HTSA), обеспечивающий эффективное управление спектральными и энергетическими ресурсами сети. Предложены надстройки для этого алгоритма с целью повышения его эффективности. Предложен вариант алгоритма, строящий фронт Парето с использованием концепции доминирования для двух целей: спектральной и энергетической эффективности. На основе предложенного алгоритма разработана программная модель для анализа и оптимизации сетевых характеристик с использованием концепции Парето-оптимальности.

Ключевые слова: когнитивные радиосети; оптимизация ресурсов; гибридный алгоритм; спектральная эффективность; энергоэффективность; фронт Парето.

ВВЕДЕНИЕ

В эпоху стремительной цифровизации количество подключенных к Интернету устройств растет в геометрической прогрессии. Согласно прогнозам экспертов, в ближайшие годы миллиарды устройств будут взаимодействовать через технологии интернета вещей (IoT). Такой масштабный рост создает беспрецедентную нагрузку на доступный радиочастотный спектр и энергетические ресурсы, что требует инновационных решений для эффективного управления сетевой инфраструктурой.

Существующие подходы к оптимизации ресурсов в когнитивных радиосетях часто фокусируются на оптимизации одного-двух параметров [1, 2], игнорируя взаимосвязь между различными характеристиками сети. Это приводит к субоптимальным решениям и неэффективному использованию доступных ресурсов. В данной работе предлагается концепция подхода, основанная на многокритериальной оптимизации с использованием Парето-фронта, что позволяет находить сбалансированные решения, учитывающие как спектральную и энергетическую эффективность сети, так и потенциальные характеристики канала передачи в определенный момент времени.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Предложенный подход основан на комбинации нескольких методов оптимизации для эффективного управления ресурсами в когнитивных радиосетях. Ключевой особенностью является использование концепции Парето-оптимальности для нахождения баланса между спектральной и энергетической эффективностью сети. Построение фронта Парето осуществляется с использованием метода доминирования, где для каждой пары пользователей вычисляются матрицы спектральной (SE) и энергетической (EE) эффективности:

$$SE = \log_2(1 + SNR)$$

$$EE = DataRate / Power,$$

где SNR – отношение сигнал/шум; $DataRate$ – скорость передачи данных; $Power$ – потребляемая мощность.

Точка считается Парето-оптимальной, если не существует другой точки, которая превосходит её одновременно по обоим критериям. Математически это можно выразить следующим образом:

$$\forall i, j: \neg \exists j((SE_j \geq SE_i \wedge EE_j \geq EE_i) \wedge (SE_j > SE_i \vee EE_j > EE_i)).$$

Двумя основными значениями, по которым производится работа предложенного алгоритма, являются спектральная и энергетическая эффективность [1].

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Разработанная программная модель реализована в среде MATLAB и представляет собой комплексное решение для анализа и оптимизации когнитивных радиосетей. Модель включает в себя несколько взаимосвязанных модулей, каждый из которых отвечает за определенный аспект функционирования системы.

Инициализация параметров сети осуществляется с учетом реальных ограничений и требований к современным беспроводным сетям. В модели используются следующие базовые параметры: 200 пользователей, 100 каналов связи, диапазон мощности передатчиков от 0,001 до 0,003 Вт. Эти параметры могут быть адаптированы под конкретные требования сети.

Создание матрицы смежности и массива свойств каналов реализовано с использованием эффективных структур данных MATLAB, что обеспечивает быструю обработку информации даже при большом количестве узлов сети. Каждое соединение характеризуется набором параметров, включая пропускную способность, задержку, уровень шума и затухание сигнала. Вычисление метрик производительности происходит на основе реальных физических моделей распространения сигнала и энергопотребления.

Особое внимание уделяется точности расчета спектральной и энергетической эффективности, так как эти параметры являются ключевыми для оптимизации. Процесс нормализации и взвешивания параметров реализован с использованием адаптивных методов, учитывающих относительную важность различных характеристик сети. Это позволяет гибко настраивать систему под различные сценарии использования и приоритеты оптимизации.

В процессе работы алгоритма формируется взвешенный граф, где веса рёбер определяются комбинацией различных метрик производительности. Поиск оптимальных путей происходит итеративно, с последовательным удалением найденных путей для обеспечения разнообразия решений и оценки устойчивости сети.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Результаты моделирования представлены комплексом взаимосвязанных визуализаций, позволяющих всесторонне оценить эффективность предложенного подхода. Первый этап визуализации представляет собой топологический граф сети, отображающий начальную конфигурацию с комбинированными весами (рис. 1).

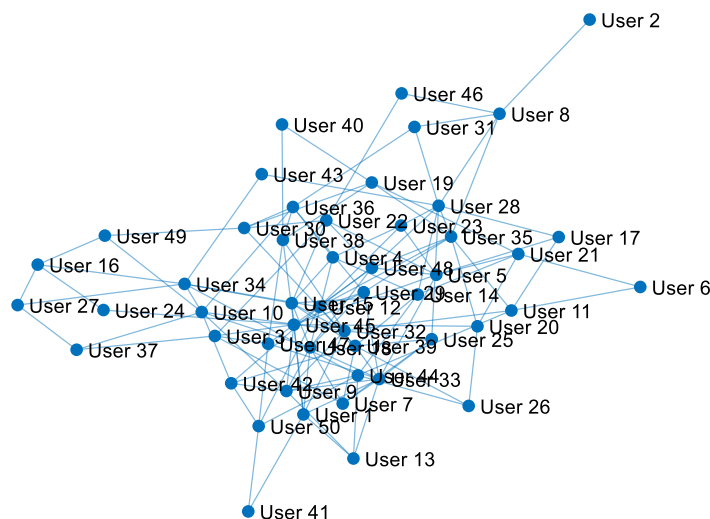


Рис. 1. Начальная топографическая конфигурация сети на 50 пользователей и 10 типовых каналов

На этом графе наглядно представлена структура связей между пользователями. Следующий этап построения графа дает более широкое представление о сети. Теперь перед сетью стоит задача – необходимо связать двух пользователей между собой. В уравнение введены переменные, описывающие характеристики и состояние каждого соединения, характеризующего «типовым каналом». Каждое соединение получило свой вес, толщина линий соответствует весам соединений, а цвета указывают на то, что у инициатора сеанса связи есть несколько вариантов доступа до конечного приемника (рис. 2).

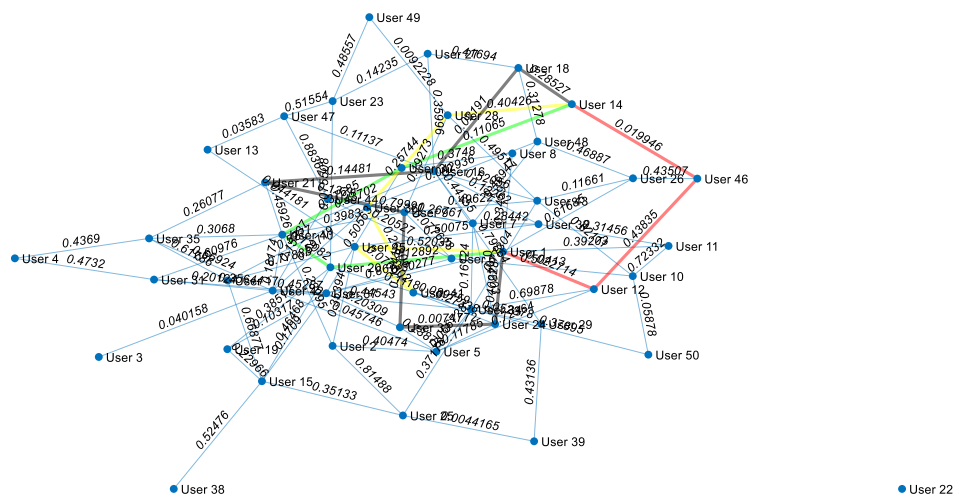


Рис. 2. Расширенная версия топографической конфигурации сети на 50 пользователей и 10 типовых каналов, описывающая возможные оптимальные пути связи двух пользователей

На втором этапе строится визуализация фронта Парето, демонстрирующая распределение всех возможных конфигураций сети в пространстве критериев эффективности. Синие точки на графике представляют все возможные соединения между пользователями, красные точки выделяют Парето-оптимальные решения (рис. 3).

Такое представление позволяет оценить компромиссы между различными целями оптимизации и выбрать наиболее подходящие конфигурации сети.

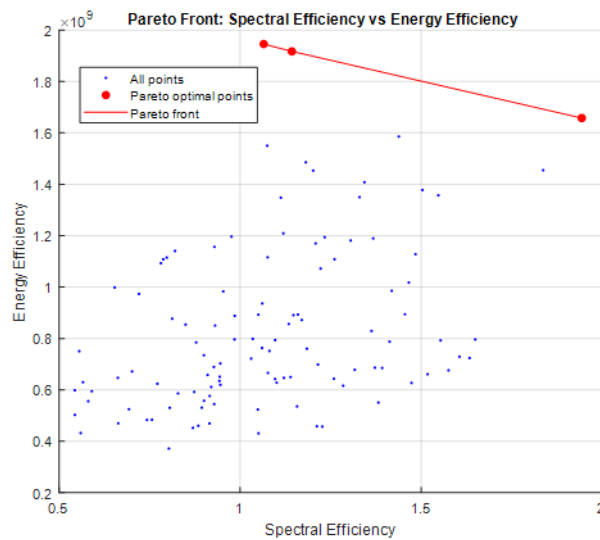


Рис. 3. Результат построения фронта Парето для заявленной ранее топографической конфигурации сети на 50 пользователей и 10 типовых каналов

С ростом количества пользователей и увеличением числа вариантов «типовых каналов» воспринимать информацию отдельно по фронту Парето и топологиям становится неудобно, поэтому третий этап визуализации объединяет топологическую и критериальную информацию, создавая комплексное представление о взаимосвязи между структурой сети и её эффективностью. И вновь синие точки на графике представляют все возможные соединения между пользователями, красные точки выделяют Парето-оптимальные решения, а цветные точки соответствуют соединениям, входящим в найденные кратчайшие пути (рис. 4). Эта визуализация особенно полезна для понимания того, как изменения в топологии сети влияют на её производительность, и помогает в принятии обоснованных решений по оптимизации сети.

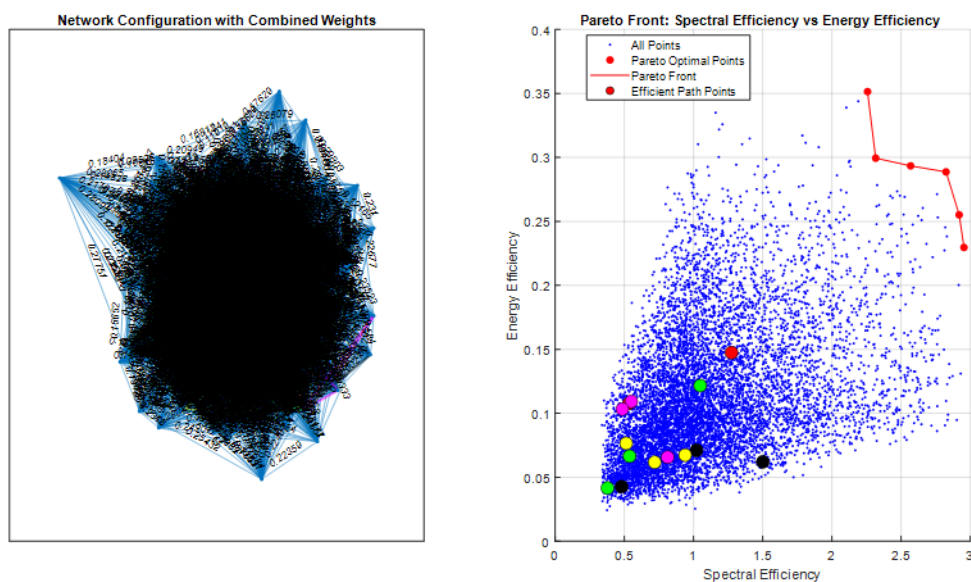


Рис. 4. Визуализация графа и фронта Парето для сети из 300 пользователей и 100 каналов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный вариант реализации гибридного подхода к оптимизации ресурсов в когнитивных радиосетях открывает доступ к большому количеству вариантов того, как можно сформировать решение многокритериальной задачи оптимизации сетевых ресурсов. Использование концепции Парето-оптимальности в сочетании с модифицированными алгоритмами

отбора оптимальных значений позволяет находить сбалансированные решения, обеспечивающие оптимальное использование как спектральных, так и энергетических ресурсов сети.

Предложенная программная реализация предоставляет гибкий инструментарий для анализа и оптимизации сетевых конфигураций, что особенно важно при проектировании и развертывании масштабных IoT сетей. Дальнейшие исследования могут быть направлены на расширение набора оптимизируемых параметров, разработку более эффективных алгоритмов поиска решений и адаптацию предложенного подхода к специфическим требованиям различных приложений IoT.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Shahzad L., Akraam S., Karamat T., Attique Khan M., Altrjman Ch., Mey S. and Nam Y.** An Efficient Pareto Optimal Resource Allocation Scheme in Cognitive Radio-Based Internet of Things Networks. 2022. Sensors 22. No. 2: 451. <https://doi.org/10.3390/s22020451>
2. **Srivastava A., Gupta M. S., Kaur G.** Energy efficient transmission trends towards future green cognitive radio networks (5G): Progress, taxonomy and open challenges // J. Netw. Comput. Appl. 2020. 168. 102760.

ОБ АВТОРАХ

Сальников Роман Олегович, асп. каф. ТС.

Мешков Иван Константинович, доцент, каф. ТС.

METADATA

Title: Resource optimization in cognitive radio networks: a hybrid approach and software implementation

Author: R. O. Salnikov¹, I. K. Meshkov²

Affiliation:

^{1,2} Ufa University of Science and Technology (UUST), Russia.

Email: ¹ kosshak17@yandex.ru

Language: Russian.

Source: Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), no. 1 (32), pp. 86-90, 2025. ISSN 2225-9309 (Print).

Abstract: The paper proposes an approach to optimize the use of resources in cognitive radio networks. It considers the previously proposed hybrid algorithm, which is based on the simulated annealing method and search with prohibitions (TSA). This algorithm provides effective management of spectral and energy resources in the network. In order to improve its efficiency, add-ons are proposed for this algorithm. A variant of the algorithm is presented that builds a Pareto front based on the concept of dominance for spectral and energy efficiency. Based on this algorithm, a software model is developed to analyze and optimize network characteristics using Pareto optimality.

Keywords: Cognitive radio networks, resource optimization, hybrid algorithm, spectral efficiency, energy efficiency, Pareto front.

About authors:

Salnikov Roman Olegovich, postgraduate student, Dept. of TS (UUST).

Meshkov Ivan Konstantinovich, associate professor Dept. of TS (UUST)