УДК 621.396.93

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ СЕТЕЙ СОТОВОЙ СВЯЗИ СТАНДАРТА LTE

Пулатова Ш.У., Узакбаев Е.О., Шавкатов Ж.Ж.

Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада аль-Хорезми, Ташкент, Узбекистан, e.uzakbaev@tuit.uz

Аннотация: выполнены систематизация и сравнительный анализ ключевых методов повышения энергоэффективности сетей сотовой связи стандарта LTE, стандартизованных в рамках проекта 3GPP. Рассмотрены прерывистый приём DRX/C-DRX и управление мощностью передачи на стороне абонентского устройства, координация межсотовых помех eICIC, совместная многоточечная передача CoMP и адаптивное планирование радиоресурсов на стороне сети, а также архитектурные решения на базе MIMO/Beamforming, ретрансляции и малых сот. Для каждой группы методов приведены аналитические модели энергопотребления, SINR и энергетической эффективности, формально обосновывающие их достоинства и недостатки. Показано, что все рассмотренные решения функционируют в условиях компромисса между энергопотреблением, задержкой и пропускной способностью сети.

Ключевые слова: LTE; энергоэффективность; DRX; eICIC; CoMP; MIMO; малые соты.

I. ВВЕДЕНИЕ

Рост числа абонентских устройств и объёмов передаваемого трафика в сетях мобильной связи обуславливает повышенное внимание к вопросам энергетической эффективности как со стороны операторов, стремящихся снизить эксплуатационные расходы и углеродный след инфраструктуры, так и со стороны производителей оборудования, заинтересованных в увеличении времени автономной работы устройств [9, 10]. Стандарт LTE, разработанный в рамках партнёрского проекта 3GPP, изначально предусматривал ряд механизмов снижения энергопотребления при сохранении требуемого уровня качества обслуживания (QoS); эти механизмы затрагивают различные уровни архитектуры сети – от физического уровня радиоинтерфейса до алгоритмов распределения ресурсов и топологии развёртывания базовых станций.

Целью настоящей работы является систематизация ключевых энергоэффективных технологий LTE, критический анализ их достоинств и недостатков и построение аналитических моделей, количественно описывающих возникающие компромиссы. Работа выполнена на основе аналитического обзора публикаций, индексируемых в базах данных IEEE Xplore, ScienceDirect, MDPI и arXiv, за период 2009–2025 гг. В качестве сквозной количественной метрики принята энергетическая эффективность EE, определяемая как отношение достигнутой скорости передачи данных R к суммарной потребляемой мощности P_{tot}:

$$EE = \frac{R}{P_{tot}} \quad [\text{бит/Дж}]. \tag{1}$$

Данная метрика позволяет единообразно сопоставлять методы, воздействующие на числитель (повышение R за счёт MIMO, CoMP) и на знаменатель (снижение P_{tot} за счёт DRX, управления мощностью и малых сот) [10, 11]. Рассмотренные технологии систематизированы по трём уровням архитектуры LTE (рисунок 1).



Рисунок 1. Классификация методов энергоэффективности LTE по уровням архитектуры сети

II. МЕТОДЫ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ LTE

а. Уровень абонентского устройства

Механизм прерывистого приёма DRX и его модификация C-DRX для режима с установленным соединением позволяют абонентскому устройству периодически прекращать мониторинг канала управления PDCCH при отсутствии нисходящего трафика [1]. Среднее энергопотребление устройства описывается упрощённой двухуровневой моделью «активное состояние / состояние сна»:

$$P_{avg} = \frac{T_{on}P_{on} + T_{sleep}P_{sleep}}{T_{on} + T_{sleep}}, \quad \rho_{sleep} = \frac{T_{DRX} - T_{on}}{T_{DRX}}, \tag{2}$$

где T_{on} и T_{sleep} – суммарная продолжительность пребывания устройства в активном состоянии и состоянии сна в течение одного цикла DRX; P_{on} и P_{sleep} – соответствующие уровни потребляемой мощности ($P_{sleep} \ll P_{on}$); ρ_{sleep} - доля времени цикла, приходящаяся на сон.

Из выражения (2) следует, что средняя мощность P_{avg} линейно убывает при увеличении ρ_{sleep}. Обратной стороной является рост средней задержки: с использованием аппарата теории массового обслуживания для систем с «отпусками сервера» вклад цикла DRX в задержку оценивается величиной $T_{DRX}/2$, то есть растёт линейно с удлинением цикла [2]. К достоинствам метода относятся существенное снижение энергопотребления устройства (по данным [3] – до 96,7 % относительно схемы без DRX), совместимость с существующей сигнализацией RRC и возможность адаптации параметров к характеру трафика, в том числе на основе прогнозирующих моделей машинного обучения [4]. Недостатки – увеличение задержки доставки пакетов, слабая адаптивность статического набора таймеров [5] и рост вычислительной сложности адаптивных схем.

Управление мощностью передачи восходящей линии связи (3GPP TS 36.213) реализует дробную компенсацию потерь на трассе с коэффициентом $\alpha \in [0; 1]$: при $\alpha < 1$ абонентам, находящимся вблизи базовой станции, разрешается передавать с существенно меньшей мощностью, что снижает как энергопотребление устройства, так и уровень создаваемых им межсотовых помех – ценой некоторого снижения достижимой скорости передачи для удалённых пользователей [11]. Ограничениями метода являются высокая вычислительная сложность нелинейной оптимизации, вероятность ошибок регулирования при быстро меняющихся условиях канала и дополнительная сигнальная нагрузка канала обратной связи.

б. Уровень сети радиодоступа

Технология eICIC, введённая в спецификации 3GPP LTE-Advanced (Release 10), обеспечивает временную координацию работы соседних сот за счёт использования «почти пустых» субкадров (Almost Blank Subframes, ABS) [6]. Отношение сигнал/(шум+помеха), достигаемое пользователем пикосоты в субкадрах, замалчиваемых макросотой, приближённо представимо как:

$$SINR_{pico} = \frac{P_{pico}\, g_{pico}}{N_0 + (1-\mu)\, P_{macro}\, g_{macro}}, \tag{3}$$

где $\mu \in [0; 1]$ – доля субкадров, передаваемых макросотой в режиме ABS.

При $\mu \to 1$ интерференция от макросоты в знаменателе стремится к N_0 и $SINR_{pico}$ резко возрастает; ценой такого выигрыша является пропорциональное сокращение доли ресурсов, доступных пользователям макросоты [7], - в этом и состоит основной компромисс технологии. Дополнительными недостатками являются необходимость сложной координации между территориально разнесёнными станциями и рост объёма служебной сигнализации.

Технология CoMP предполагает одновременное обслуживание абонентского устройства несколькими координированными базовыми станциями. Когерентное суммирование сигналов обеспечивает выигрыш в отношении сигнал/шум, однако требует дополнительных затрат мощности на синхронизацию и обмен данными по транспортной сети (backhaul):

$$EE_{CoMP} = \frac{R_{JT}}{N\, P_{BS} + P_{bh}}, \tag{4}$$

где N - число координируемых станций; P_{BS} - мощность, потребляемая одной базовой станцией; P_{bh} - эквивалентная мощность, затрачиваемая на функционирование транспортной сети.

Поскольку скорость совместной передачи R_{JT} растёт с увеличением N логарифмически, а знаменатель – линейно, предельная энергетическая эффективность кооперации снижается при увеличении её масштаба [8]. Адаптивное планирование радиоресурсов формально сводится к максимизации EE (формула (1)) при ограничениях QoS; совместный учёт состояния канала и параметров DRX

обеспечивает существенное дополнительное энергосбережение [3] ценой высокой вычислительной сложности и риска несправедливого распределения ресурсов между абонентами.

в. Архитектурный уровень

Многоантенные технологии MIMO и формирования диаграммы направленности повышают пропускную способность канала быстрее, чем логарифмически, без пропорционального роста излучаемой мощности, что положительно влияет на числитель метрики (1) [10]. Вместе с тем статическая составляющая мощности радиочастотных трактов растёт с числом антенных элементов, частично компенсируя полученный выигрыш, а реализация таких схем в компактных абонентских устройствах затруднена. Ретрансляционные узлы и малые соты сокращают расстояние между передатчиком и приёмником: для пико- и фемтосот статическая мощность P_0 на один-два порядка ниже, чем для макросот [12], что обеспечивает высокий уровень энергосбережения и улучшает покрытие внутри зданий. Однако при плотном развёртывании суммарная составляющая $N \cdot P_0$ может приводить к росту общего энергопотребления сети и требует управления возросшим уровнем межсотовой интерференции [13].

III. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Обобщённые результаты сравнительного анализа рассмотренных технологий приведены в таблице 1. Наибольший эффект энергосбережения на уровне абонентского устройства достигается при совместном использовании DRX и адаптивного планирования, учитывающего состояние канала и требования QoS [3]; при этом количественные оценки существенно варьируются в зависимости от допустимой целевой задержки и модели трафика. На уровне сети методы координации помех и малые соты обеспечивают умеренный либо высокий уровень энергосбережения при нейтральном или положительном влиянии на QoS, однако характеризуются высокой сложностью реализации: как следует из выражений (3) и (4), выигрыш для одной группы пользователей достигается ценой явного количественного проигрыша для другой. Полученные результаты согласуются с выводами обзорных работ по «зелёным» сетям связи, отмечающих отсутствие универсального решения и необходимость комплексного многоуровневого подхода [9, 10].

Таблица 1. Сравнительная оценка методов энергоэффективности LTE

Метод	Энергосбережение	Влияние на QoS	Сложность
DRX / C-DRX	Высокое	Среднее (задержки)	Низкая
Управление мощностью	Среднее	Низкое	Средняя
eICIC	Среднее	Низкое	Высокая
CoMP	Среднее	Положительное	Очень высокая
Адаптивное планирование	Среднее	Положительное	Высокая
MIMO / Beamforming	Косвенное	Положительное	Высокая
Small Cells / Relaying	Высокое	Положительное	Высокая

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Энергоэффективность сетей стандарта LTE обеспечивается комплексным применением методов на трёх уровнях: абонентского устройства (DRX/C-DRX, управление мощностью), сети радиодоступа (eICIC, CoMP, адаптивное планирование) и архитектуры развёртывания (MIMO/Beamforming, малые соты и ретрансляция). Ключевой особенностью всех рассмотренных решений является наличие компромисса между энергопотреблением, задержкой передачи данных и пропускной способностью сети; приведённые аналитические модели (1)-(4) позволяют формально обосновать природу этого компромисса и могут служить основой количественной оптимизации при проектировании сети. Выбор конкретного метода или их комбинации должен осуществляться с учётом сценария развёртывания, характеристик обслуживаемого трафика и допустимого уровня деградации QoS. Перспективным направлением дальнейших исследований является количественное сопоставление рассмотренных механизмов LTE с аналогичными решениями сетей пятого поколения 5G NR.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Bontu, C. S. DRX mechanism for power saving in LTE / C. S. Bontu, E. Illidge // IEEE Communications Magazine. 2009. Vol. 47, No 6. P. 48–55.

[2] Adaptive DRX scheme to improve energy efficiency in LTE networks with bounded delay / S. Herrería-Alonso [et al.] // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2016. Vol. 34, No 4. P. 2963–2973.

[3] Reducing power consumption in LTE data scheduling with the constraints of channel condition and QoS/ L.-P. Tung [et al.] // Computer Networks. 2014. Vol. 75, Part A. P. 149–159.

[4] Improved Connected-Mode Discontinuous Reception (C-DRX) power saving and delay reduction using ensemble-based traffic prediction / J.-H. Yu [et al.] // Mathematics. 2025. Vol. 13, No 6. Art. 974.

[5] A survey on DRX mechanism: device power saving from LTE and 5G New Radio to 6G communication systems / K.-H. Lin [et al.] // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2023. Vol. 25, No 1. P. 156–183.

[6] Enhanced inter-cell interference coordination for heterogeneous networks in LTE-Advanced: a survey / L. Lindbom [et al.] // arXiv preprint arXiv:1112.1344. 2011.

[7] Algorithms for enhanced inter-cell interference coordination (eICIC) in LTE HetNets / S. Deb [et al.] // IEEE/ACM Transactions on Networking. 2014. Vol. 22, No 1. P. 137–150.

[8] Fehske, A. J. Bit per Joule efficiency of cooperating base stations in cellular networks / A. J. Fehske, P. Marsch, G. P. Fettweis // IEEE GLOBECOM Workshops. Miami, FL, USA, 2010. P. 1406–1411.

[9] Hasan, Z. Green cellular networks: a survey, some research issues and challenges / Z. Hasan, H. Boostanimehr, V. K. Bhargava // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2011. Vol. 13, No 4. P. 524–540.

[10] A survey of energy-efficient techniques for 5G networks and challenges ahead / S. Buzzi [et al.] // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2016. Vol. 34, No 4. P. 697–709.

[11] Energy-efficient power control: a look at 5G wireless technologies / A. Zappone [et al.] // IEEE Transactions on Signal Processing. 2016. Vol. 64, No 7. P. 1668–1683.

[12] How much energy is needed to run a wireless network? / G. Auer [et al.] // IEEE Wireless Communications. 2011. Vol. 18, No 5. P. 40–49.

[13] Khirallah, C. Energy and cost impacts of relay and femtocell deployments in Long-Term-Evolution Advanced / C. Khirallah, J. S. Thompson, H. Rashvand // IET Communications. 2011. Vol. 5, No 18. P. 2617–2628.

[14] D.A. Davronbekov, U.T. Aliyev, Sh.U. Pulatov, J.D. Isroilov, F.X. Fayzullaev. Features of Technologies for Transmission of Radio and Television in 4G/5G Networks // ICISCT. DOI: 10.1109/ICISCT52966.2021.9670182

[15] Pulatov Sh.U., Aliyev U.T., Isroilov J.D. Energy harvesters wireless charging technology // ICISCT. DOI: 10.1109/ICISCT.2017.8188566

ENERGY-EFFICIENT METHODS AND TECHNOLOGIES OF LTE CELLULAR NETWORKS: ADVANTAGES AND DISADVANTAGES

Sh.U. Pulatov, E.O. Uzakbaev, J.J. Shavkatov

Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi, Tashkent, Uzbekistan, e.uzakbaev@tuit.uz

Abstract: key methods for improving the energy efficiency of LTE cellular networks standardized within the 3GPP project are systematized and comparatively analyzed. Discontinuous reception (DRX/C-DRX) and uplink transmit power control at the user equipment side, enhanced inter-cell interference coordination (eICIC), coordinated multi-point (CoMP) transmission and adaptive radio resource scheduling at the network side, as well as MIMO/beamforming, relaying and small-cell architectures are considered. Analytical models of power consumption, SINR and energy efficiency are given for each group of methods, formally justifying their advantages and disadvantages. All the reviewed solutions are shown to operate under a trade-off between energy consumption, delay and network throughput.

Keywords: LTE; energy efficiency; DRX; eICIC; CoMP; MIMO; small cells.