



TANQIDIY NAZAR, TAHLILIY TAFAKKUR VA INNOVATSION G'UYALAR



ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕМ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ В СЕТЯХ 5G

Писецкий Ю.В

Вотинов К.А

Ташкентский университет информационных технологий имени

Мухаммада ал-Хоразмий, Ташкент

yuriy.pisetskiy@mail.ru ; votinovkirill@gmail.com ;

Агапова В.О

Белорусский государственный университет информатики и

радиоэлектроники, Минск;

agapovavika06@gmail.com

Аннотация. В статье систематизированы подходы к снижению энергопотребления базовых станций (БС) в сетях пятого поколения (5G). Рассмотрены три направления: аппаратная оптимизация компонентов БС и управление сетью на основе трафика; интеграция возобновляемых источников энергии; интеллектуальные алгоритмы управления, включая методы обучения с подкреплением, генетические алгоритмы и эвристические подходы на основе кластеризации. Показано, что наибольший потенциал снижения энергопотребления обеспечивают гибридные архитектуры, сочетающие несколько методов одновременно.

Ключевые слова: 5G, базовые станции, энергоэффективность, режим сна, возобновляемые источники энергии, обучение с подкреплением, генетические алгоритмы.

ВВЕДЕНИЕ

Телекоммуникационная отрасль обеспечивает от 2 до 3% мирового потребления электроэнергии, при этом от 60 до 80% данного объёма приходится на сети радиодоступа [1]. Базовые станции составляют около 57% совокупного энергопотребления сотовых сетей [3], а затраты операторов на электроэнергию достигают от 15 до 40% операционных расходов [1]. Прогнозы, охватывающие период до 2030 года, свидетельствуют о том, что без принятия специальных мер мировые расходы на электроэнергию телекоммуникационной инфраструктуры могут увеличиться в 8,6 раза к 2025 году [2].

Развёртывание сетей 5G существенно обостряет данную проблему. Потребление отдельных БС в сети 5G возрастает приблизительно в 3 раза по сравнению с 4G вследствие массового применения антенных решёток M-MIMO и обработки сигналов в миллиметровом диапазоне частот. Организации Deutsche Telekom, Vodafone, Verizon и Orange уже установили амбициозные целевые показатели снижения выбросов



углекислого газа и потребления электроэнергии [1]. В настоящей работе систематизированы ключевые подходы к управлению энергопотреблением БС в контексте сетей 5G и перспективных архитектур следующих поколений.

КЛАССИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ БС

Потребление макро-БС определяется совокупностью компонентов: усилителем мощности (УМ), блоком цифровой обработки сигналов, трансивером, системой охлаждения и вспомогательным оборудованием [5]. Усилитель мощности является главным потребителем и обеспечивает от 50 до 80% суммарной нагрузки на сайте. С каждым поколением стандартов КПД УМ снижался вследствие роста отношения пик-среднеквадратичного значения (PAPR): в стандарте LTE данный параметр достигает 8,5 дБ. Применение архитектур Doherty на транзисторах из нитрида галлия (GaN) позволяет достичь КПД до 50%, а схемы с переключаемым режимом работы класса E обеспечивают КПД до 85% [3].

Управление сетью на основе трафика реализуется через перевод БС и отдельных компонентов в режим сна в периоды низкой нагрузки. Данный подход не требует замены аппаратного обеспечения и при грамотной реализации обеспечивает экономию до 50% энергии [4]. Гетерогенные сети (HetNet), совмещающие макросоты и малые соты, снижают расстояние до абонентского оборудования, что позволяет уменьшить мощность передачи и суммарное потребление энергии.

ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ ДЛЯ БС

Применение возобновляемых источников энергии (ВИЭ) представляет собой долгосрочное решение для питания БС, особенно актуальное в районах с ненадёжной электросетевой инфраструктурой [3]. Солнечные фотоэлектрические системы (PV) и ветрогенераторы (WT) занимают лидирующее положение в телекоммуникационной отрасли. Гибридные конфигурации типа PV/WT/DG/FC, как правило, демонстрируют оптимальное соотношение экономической эффективности и надёжности электроснабжения.

Сравнительный анализ региональных исследований показывает, что конфигурация PV с аккумуляторным накопителем обеспечивает снижение уровня OPEX до 48,6% относительно дизельных генераторов [3]. Регионы между 30° северной и южной широты, включая территорию Узбекистана, располагают высоким солнечным потенциалом: средняя инсоляция составляет от 4,5 до 7,5 кВт·ч/м² в сутки [3]. Основными барьерами для массового применения ВИЭ остаются высокие капитальные затраты (CAPEX) и нестабильный характер генерации, что предопределяет необходимость резервных источников питания и систем хранения энергии.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ В СЕТЯХ 5G

Развёртывание сетей 5G стимулировало разработку интеллектуальных алгоритмов управления энергопотреблением БС. Анализ актуальных решений позволяет выделить четыре основных класса методов, сравнительная характеристика которых представлена в таблице 1.





TANQIDIY NAZAR, TAHLILIY TAFAKKUR VA INNOVATSION G'UYALAR



Методы на основе марковских процессов принятия решений (MDP) обеспечивают адаптивное управление состояниями БС в реальном времени с учётом мобильности пользователей. Алгоритмы обучения с подкреплением, в частности Q-learning и SARSA, реализуют распределённое управление режимами сна малых БС на основе загруженности, уровня интерференции и состояния буфера, обеспечивая экономию до 80% при сохранении нормируемых показателей QoS [6]. Генетические алгоритмы (GA) превосходят метод роя частиц (PSO) по критерию энергосбережения в сетях HetNet [7]. Эвристические методы кластеризации снижают вычислительную сложность задачи управления плотными малосотовыми сетями без существенной потери качества оптимизации [1].

Таблица 1

Сравнительная характеристика методов управления энергопотреблением БС

Метод	Экономия (%)	Преимущества	Ограничения
Оптимизация PA (GaN, Doherty)	50–85	Высокий КПД усилителя; не требует изменения ПО	Высокий CAPEX; не эффективен при малой нагрузке
Режим сна (Sleep Mode)	до 50	Без замены оборудования; простая реализация	Снижение покрытия; ограничен при пиковом трафике
Гетерогенные сети (HetNet)	до 60	Снижение дистанции UE–БС; масштабируемость	Межсотовая интерференция; сложность управления
Возобновляемые источники (ВИЭ)	до 49 (OPEX)	Долгосрочное снижение OPEX; нулевые выбросы CO ₂	Зависимость от климата; высокий CAPEX; необходим резерв питания
Марковский процесс (MDP)	20–60	Управление в реальном времени; учёт мобильности пользователей	Высокая вычислительная сложность; затруднена масштабируемость
Обучение с подкреплением (RL)	до 80	Распределённое управление; высокая адаптивность к динамике трафика	Требует периода обучения; зависимость от качества обучающих данных
Генетический алгоритм (GA)	28–54	Глобальный поиск оптимума; эффективен в HetNet	Настройка гиперпараметров; риск схождения к локальному оптимуму



TANQIDIY NAZAR, TAHLILIY TAFAKKUR VA INNOVATSION G'UYALAR



Метод	Экономия (%)	Преимущества	Ограничения
Кластеризация (эвристика)	25–65	Низкая вычислительная сложность; хорошая масштабируемость	Статичность кластеров; необходим пересчёт при изменении топологии

Для сетей следующих поколений (B5G), включая спутниково-наземные интегрированные сети (STIN) и интегрированные наземно-воздушные сети (ITAN), разрабатываются гибридные алгоритмы формирования луча (beamforming). Совместное применение метода последовательной выпуклой аппроксимации (SCA) и блочно-координатного спуска (BCD) обеспечивает выигрыш в энергоэффективности по критерию секретности до 0,12 бит/Гц/Дж по сравнению с базовыми методами [1]. Диапазоны достигаемой экономии энергии для всех рассмотренных методов наглядно представлены на рисунке 1.

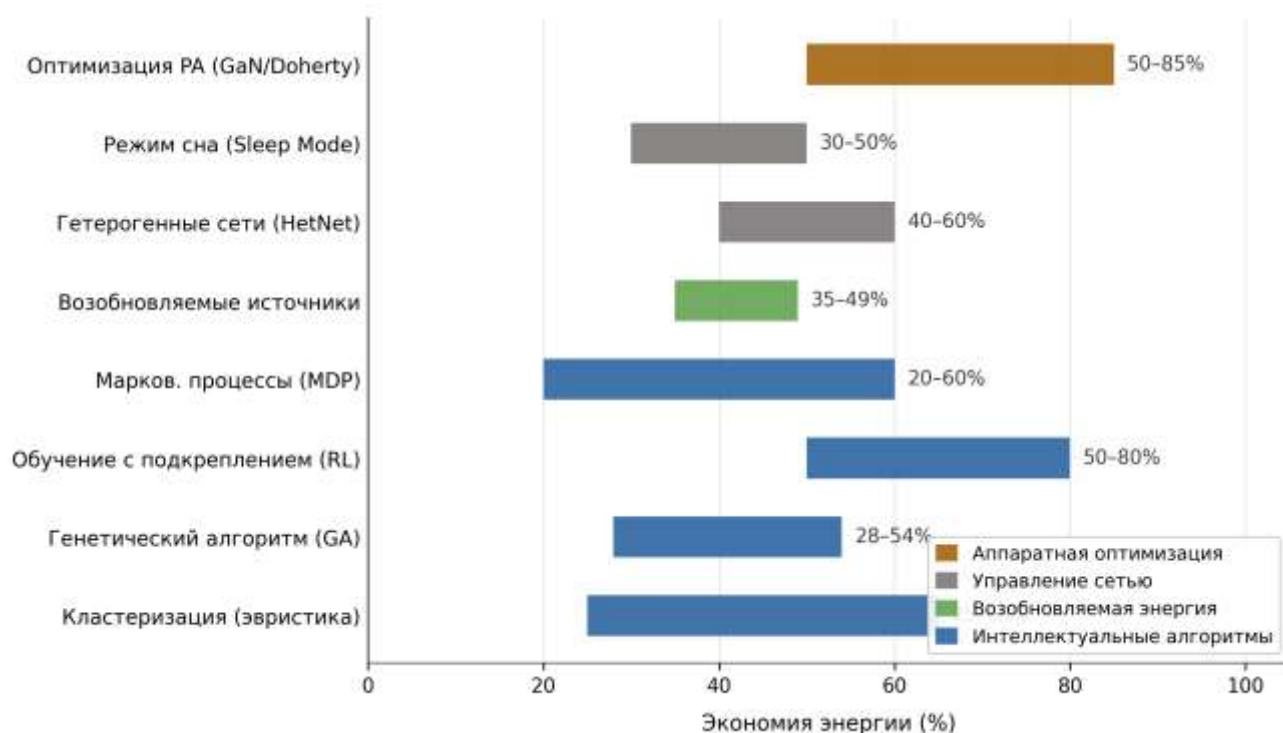


Рис. 1. Диапазоны достигаемой экономии энергии для рассмотренных методов управления потреблением БС.

Представленные на рисунке 1 данные наглядно демонстрируют закономерность: классические методы аппаратной оптимизации и управления сетью обеспечивают стабильную, однако ограниченную по верхней границе экономию, тогда как интеллектуальные алгоритмы формируют значительно более широкий диапазон результатов, отражающий их чувствительность к конфигурации сети, качеству



обучения и характеру трафика. Возобновляемые источники энергии занимают промежуточное положение, однако их показатель относится к снижению операционных расходов, а не к непосредственной экономии потребляемой мощности, что делает прямое сравнение с алгоритмическими методами некорректным без учёта контекста развёртывания. Данное наблюдение подтверждает тезис о том, что выбор метода управления энергопотреблением должен определяться совокупностью факторов: масштабом сети, региональными условиями, требованиями к качеству обслуживания и доступностью вычислительных ресурсов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый анализ показывает, что ни один из рассмотренных методов не обеспечивает универсального решения для всего диапазона сетевых сценариев. Аппаратная оптимизация усилителей мощности и управление режимами сна эффективны при малой нагрузке, однако обладают ограниченным потенциалом в периоды пикового трафика. Возобновляемые источники энергии предоставляют долгосрочное решение с точки зрения операционных затрат, но их применение определяется географическими и климатическими условиями. Интеллектуальные алгоритмы на основе обучения с подкреплением, генетических методов и кластеризации обеспечивают наибольшую гибкость адаптации к динамике трафика с достижимой экономией от 25 до 85% [1, 4, 6, 7].

Перспективным направлением является разработка многоуровневых гибридных архитектур, сочетающих возобновляемые источники энергии, онлайн-обучение и кластеризацию БС. Обоснованный выбор архитектуры управления с учётом региональных условий развёртывания, характеристик трафика и требований QoS становится ключевым фактором повышения энергоэффективности сетей 5G и поколений, которые придут им на смену [1, 2, 3].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Ichimescu, A.; Popescu, N.; Popovici, E.C.; Toma, A. Energy Efficiency for 5G and Beyond 5G: Potential, Limitations, and Future Directions. *Sensors* 2024, 24(22), 7402. DOI: 10.3390/s24227402.

[2] Lorincz, J.; Capone, A.; Wu, J. Greener, Energy-Efficient and Sustainable Networks: State-Of-The-Art and New Trends. *Sensors* 2019, 19(22), 4864. DOI: 10.3390/s19224864.

[3] Alsharif, M.H.; Kim, J.; Kim, J.H. Green and Sustainable Cellular Base Stations: An Overview and Future Research Directions. *Energies* 2017, 10(5), 587. DOI: 10.3390/en10050587.

[4] Wu, J.; Zhang, Y.; Zukerman, M.; Yung, E. Energy-Efficient Base Stations Sleep Mode Techniques in Green Cellular Networks: A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 2015, 17(2), 803–826. DOI: 10.1109/COMST.2015.2419190.



TANQIDIY NAZAR, TAHLILY TAFAKKUR VA INNOVATSION G'OYALAR



[5] Auer, G.; Giannini, V.; Desset, C.; Godor, I.; Skillermark, P.; Olsson, M. How much energy is needed to run a wireless network? *IEEE Wireless Communications* 2011, 18(5), 40–49. DOI: 10.1109/MWC.2011.6056691.

[6] El Amine, A.; Chaiban, J.-P.; Al Haj Hassan, H.; Dini, P.; Nuaymi, L.; Achkar, R. Energy Optimization with Multi-Sleeping Control in 5G Heterogeneous Networks Using Reinforcement Learning. *IEEE Transactions on Network and Service Management* 2022, 19(4), 4313–4325. DOI: 10.1109/TNSM.2022.3160045.

[7] Fourati, H.; Maaloul, R.; Fourati, L.; Jmaiel, M. An Efficient Energy-Saving Scheme Using Genetic Algorithm for 5G Heterogeneous Networks. *IEEE Systems Journal* 2023, 17(1), 591–599. DOI: 10.1109/JSYST.2022.3166474.

