



基于 AI 的全场景智能基站节电系统设计与实现

赵伟¹, 李贝², 孟宁³, 王廷伟¹, 林俊钊¹, 陈乐¹, 胡煜华¹, 杨汉源¹

(1. 中国联合网络通信有限公司浙江省分公司, 浙江 杭州 310051;

2. 中国联合网络通信有限公司研究院, 北京 100048;

3. 中国联合网络通信集团有限公司, 北京 100033)

摘要: 在集约化网络的建设背景下, 如何实现自动化、智能化、保体验的基站能耗管理, 成为当前运营商的运营管理痛点。创新地提出一种全智能检测、全场景建模、全流程自助的 3G/4G/5G 智能基站节电方案, 通过动态时间规整算法区分覆盖场景, 利用 SARIMA 模型预测时间框构建自适应模型, 实时监控指标保证用户感知, 自动下发节电策略, 短信告警及时拉起。在用户无感知的情况下, 实现小区粒度级最大限度节约基站能耗。该方法已在某省网络试点推行, 试点区域单站平均节电效率可达 9.24% 每日, 具备实际生产指导意义。

关键词: 基站节能; SARIMA; 流量预测; 5G

中图分类号: TN914

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022169

Design and implementation of AI-based all-scenario intelligent base station power-saving system

ZHAO Wei¹, LI Bei², MENG Ning³, WANG Tingwei¹, LIN Junfan¹, CHEN Le¹, HU Yuhua¹, YANG Hanyuan¹

1. Zhejiang Branch of China United Network Communication Co., Ltd., Hangzhou 310051, China

2. Research Institute of China United Network Communications Co., Ltd., Beijing 100048, China

3. China United Network Communication Group Co., Ltd., Beijing 100033, China

Abstract: In the context of intensive network construction, how to realize automatic, intelligent, and experience-guaranteed base station energy consumption management has become a pain point for current operators in operation management. A 3G/4G/5G smart base station power saving solution with full intelligent detection, full-scenario modeling, and full-process self-service was innovatively proposed. The coverage scene was distinguished by a dynamic time warping algorithm, and the SARIMA model was used to predict the time frame to build the model dynamically. Monitoring indicators ensured quality of experience, automatically issue power-saving strategies, and promptly raise SMS alerts. In the case that the user had no perception, the energy consumption of the base station was saved to the greatest extent at the cell granularity level. This method had been implemented on a pilot study in a province. The average annual power saving efficiency of a single station in the pilot area can reach 9.24% per day per station, which can be put in actual production.

Key words: base station energy saving, SARIMA, traffic prediction, 5G

收稿日期: 2022-02-18; 修回日期: 2022-07-15

通信作者: 李贝, libei@chinaunicom.cn



0 引言

在 4G 网络逐步向 5G 基站牵引的背景下,不断增长的网络业务需求及流量需求使得基站能耗节节攀升。为响应国家集约化绿色网络的建设要求,如何提升基站节能效率成为运营商当前亟须解决的问题。依据设备规格与负载水平的不同,5G 基站每小时的耗电约 2.5 度,3G 或 4G 基站则在 1~2 度,其主要能耗集中在基站的有源天线单元上。现行基站节能方案也大多针对该设备进行节能,对夜间低能耗站点采取一刀切直接下电的方式进行。在实际生产中,该方案存在以下不足。

- 人工成本高。当前需要人工进行节能时间配置与调整,操作时对运维工程师的一线经验和专业水平要求较高。
- 节电策略单一。现有的节电方案通常为千站一策,即运营商对批量基站设置统一的节能时间段,无法在不同覆盖场景和不同业务需求下进行差异化节电。
- 无法适应动态网络环境。一旦基站下电后便无法获取站点附近的用户情况,无法应对突发性业务和流量波动,基站恢复存在滞后性,易出现聚集性投诉风险。
- 难以平衡用户体验与节能需求。在实际节电时,考虑用户感知,节电时间的参数设置通常相对保守,难以挖掘得到基站的最大节能空间。

1 智能节电建模

为实现节能策略的动态化,需要对基站的业务流量进行预测,以便在低能耗时段进行节能。当前常见做法是将基站的历史流量数据转换为不同的算法进行求解,包括传统时序算法、机器学习和深度学习算法 3 种,各有利弊。

(1) 传统时序算法

将业务流量预测转换为时序预测模型进行建

模是最为常见的算法。典型的时间序列预测方法包括整合移动平均自回归模型 (autoregressive integrated moving average model, ARIMA)、Holt-Winters 等。此类算法对周期波动明显的单一时间序列进行预测时预测效果较好,但难以适应周期波动不明显的时序或区域突发流量。

(2) 机器学习回归算法

通过构造时间特征可将流量预测问题转化回归问题,继而使用如支持向量机 (support vector machine, SVM) 和梯度提升算法 (如 XGBoost) 等机器学习算法进行预测。该类算法对时间序列中的非线性因素适应较好,但对训练样本的要求较高且实际预测精度偏低。

(3) 深度学习算法

循环神经网络 (recurrent neural network, RNN) 或长短期记忆 (long short term memory, LSTM) 网络等深度学习模型能够快速适应不稳定的时间序列。但受限于模型本身特性,其建模效率较低。此外,基于序列的神经网络更关注与上一刻的业务流量情况,易累积预测误差导致最终结果偏差过大。

从时域特征上看,受地理位置、无线环境、周围人流及活动等多重因素影响,现网基站的流量波动整体呈周期性变化,但偶有突发性扰动。从空域特征上看,基站的覆盖场景各不相同,存在单站覆盖区域、多制式共站、多制式同覆盖等多种情况,不同情况的流量分担方式也不同。因此,对比上述算法后,文中提出一种先用动态时间规整 (dynamic time warping, DTW) 算法进行聚类,再用不同参数的季节性整合移动平均自回归模型 (seasonal autoregressive integrated moving average, SARIMA) 对各类基站分别建模来进行节电时间窗预测的算法。

DTW 聚类算法通过动态规划思想提取两个不同时间序列的相似性,进而对时间序列进行聚类。假设有两个长度分别为 m 和 n 的时

间序列, 如式 (1):

$$\begin{aligned} X &= [X_1, X_2, X_3, \dots, X_m] \\ Y &= [Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n] \end{aligned} \quad (1)$$

则两个序列可构建一个 $m \times n$ 的矩阵, 通过动态规划可找出该矩阵的最小累积路径 $\gamma(i, j)$, 如式 (2):

$$\begin{aligned} \gamma(i, j) &= d(X_i, Y_j) + \min\{\gamma(i-1, j-1), \\ &\gamma(i-1, j), \gamma(i, j-1)\} \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $d(X_i, Y_j)$ 代表矩阵内任意两点的距离。两个时间序列的相似度即可用 $\gamma(i, j)$ 表示, 则对于 n 个时间序列来说, 需找到使得总相似度最小的聚类结果, 以便将具有相似时序波动的小区聚类在一起。

SARIMA 模型是基于 ARIMA 模型之上, 将时间序列看作依赖时间 t 的随机变量, 通过数据模型解析历史序列的自相关性、平稳性以及季节性来预测未来的数据。假设将某特定长度为 T 的 d 阶非平稳时间序列描述为 $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_T$ 。对 $Y_t \in \mathbb{R}$, ARIMA 模型可表示为:

$$\phi(\mathcal{L})\nabla^d Y_t = \theta(\mathcal{L})\epsilon_t \quad (3)$$

其中, $\nabla^d Y_t$ 代表经 d 阶差分后的平稳时间序列, $\phi(\mathcal{L}) = 1 - \phi_1 \mathcal{L} - \dots - \phi_p \mathcal{L}^p$ 是自回归项数为 p 的多项式, $\theta(\mathcal{L}) = 1 + \theta_1 \mathcal{L} + \dots + \theta_q \mathcal{L}^q$ 是滑动平均项数为 q 的多项式。 ϵ_t 表示零均值白噪声序列, 可记为 $\text{ARIMA}(p, d, q)$ 。由于非平稳时间序列 Y_t 中的季节性分项无法被普通的差分项消除, SARIMA 模型在式 (1) 的基础上重新计算了季节性算子, 见式 (4):

$$\Phi(\mathcal{L}^s)\phi(\mathcal{L})\nabla^d \nabla_s^D Y_t = \Theta(\mathcal{L}^s)\theta(\mathcal{L})\epsilon_t \quad (4)$$

其中, $\nabla_s^D Y_t$ 代表经 d 阶差分 and s 阶季节性差分后的平稳时间序列, $\Phi(\mathcal{L}^s) = (1 + A_1 \mathcal{L}^s)(1 + A_2 \mathcal{L}^s) \dots (1 + A_p \mathcal{L}^s)$ 是自回归项数为 p 的系数为 A 多项式, $\Theta(\mathcal{L}^s) = (1 + B_1 \mathcal{L}^s)(1 + B_2 \mathcal{L}^s) \dots (1 + B_q \mathcal{L}^s)$ 是滑动平均项数为 q 的系数为 B 的多项式。 ϵ_t 表示零均值白噪声序列, 可记为 $\text{SARIMA}(p, d, q)(P, D, Q)$ 。通过对不同类别的基站采取不同的参数分别建模, 可缩小业务量预测误差。

2 智能节电系统

智能节电系统模块如图 1 所示, 本项目搭建在 Windows 服务器上, 采用 Python 作为主要编程语言, 基于 DTW 和 SARIMA 算法完成模型构建, 通过北向接口进行节能操作的指令下发, 后台使用 MySQL 承接操作日志, 通过五大功能模块实现基站智能节电闭环系统。

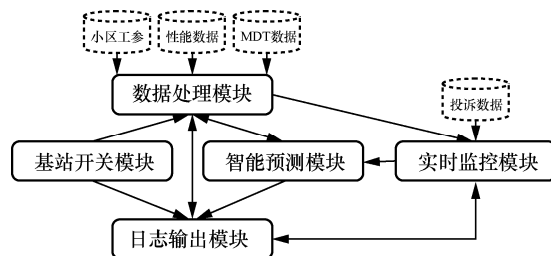


图1 智能节电系统模块

2.1 数据处理模块

为进行智能节电预测, 系统需获取以下不同时间粒度的数据作为基站监控数据源以及节电操作时进行干预决策的参考指标。智能节电系统数据源清单见表 1。

表 1 智能节电系统数据源清单

数据类型	时间粒度	数据来源	数据作用
3G 实时性能数据	30 min	自动采集	监控指标, 判断是否需要干预操作
4G 实时性能数据	15 min	自动采集	监控指标, 判断是否需要干预操作
5G 实时性能数据	15 min	自动采集	监控指标, 判断是否需要干预操作
操作日志	天	由智能预测模块输出	指定每日开关计划, 确定每日开关站时间点、监控时间段
小区工参	天	自动采集	获取小区同站情况, 查看关闭某基站后需要监控的 3G/4G/5G 基站
MDT 数据	天	自动采集	获取小区同覆盖情况作为略选择依据, 在需要进行基站能否操作/进行何种操作



其中,采集待预测时间 7 天内的全量 3G/4G/5G 基站性能数据后,可供智能预测模块进行节电时间窗口预测。采集小区工参和 MDT 数据并处理后,可生成某站点关闭后对应的切换基站 (cell to cell) 清单,供实时监控模块判决是否需要恢复操作以及进行何种恢复操作。

2.2 智能预测模块

智能预测模块是智能节电系统的“核心”模块,其具体工作步骤如下。

步骤 1 数据聚类。若各基站单个小区的业务量可表示为时间序列 Y ,将对全网基站下小区的业务量 $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_N$ 进行 DTW 算法聚类。聚类个数 n 可自行设置。经实验,本文中聚类个数最终设置为 3,则全量小区可分为 C_1 、 C_2 、 C_3 共 3 类。

步骤 2 超参选择。分别从 C_1 、 C_2 、 C_3 聚类结果中选出 100 个小区,并针对这 100 个小区使用 SARIMA(p, d, q)(P, D, Q) 模型进行 20 轮模型预训练,获取使得总评价指标信息准则 (Akaike information criterion, AIC) 最优的超参组合,并输出到最优超参字典中,即

$\{C_1 | p_1, d_1, q_1, P_1, D_1, Q_1\}$, $\{C_2 | p_2, d_2, q_2, P_2, D_2, Q_2\}$, $\{C_3 | p_3, d_3, q_3, P_3, D_3, Q_3\}$ 。

步骤 3 模型训练。遍历全网所有小区,进行口碑场景级分析,根据其聚类结果,从最优超参字典中找到对应的超参组合,将这个超参组合放入 SARIMA(p, d, q)(P, D, Q) 中进行模型训练,训练完成后的业务流量趋势预测结果如图 2 所示。

步骤 4 模型输出。通过计算序列的统计置信区间 3-sigma 区间 ($\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma$) 得到该站业务量正常区间的上限值和下限值。其中, μ 为序列的均值,为序列的标准差。结合一线的实际经验,可认为当前时刻业务量落在 ($0, \mu - 3\sigma$) 时为低能耗时刻。确定每日关站门限后,将低能耗时间段对应小区粒度,并结合小区覆盖特性,在保障感知的前提下,采取以下不同的节电策略。

(1) 00:00—06:00 时段

采用小区符号关断;若小区完全无流量/话务量产生,则直接采用激活/去激活策略。

(2) 非 00:00—06:00 时段

- 若存在多制式同覆盖场景,则用 3G 小区作

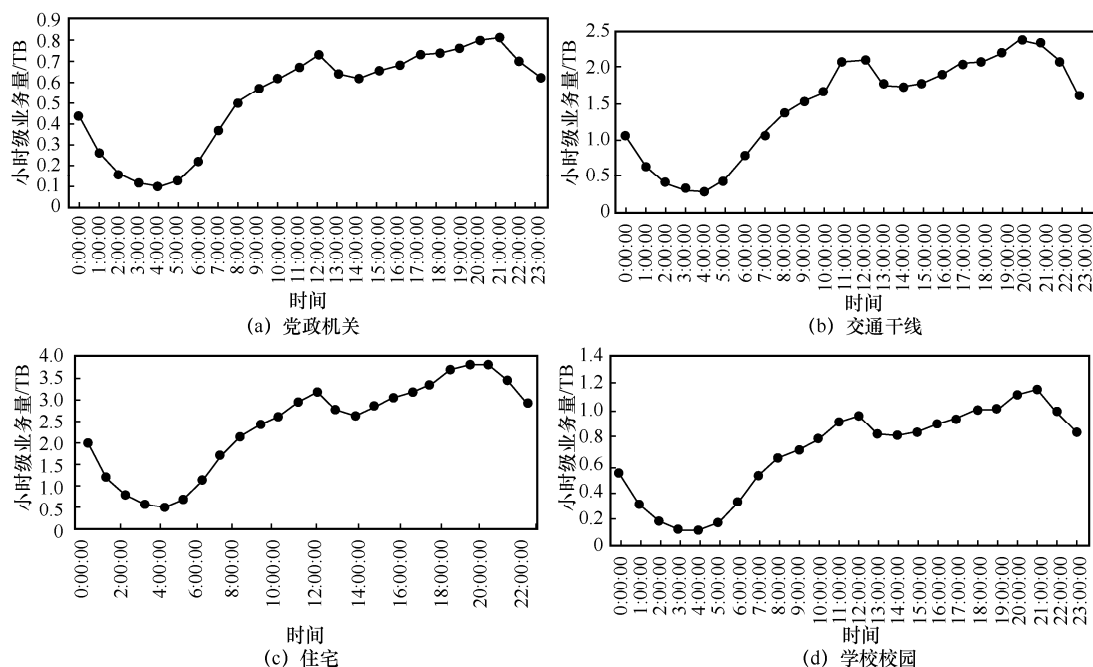


图 2 SARIMA 模型业务预测结果示例

为覆盖打底网络保障用户感知,对 4G/5G 高制式小区进行节电;

- 当基站载波带宽 ≥ 20 MHz,采取射频通道关断策略;
- 若频段为 LTE 1 800 MHz 或 LTE 900 MHz,采用载波关断策略;
- 无法使用射频通道关断和载波关断,则采用符号关断策略。

步骤 5 生成每日任务。在完成建模和节电策略判定后,数据结构需要进行重组,生成每日每个节电时间点需要开关的基站清单,并将一天的时间切分成若干个需要监控的时间段和该时间段内需要监控的基站小区清单,供后续基站开关模块和实时监控模块执行使用。

步骤 6 反馈调整。在每一轮基站开关模块实施调度过程中,可能会监控到误节能现象,即在模型预测需关站的时间段内,基站存在流量压抑现象。因此,在重复步骤 1~步骤 5 进行新一轮模型预测之前,系统会读取日志输出模块生成的调度日志,利用上一轮产生偏差来反馈调节模型,以助于缩小下一周期预测业务量的误差。

需要注意的是,在实际运行中,从数据处理模块采集数据到完成本模块前序的步骤 1~步骤 4 均需要占用一定的计算时间。在该计算真空期内,基站开关模块无法获得任何指令数据,导致每日有一段时间无法对基站进行操作。针对该情况,本系统在不增加算力资源的情况下,分上下各半天进行模型训练。举例来说,在 T 日上午半(当

日 12:00 前)获取 $[T-5,T]$ 的下半天实时数据(12:00-24:00)进行训练预测得出 T 日下午半(12:00-24:00)的指令时间点。在 T 日下午半(当日 12:00 前)获取 $[T-5,T]$ 的上半天实时数据(00:00-12:00)进行训练预测得出 $T+1$ 日上午半(00:00-12:00)的指令时间点。这样就保证了在运行过程中没有真空期,基站开关模块能实时对基站进行操作。

2.3 基站开关模块

接收每日开关任务,根据每日的开机时间点、关机时间点以及开机清单和关机清单,在对应时间点通过北向接口下达指令打开或关闭对应的基站。在每次下达指令、操作基站或出现异常时都需进行日志输出。

2.4 实时监控模块

实时监控示意图如图 3 所示,一旦开启节能后,将无法获取被节电基站的业务量。为了在发生业务量突增时及时停止节电,减少对用户感知的影响,需在开启节能后同时观测承接该节电基站业务量的周边小区的业务量波动情况。基于小区工参和 MDT 数据,可从数据处理模块获取某站点关闭后对应的切换基站(cell to cell)清单。

根据需要监控的时间段和每个时间段内的监控基站清单,实时观测这部分承接基站的 3G/4G/5G 的业务流量数据及投诉数据。结合实际情况,若当前节电时刻为 T ,则观测当前节电时刻 $[T-2,T]$ 的业务量,即对 3G 站点观测其前两个 30 min 业务量数据,对 4G/5G 站点观测其前两

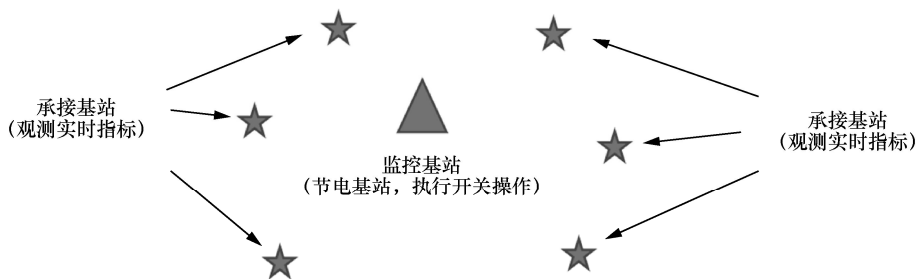


图3 实时监控示意图



个 15 min 的业务量数据。当因基站压力过大、流量激增等原因发生异常时,利用是否发生异常流量增长或突发区域性投诉来进行异常判定,必要时通过北向接口开启监控基站,及时恢复基站覆盖供用户正常使用。若持续出现问题或发生指令操作异常,则发送短信告警给运维人员进行人工干预。实时监控流程如图 4 所示。

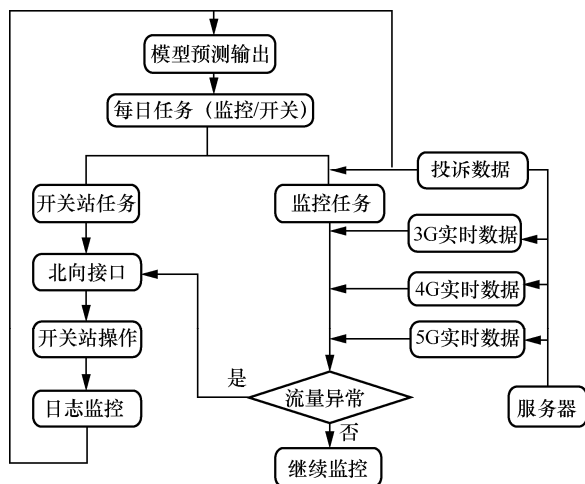


图 4 实时监控流程

2.5 日志输出模块

每次下达指令、操作基站或出现异常时都需要进行日志输出,输出内容包括操作日期、时间、操作指令、操作类型、操作基站 ID、操作基站名称、操作小区 ID、操作小区名称、指令是否下发成功、操作结果等。所有操作日志统一存储至 MySQL 数据库,便于智能预测模块进行反馈调整。此外,当系统发生异常故障时,可通过存储的日志快速定位问题。

3 指标评价

为评估本文算法在实际生产环境的预测能力,假设某节电基站为 X_1 ,在对其进行节电操作后,承接其业务量的基站为 $X_2, X_3, \dots, X_n$ 。通过对比承接站点在承接前后的业务量增长是否超过给定门限的 5% 来判定节电是否准确。小区的节电

准确率可表示为 $\frac{T_{\text{正确节电时长}}}{T_{\text{节电总时长}}}$ 。

4 模型效果验证

本文系统在某省会主城区进行 14 天的试点。使用本文所提出的算法,共试点 85 个小区,其中在试点期内进行节电操作的小区为 60 个,节电操作率为 71%。

试点期间,采取符号关断 604.18 h,采取通道关断 660.77 h,采取载波关断 331.73 h,总计节电时长 1 596.68 h。节电判定正确时长为 1 504 h,节电准确率为 94.2%。试点区域单站平均年节电效率可达 9.24%/站/日。试点期间所选区域未出现网络感知明显波动,未发生相关感知投诉,节电指令关闭与开启未出现异常。智能节电系统试点前后节电时长对比见表 2,本文所提算法在该区域的节电量为试点前凌晨下电方案的 1.5 倍。

表 2 智能节电系统试点前后节电时长对比

节电方案	节电小区个数	总节电时长/h
传统低能耗时段下电	35	1 080
智能节电系统	60	1 596.68

5 结束语

本文描述了一种基于通过动态时间规整算法和 SARIMA 分覆盖场景构建预测节电的方法,相较于传统在低能耗时段一刀切下电的方法,本文所提的智能节电系统一方面可以准确地预测节电时间窗,节电量是传统方法的 1.5 倍,区域节电效率平均可达 9.24%/站/日,最大程度地挖掘了基站节电潜能;另一方面,通过构建从数据拉取、制定策略、指令下发、监控反馈的全流程自助闭环系统,监控同期客服投诉情况作为辅助评估,有效降低了节电对用户感知的影响。本文所述方法已在某沿海×省成功试点,实时性及准确性均较高,可有效降低人工成本,具有良好的推广性与复制性。

参考文献:

[1] 吕婷,张猛,曹亘,等. 5G 基站节能技术研究[J]. 邮电设计

- 技术, 2020(5): 46-50.
- LYU T, ZHANG M, CAO G, et al. Research on energy saving technology of 5G base station[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2020(5): 46-50.
- [2] 徐丹, 曾宇, 孟维业, 等. AI 使能的 5G 节能技术[J]. 电信科学, 2021, 37(5): 32-41.
- XU D, ZENG Y, MENG W Y, et al. AI-enabled 5G energy-saving technology[J]. Telecommunications Science, 2021, 37(5): 32-41.
- [3] 宋玉利, 李东晓, 武占生. 基站主设备智能节电技术探讨[J]. 邮电设计技术, 2010(3): 70-73.
- SONG Y L, LI D X, WU Z S. Discussion on smart power saving technology of BTS[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2010(3): 70-73.
- [4] NOBRE F F, MONTEIRO A, TELLES P R, et al. Dynamic linear model and SARIMA: a comparison of their forecasting performance in epidemiology[J]. Statistics in Medicine, 2010, 20(20):3051-3069.
- [5] 赵文涛, 徐刚. 智能节电技术研究[J]. 邮电设计技术, 2018(2): 40-45.
- ZHAO W T, XU G. Study on intelligent electricity saving technology[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2018(2): 40-45.
- [6] CHAOVALITWONGSE W A, PARDALOS P M. On the time series support vector machine using dynamic time warping kernel for brain activity classification[J]. Cybernetics and Systems Analysis, 2008, 44(1): 125-138.
- [7] 徐金炉, 严海波, 孙琳. 移动通信基站节能减排解决方案[J]. 邮电设计技术, 2008(12): 57-59.
- XU J L, YAN H B, SUN L. Solution of saving energy and reducing emissions in mobile communication base station[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2008(12): 57-59.
- [8] 黄成龙, 杨文鹏. 移动通信基站节能控制的理论与实践[J]. 西安工程大学学报, 2008, 22(2): 205-209.
- HUANG C L, YANG W P. Theory and practice on energy saving in mobile communication base station[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2008, 22(2): 205-209.
- [9] 陈戈林, 苏智铭. 基站能耗体系模型分析与节能实践[J]. 邮电设计技术, 2012(9): 22-27.
- CHEN G L, SU Z M. Analysis of base station energy consumption system model and energy saving practice[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2012(9): 22-27.
- [10] 张守国, 张建国, 李曙海, 等. LTE 无线网络优化实践[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014: 24-26.
- ZHANG S G, ZHANG J G, LI S H, et al. LTE wireless network optimization practice[M]. Beijing: Posts&Telecom Press, 2014:24-26.
- [11] 周明千, 曹涛, 陈燕昌. 通信机房开关电源系统节能方案浅析[J]. 邮电设计技术, 2018(5): 86-89.
- ZHOU M Q, CAO T, CHEN Y C. Analysis of energy saving scheme of switching power supply system for communication stations[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2018(5): 86-89.
- [12] 董宏. 电信移动基站节能减排思路探讨[C]//通信电源新技术论坛——通信电源学术研讨会. 2010.
- DONG H. Discussion on energy saving and emission reduction of telecom mobile base station[C]// Proceedings of New Technology Forum of Communication Power Supply -- Academic Seminar of Communication Power Supply. 2010.
- [13] 景洪水. 基于网络参数的 5G 终端节能优化研究[J]. 邮电设计技术, 2020(8): 34-37.
- JING H S. Research on energy saving optimization of 5G terminal based on mobile network parameters[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2020(8): 34-37.
- [14] 林雨浓, 王昕, 李伟. 基于自组织网络的 LTE 基站节能优化解决方案[J]. 邮电设计技术, 2018(5): 50-54.
- LIN Y N, WANG X, LI W. LTE base station energy saving optimization solution based on self-organized network[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2018(5): 50-54.
- [15] 张小林, 廖章君, 曹磊, 等. 基于移动互联网的端到端移动用户感知评估研究[J]. 现代电信科技, 2012, 42(11): 73-76.
- ZHANG X L, LIAO Z J, CAO L, et al. Study on evaluation of end-to-end user perception based on mobile Internet[J]. Modern Science & Technology of Telecommunications, 2012, 42(11): 73-76.
- [16] 李凤花, 朱洪, 马云刚. 基于 AI 的 5G 网络节能方案研究[J]. 山东通信技术, 2021, 41(4): 19-22+43.
- LI F H, ZHU H, MA Y G. Research on AI-based 5G network energy saving scheme[J]. Shandong Communication Technology, 2021, 41(4): 19-22+43.
- [17] 官磊, 丁洋, 李锐杰, 等. 面向“双碳”的 5G 网络节能技术[J]. 电信科学, 2022, 38(4): 167-174.
- GUAN L, DING Y, LI R J, et al. "Dual-carbon" 5G network energy saving technology[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(4): 167-174.
- [18] 罗新军, 徐步阳. 广电 5G 网络节能技术解决方案[J]. 电信工程技术与标准化, 2022, 35(1): 10-13.
- LUO X J, XU B Y. 5G network energy-saving technical solutions for broadcasting and television [J]. Telecommunications Engineering Technology and Standardization, 2022,35(1):10-13
- [19] 徐丹, 曾宇, 孟维业, 等. AI 使能的 5G 节能技术[J]. 电信科学, 2021, 37(5): 32-41.

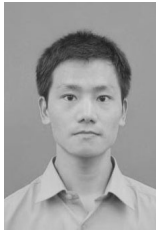


XU D, ZENG Y, MENG W Y, et al. AI-enabled 5G energy-saving technology [J]. Telecommunications Science, 2021, 37(5): 32-41.

[20] 鲁垚光, 王兴伟, 李福亮, 等. 软件定义网络中的动态负载均衡与节能机制[J]. 计算机学报, 2020, 43(10): 1969-1982.

LU Y G, WANG X W, LI F L, et al. Dynamic load balancing and energy saving mechanism in software defined networks[J]. Journal of Computer, 2020, 43(10): 1969-1982.

[作者简介]



赵伟 (1982-), 男, 中国联合网络通信有限公司浙江省分公司工程师, 主要研究方向为网络优化、大数据及人工智能在移动通信中的应用。

李贝 (1983-), 女, 中国联合网络通信有限公司研究院高级工程师, 主要研究方向为网络智能运营。

孟宁 (1979-), 男, 中国联合网络通信集团有限公司高级工程师, 主要研究方向为重点场景专项优化。

王廷伟 (1985-), 男, 中国联合网络通信有限公司浙江省分公司工程师, 主要研究方向为移网网络规划和优化, 以及数字化前沿技术在移动通信中的应用。

林俊钊 (1996-), 男, 中国联合网络通信有限公司浙江省分公司高级工程师, 主要研究方向为大数据及人工智能在移动通信中的创新应用。

陈乐 (1992-), 女, 中国联合网络通信有限公司浙江省分公司高级工程师, 主要研究方向为大数据及人工智能在移动通信中的应用。

胡煜华 (1973-), 男, 中国联合网络通信有限公司浙江省分公司高级工程师, 主要研究方向为无线网络规划建设优化。

杨汉源 (1985-), 男, 中国联合网络通信有限公司浙江省分公司工程师, 主要研究方向为无线网络优化。