

КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ KPI СЕТИ СОТОВОЙ СВЯЗИ LTE ОТ ПАРАМЕТРОВ РАДИОИНТЕРФЕЙСА В КОНТЕКСТЕ ЗАДАЧ САМООПТИМИЗАЦИИ

Гридасова А.А., Дэльф Н.Р., аспирант
Белорусская государственная академия связи,
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Карпук А.А. – к.т.н., доцент

Аннотация. В работе исследован метод интеллектуальной самооптимизации сетей LTE на основе формирования многомерного набора признаков радиointерфейса. Подход базируется на декомпозиции параметров физического уровня и их сопоставлении с показателями качества обслуживания. Применение расширенного вектора признаков в нейросетевых моделях позволяет трансформировать реактивный мониторинг в систему упреждающей диагностики причин сбоев. Предложенный подход автоматизирует функции управления покрытием, балансировки нагрузки и мобильности, обеспечивая превентивное устранение дефицита емкости и аномалий связи для поддержания стабильно высокого качества телекоммуникационных услуг.

Ключевые слова: LTE, самоорганизующиеся сети, машинное обучение, вектор признаков, самооптимизация, радиointерфейс.

Введение. Оценка состояния современных сетей сотовой связи стандарта LTE требует комплексного подхода, учитывающего как физические параметры радиоканала, так и показатели качества обслуживания абонентов. В работе [1] представлена классификация состояний сот, базирующаяся на ключевых показателях эффективности (KPI). Для глубокой автоматизации управления сетью необходимо выявить устойчивые корреляции между индикаторами качества и физическими параметрами радиointерфейса согласно спецификациям 3GPP [2, 3].

Существует объективный разрыв между тем, как работу сети воспринимает абонент (через призму задержек и скоростей передачи данных), и процессами, происходящими на физическом уровне (изменение мощности сигнала, интерференция, запас мощности терминала). Для преодоления этого разрыва необходимо формализовать функциональные связи между группами данных, что позволит алгоритмам машинного обучения не только фиксировать деградацию сети, но и математически точно определять её первопричины [4].

Структурирование параметров радиointерфейса для задач машинного обучения. В работе реализован последовательный алгоритм анализа, который связывает сформированное пространство признаков с показателями качества обслуживания, регламентированными ТНПА Республики Беларусь [5, 6]. Исследование проводилось в три этапа: декомпозиция, корреляционный анализ и функциональный синтез.

На первом этапе декомпозиции сложная структура радиointерфейса LTE была разделена на составляющие компоненты (мощность, интерференция, нагрузка, временные задержки). Это позволило выделить 15 первичных параметров, которые служат основой для формирования входного вектора модели $X = \{x_1, \dots, x_{15}\}$ [2, 3]. Параметры сгруппированы по функциональным признакам:

- Энергетические показатели (x_1, x_5, x_6): характеризуют параметры радиolini и уровень внешних помех.
- Ресурсные показатели (x_3, x_4, x_7, x_9): отражают эффективность использования частотно-временной сетки и спектральную эффективность.
- Сигнальные и протокольные показатели ($x_8, x_{12}, x_{13}, x_{15}$): описывают стабильность логических соединений и интенсивность процедур восстановления данных.

Выбор данных параметров обусловлен их способностью описывать состояние физического и канального уровней ($L1/L2$) с дискретностью, достаточной для обучения нейросетевых моделей.

На втором этапе корреляционного анализа устанавливалась зависимость каждого параметра с группами услуг и показателями KPI, закрепленными в ТНПА [7]. Выбор конкретных взаимосвязей (например, влияние RSRQ и SINR на надежность соединения) базируется на физике распространения радиоволн и логике работы протоколов управления радиоресурсами (RRM). Параметры группировались по принципу их прямого влияния на пользовательский опыт: так, параметры доступа (RACH, PRR) напрямую определяют вероятность установления соединения (KPI1, KPI2), в то время как параметры емкости (PRB, MCS) лимитируют пропускную способность.

На этапе синтеза сформирована матрица взаимосвязей (Таблица 1), которая объединяет разрозненные физические показатели в единую аналитическую структуру. Такая систематизация необходима для того, чтобы модель машинного обучения могла проследить цепочку от деградации конкретного KPI до физической первопричины в радиоканале. Это позволит не только классифицировать текущее состояние сети, но и перейти к реализации сценариев проактивного управления, где управляющее воздействие формируется на основе изменения вектора X .

Таблица 1 - Матрица взаимосвязи параметров радиointерфейса LTE и показателей качества

Группа признаков	Параметр (Признак x_n)	KPI	Механизм влияния
------------------	---------------------------	-----	------------------

Покрывтие (Coverage)	x_1 : RSRP (Reference Signal Received Power); x_5 : RSRQ (Reference Signal Received Quality); x_{11} : TA (Timing Advance)	KPI1, KPI3, KPI6	Низкий RSRP при большом TA (дистанция) указывает на физическую границу соты.
Качество (Quality)	x_2 : SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio); x_6 : RSSI (Received Signal Strength Indicator); x_{14} : HO (Handover Success Rate)	KPI14, KPI3, KPI17	Низкий SINR при высоком RSRQ и проблемах хендовера (x_{14}) – признак интерференции.
Емкость (Capacity)	x_3 : CQI (Channel Quality Indicator); x_4 : PRB (Physical Resource Block Utilization); x_7 : MCS (Modulation and Coding Scheme); x_9 : TBS (Transport Block Size)	KPI9, KPI11, KPI12, KPI13	Комбинация низкого MCS и высокой утилизации PRB ($x_4 > 80\%$) предсказывает падение скорости
Надежность (Reliability)	x_8 : BLER (Block Error Rate); x_{12} : HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request); x_{13} : RLC (Radio Link Control Retransmissions)	KPI4, KPI5, KPI8	Высокий BLER и число ретрансмиссий (x_{12}) ведут к деградации голосовой связи (MOS) и потере пакетов.
Доступ (Access)	x_{10} : PHR (Power Headroom Report); x_{15} : RACH (Random Access Channel Success Rate)	KPI1, KPI2, KPI10	Отрицательный PHR (x_{10}) при сбоях RACH (x_{15}) указывает на ограничение доступа в Uplink

Формирование представленной модели определяется рядом ключевых факторов:

- Идентификация аномальных состояний. В рамках предложенного подхода любое отклонение сетевых характеристик от требований национальных стандартов (например, падение пропускной способности ниже целевых порогов ТНПА) интерпретируется как аномальное состояние. Использование вектора признаков X позволяет перевести качественные описания проблем (интерференция, перегрузка, «дыры» в покрытии) в строгое математическое пространство. Это создает условия для применения алгоритмов классификации (Support Vector Machines, Random Forest или нейронных сетей), которые способны с высокой точностью идентифицировать тип деградации на основе детерминированной совокупности параметров радиointерфейса.

- Упреждающая диагностика. Ключевой особенностью модели является использование опережающих индикаторов. Ряд параметров радиointерфейса, таких как коэффициент блочных ошибок (BLER) и отчет о запасе мощности терминала (PHR), начинают демонстрировать негативную динамику задолго до того, как произойдет фактическое падение интегральных KPI (например, прерывание вызова или сбой загрузки данных). В этом контексте вектор X выступает в роли предиктора: он обеспечивает обнаружение признаков деградации на ранних стадиях, позволяя алгоритмам самооптимизации инициировать корректирующие воздействия до фактического снижения качества обслуживания абонентов.

- Интерпретируемость моделей. Совместное использование признаков X и регламентированных показателей KPI обеспечивает прозрачность принимаемых решений: изменение параметра x_n обосновывается необходимостью возвращения показателя KPI_m в допустимые пределы.

Заключение. Установленная взаимосвязь параметров радиointерфейса и сетевых KPI формирует аналитическую основу для дальнейших этапов работы. Подготовленная структура данных обеспечивает переход от констатации состояния сети к факторному анализу. Это создает условия для внедрения механизмов самооптимизации (SON), функционирующих в соответствии с требованиями национальных стандартов качества телекоммуникационных услуг.

Список использованных источников:

1. Карпук, А. А. Классификация состояния сот сетей сотовой связи стандарта LTE / А. А. Карпук, А. А. Гридасова, Н. Р. Дэльф // *Вестник связи*. – 2025. – № 6. – С. 60–64.
2. 3GPP TS 36.214. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer; Measurements (Release 15). – Technical Specification Group Radio Access Network [Электронный ресурс]. – 2018. – URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136200_136299/136214/15.02.00_60/ts_136214v150200p.pdf (дата обращения: 15.02.2026).
3. 3GPP TS 36.331. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC); Protocol specification (Release 15). – Technical Specification Group Radio Access Network [Электронный ресурс]. – 2019. – URL https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136300_136399/136331/15.19.00_60/ts_136331v151900p.pdf. (дата обращения: 15.02.2026).
4. Holma, H. LTE for UMTS: Evolution to Photonic LTE-Advanced / H. Holma, A. Toskala. – Second Edition. – Chichester : John Wiley & Sons, Ltd, 2011. – 544 p.
5. Услуги сотовой подвижной электросвязи. Требования к качеству и методы контроля. СТБ 1904-2022. – Минск: Госстандарт: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2022. – IV, 25с.
6. Параметры и показатели качества услуг сотовой подвижной электросвязи // Хваля. [Электронный ресурс]. – URL: <https://xn--80ad2a0b1c.xn--90ais/quality-indicators/> (дата обращения: 25.02.2026).
7. Papidas, A.G. Self-Organizing Networks for 5G and Beyond: A View from the Top / Andreas G. Papidas, A.G. George C. Polyzos // *Future Internet, MDPI* – 2022. - vol. 14(3). – P. 1-30.