

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2024.09.007

# 一种面向可信WLAN和5G异构网络的垂直切换算法

赵洋<sup>1\*</sup>, 管冀<sup>2</sup>, 赵晓红<sup>1</sup>, 任天成<sup>1</sup>, 王文婷<sup>1</sup>

(1. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250003; 2. 国网山东省电力公司, 山东 济南 250001)

**摘要:**针对电力物联网中移动终端在异构网络中的垂直切换问题,传统基于信号强度的切换方法无法确保网络吞吐量、丢包率、延迟方面的最佳性能指标。为解决这一问题,提出一种基于数据驱动的电力物联网异构网络垂直切换算法。首先以长短时记忆网络(long short-term memory, LSTM)算法为基础,构建异构网络效能函数权重预测模型,模型训练及测试数据来自异构网络公开数据集及真实移动通信测量结果;随后效能函数权重预测模型输出异构网络效能函数权重参数,计算同一时刻各异构网络的效能值;采用排序方法选择效能值最大的网络作为切换目标网络执行网络切换。仿真结果显示,与相关算法相比,所提算法预测得到的属性权重能更好体现各网络特征对网络整体效用函数的影响,有效解决移动用户异构网络垂直切换有感问题。

**关键词:**异构网络;垂直切换;LSTM;无线通信技术

中图分类号:TN929.5

文献标识码:A

文章编号:1007-9904(2024)09-0057-08

## A Vertical Handover Algorithm for Trusted WLAN and 5G Heterogeneous Networks

ZHAO Yang<sup>1\*</sup>, GUAN Ti<sup>2</sup>, ZHAO Xiaohong<sup>1</sup>, REN Tiancheng<sup>1</sup>, WANG Wenting<sup>1</sup>

(1. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250003, China;

2. State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250001, China)

**Abstract:** Regarding the vertical handover problem of mobile terminals in heterogeneous networks of Power Internet of Things, traditional signal strength-based handover methods cannot ensure the best performance in terms of network throughput, packet loss, and latency. To address this problem, a data-driven vertical handover algorithm for heterogeneous network of Power Internet of Things is proposed. Firstly, a weight prediction model of network efficiency function for heterogeneous network is constructed based on the long short-term memory (LSTM) model. The model training and testing data are obtained from the public dataset of heterogeneous networks and the measurement results of real mobile communication. Subsequently, the weight prediction model of network efficiency function outputs the weight parameters of the heterogeneous network efficiency function to calculate the efficiency value of each heterogeneous network at the same time. Using a sorting method, the network with the highest efficiency value is selected as the target network to perform network handover. The simulation results show that, compared with related works, the attribute weights predicted by the proposed algorithm can better reflect the influence of each network feature on the overall utility function of the network, and effectively solve the perception problem of mobile users in vertical handover in heterogeneous networks.

**Keywords:** heterogeneous network; vertical handover; LSTM; wireless communication technology

## 0 引言

经历多年发展,电力通信网络已形成了骨干网

**基金项目:**国网山东省电力公司科技项目“智能电网5G安全接入及数据可信共享关键技术研究 课题2:智能电网中的5G通信与可信WLAN技术融合应用研究”(520626220017)。

Science and Technology Project of State Grid Shandong Electric Power Company “Research on the Fusion Application of 5G Communication and Trusted WLAN Technology in Smart Power Grid” (520626220017).

以光纤为主,终端接入网多种有线、无线通信方式互补共存的基本网架结构。在终端接入网侧,智能巡检机器人、无人机、分布式传感器、手持作业终端等业务场景不断涌现,在通信带宽、时延、可靠性、连接密度等方面对通信网络提出了差异化承载需求。融合以光纤网络和工业以太网为基础的有线局域网以及无线局域网、长期演进技术(long-term

evolution, LTE)、第四代移动通信关键技术、第五代移动通信技术(5th generation mobile communication technology, 5G)、窄带物联网等技术,构建终端接入网侧的异构通信网络,实现不同业务的便捷高效、安全可靠承载是进一步推进电网智能化的基础。新型电力系统通信建设提出了“专用公用互补、有线无线结合、统一资源管理”的原则,有序推进可信无线局域网(wireless local area network, WLAN)无线专网建设,提高传输网末端业务承载能力;依托无线公网保障海量采集业务接入。因此可信 WLAN 和 5G 融合的异构网络在新型电力系统中会普遍存在。

异构网络的覆盖区域存在相互重叠的现象,移动终端需要作出周期性判断,以确定哪个网络的哪个基站将可靠地执行数据通信。垂直切换是自组织网络的一个重要组成部分,它是在保持网络管理简单的同时提供从一个小区到另一个小区的快速无缝切换<sup>[1-2]</sup>。在异构网络切换过程中,终端用户(terminal user, TU)的使用体验是垂直切换的优化目标。传统的基于基站信号的切换算法,没有考虑到不同用户对于网络应用的需求差异。结合终端用户的服务质量(quality of service, QoS)需求,和异构网络基站的特征,是实现异构网络无感垂直切换的主要思路<sup>[3-5]</sup>。

针对可信 WLAN 和 LTE/5G 组成的电力物联网异构网络下的终端越区切换问题,提出基于长短时记忆网络(long short-term memory, LSTM)算法的异构网络垂直切换方案(LSTM-based handover, LSTM-HO)。首先在公开数据集上进行数据增强,获得更加符合当前电力物联网异构网络通信实际场景的数据集。随后构建基于 LSTM 算法的电力物联网异构网络属性权重预测模型,并对该预测模型进行训练,使其能有效预测效能函数的权重。预测到的权重值作为计算网络效用函数的权重参数,计算生成相应网络类型的效能值,采用排序法选择效能值最大的网络作为目标网络进行切换。相较于模糊层次分析等方法,这种自适应的网络权重选择方法能更好体现各网络特征对于网络整体效用函数的影响。仿真结果表明,提出的 LSTM-HO 方案能够有效实现非固定业务终端在异构网络中的无感垂直切换。

## 1 研究背景

异构网络垂直切换算法本质上是一种多属性决策问题(multi attribute decision making, MADM),采用异构网络的时延、抖动、接收信号强度(received signal strength, RSS)等信息,结合终端用户的业务类型作为切换判决条件<sup>[6-9]</sup>。但是多种网络属性之间的量纲和取值范围都不同,需要做归一化处理,造成了部分信息丢失。同时多属性对垂直切换的发生条件也有不同的影响,如何准确高效实现多属性组织进行垂直切换是当前这类算法面临的主要问题。文献[10]在综合多网络属性中采用线性加权的思想生成网络总体效用值,算法具有低复杂度的特点,相比基于单一属性 RSS 具有更好的异构网络切换效果。文献[11]利用正负理想值距离表示异构网络的特征,对距离值进行理想排序实现网络间的垂直切换。文献[12]采用改进的多属性交替排名方法实现属性归一化和权重计算,能够对网络实现更准确的排序,保证网络在异构情况下的网间切换效果。

移动终端用户运行着不同种类的业务,对不同网络属性的侧重有所不同,所以多属性决策类算法需要给出不同业务对应的权重值。文献[13]基于熵值法对网络属性进行离散度分析,将离散度和网络属性对应的权重进行关联,实现了结合业务类型的权重自适应调整。

伴随深度学习和强化学习等技术的发展,基于学习算法进行异构网络垂直切换的研究逐渐得到了诸多学者的关注<sup>[14-16]</sup>。文献[17]提出了一种基于改进 K 最近邻算法(K-nearest neighbor, KNN)的垂直切换策略,用在异构无线网络中执行网络切换。该算法减少了网络样本,提高了切换效率,但是在切换过程中存在乒乓效应。文献[18]提出了一种自优化算法,用于调整 LTE 基站的切换参数,以减少负面影响,如呼叫掉线和切换失败。他们的算法为当前的网络状态选择最优的迟滞和触发时间组合。文献[19]提出了一种基于数据驱动的下一代异构无线网络垂直切换优化算法。算法通过训练深度模型,拟合不同网络属性之间对于垂直切换的影响程度,确定各网络属性的权重构建一个综合网络性能指标。数据中仅考虑了网络属性,没有考虑终端用户的特点,无法实现有效无感垂直切换。文献[20]提出了

一种基于强化学习的异构网络垂直切换方案,主要从触发切换、网络选择及判决切换等方面进行优化。在触发切换时将垂直切换考虑成必要切换和择优切换,通过Q-Learning算法在选择网络时优化垂直切换;然后以QoS为条件,在判决切换时加入驻留定时器,从多角度减少用户切换次数,降低乒乓效应对异构网络垂直切换的影响。

## 2 研究基础

### 2.1 异构网络数据特征

传统基于信号强度的异构网络垂直切换算法,主要考虑各备选网络间的自身数据传输性能,如带宽、时延等,并未考虑终端用户的业务需求。这导致垂直切换有过度执行的情况,降低了终端的用户体验,在垂直切换过程中结合了终端用户业务类型和网络自身数据传输性能。基于上述考虑,异构网络数据的特征信息包括:1)网络的自身特征,如上下行带宽、丢包率、时延等,这些特征反映了当前不同网络的数据传输性能;2)终端用户业务类型。基于当前电力物联网异构网络的现状,结合不同应用场景对于带宽、时延、交互程度的需求,典型的业务类型如表1所示。

表1 终端用户典型业务类型

Table 1 Typical service types of end users

应用场景	上、下行带宽	时延	移动性要求
手持移动终端	20 kbit/s 少量交互	≤1 s	中低速移动
变电站巡检机器人	4 Mbit/s 少量交互	≤200 ms	中低速移动
可穿戴运维工具	2 Mbit/s 少量交互	≤100 ms	中低速移动
无人机巡检	6~10 Mbit/s 少量交互	≤20 ms	中低速移动

参照网络特征信息,用于电力物联网异构网络属性权重预测模型训练和测试的数据特征包括:上下行带宽 $B$ ,时延 $D$ ,抖动时延 $J$ ,丢包率 $L$ ,网络往返时间 $R$ ,反映终端用户业务类型的特征 $T$ 。 $N$ 、 $U$ 为数据集中的数据标签, $N = \{1, 2, 3\}$ ,其中,取值1表示WLAN,取值2表示LTE,取值3表示5G,终端用户可以在该集合中进行切换。 $U$ 表示终端用户,若单用户则该值恒为1,多用户则从1开始逐一赋值。数据集由网络特征、网络类型、终端用户业务特征共同组成,如式(1)所示。

$$S = \{B, D, J, L, R, T, N, U\} \quad (1)$$

在数据集中,单一数据 $s_k \in S$ 表示为

$$s_k = \{b_k, d_k, j_k, l_k, r_k, t_k, N, U\} \quad (2)$$

式中: $b_k \in B, d_k \in D, j_k \in J, l_k \in L, r_k \in R, t_k \in T$ 为归一化后的不同数据特征值, $k \in \{1, 2, \dots, K\}$ 为数据索引号, $K$ 为数据集中的样本数量。

### 2.2 LSTM算法模型

LSTM算法模型主要由遗忘门、输入门、输出门组成,如图1所示。图中, $\otimes$ 表示叉乘运算, $\oplus$ 表示求和运算; $x^t$ 表示网络当前时刻的输入值, $h^{t-1}$ 表示网络上一时刻的输出值, $[h^{t-1}, x^t]$ 表示对两个向量的连接; $Z^f$ 表示遗忘门,是对历史信息的记录,如式(3)所示; $Z^i$ 表示输入门,接收当前输入 $x^t$ ,表达式如式(4)所示; $Z^o$ 表示输出门, $\tilde{C}^t$ 表示记忆矩阵,如式(5)和式(6)所示; $C^t$ 表示网络状态的记忆,通过式(7)获得; $h^t$ 表示网络当前时刻的输出值,由式(8)获得。

$$Z^f = \sigma(w^f[h^{t-1}, x^t] + b^f) \quad (3)$$

$$Z^i = \sigma(w^i[h^{t-1}, x^t] + b^i) \quad (4)$$

$$Z^o = \sigma(w^o[h^{t-1}, x^t] + b^o) \quad (5)$$

$$\tilde{C}^t = \tanh(w^c[h^{t-1}, x^t] + b^c) \quad (6)$$

$$C^t = Z^f \otimes C^{t-1} + Z^i \otimes \tilde{C}^t \quad (7)$$

$$h^t = Z^o \otimes \tanh(C^t) \quad (8)$$

式中: $w^f$ 、 $(w^i, w^c)$ 、 $w^o$ 分别为遗忘门、输入门和输出门的权重矩阵; $\sigma$ 为sigmoid函数运算; $b^f$ 为遗忘门的偏置项; $(b^i, b^c)$ 为输入门的偏置项; $b^o$ 为输出门的偏置项。

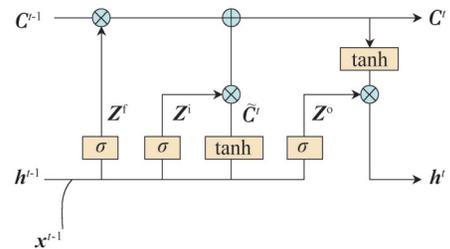


图1 LSTM模型

Fig.1 LSTM model

## 3 垂直切换算法设计

不同业务类型的移动终端用户对电力物联网异构网络的需求不同,网络效能函数的计算权重应随之调整。移动终端用户的物理位置变化使得网络效能函数计算权重的变化具有时间相关性,这是一种典型

的时间序列数据。LSTM算法对于时间序列数据具有良好的预测和回归效果,以LSTM算法为基础,构建适用于电力物联网的异构网络权重参数预测模型。

电力物联网异构网络垂直切换算法的流程如图2所示。主要步骤包括:1)采用Max-Min方法对电力物联网异构网络的特征进行归一化处理,得到异构网络权重参数预测模型的训练样本和测试样本,将终端用户应该执行的最优网络选择作为数据标签,用于模型训练和测试;2)训练好的异构网络权重参

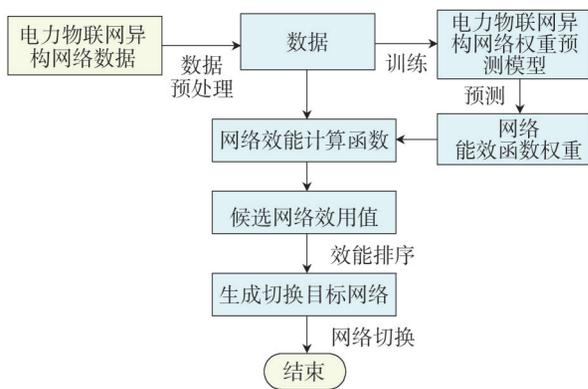


图2 本文所提算法流程图

Fig. 2 Flowchart of proposed algorithm

数模型输出网络效能函数权重;3)利用预测到的权重进行效用函数计算;4)利用排序算法对候选异构网络效用值进行排序,选择效用值最大的候选网络作为切换目标网络,执行网络垂直切换。

### 3.1 数据归一化

考虑到不同网络特征的量纲、单位不一致,通过参数归一化处理,将网络特征统一到相同的取值范围内。上述特征均通过Max-Min方法进行归一化处理,作为异构网络权重预测模型的训练和测试数据。已知特征  $v = \{b, d, j, l, r, t\}$ , 则Max-Min归一化方法为

$$v_{norm} = \begin{cases} 1 & , v \geq v_{max} \\ (v - v_{min}) / (v_{max} - v_{min}) & , v_{min} < v < v_{max} \\ 0 & , v < v_{min} \end{cases} \quad (9)$$

### 3.2 异构网络权重参数预测模型

异构网络权重参数预测模型如图3所示。模型的输入为单一数据  $s_t$ , 数据经过归一化及异常值剔除等预处理后用于模型训练和测试。预测模型主要由输入层、2层连续的LSTM层、2层全连接层组成。其中输入层接收经过归一化处理后的样本数据,送到第1层LSTM层,随后利用Dropout技术降低模型参数,进入第2层LSTM层,再次进行Dropout剔

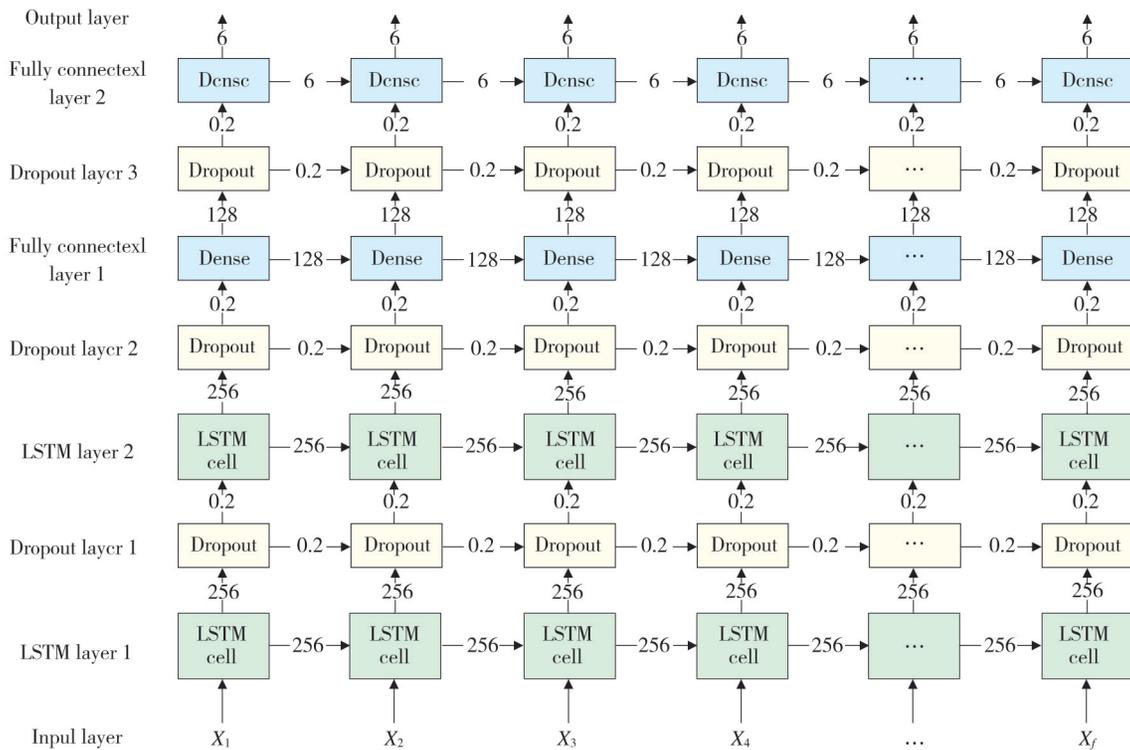


图3 异构网络权重参数预测模型框架

Fig. 3 Heterogeneous network weight parameter prediction model framework

除模型参数,随后参数降维送到全连接层。上述3层模型之间均采用ReLU作为激活函数,最后利用一层全连接层输出6个网络属性对应的预测权重值。

采用Tensorflow深度学习框架搭建预测网络,依据文献[5]中的网络超参数设置策略,异构网络权重预测模型的超参数设置如表2所示。超参数的设置兼顾预测效率和模型大小,采用离线训练,在线预测的方式进行部署。

表2 异构网络权重预测模型超参数设置  
Table 2 Hyper-parameters of proposed predicting framework

网络层	输入维度	输入长度	输出维度	激活函数	正则化系数
Input	6		10		
LSTM_1	10	35	256	ReLU	
Dropout_1					0.2
LSTM_2	10	35	256	ReLU	
Dropout_2					0.2
Dense_1	128			ReLU	
Dropout_3					0.2
Dense_1	6			Softmax	

令 $f$ 表示异构网络权重预测模型函数, $\theta$ 表示异构网络效能函数计算权重系数集合,有

$$\theta = f(S) \quad (10)$$

式中: $s_k \in S$ 表示单个数据不同数据特征对应的归一化效能值。

### 3.3 网络效用模型

异构网络的网络效用值是进行垂直切换的主要判断依据,考虑到网络参数所对应的网络特征相互之间关联性较小,采用线性函数拟合网络效用模型,采用权重参数反映各网络特征对于整体效能函数的影响,通过加权求和的方式实现效用函数的设计。本文对各网络特征进行数据归一化处理,解决量纲不统一的问题。在每个切换判决时刻,基于当前候选网络的网络效用值最大的网络进行切换,网络效用值如式(11)所示。

$$\varphi = \theta_1 b + \theta_2 d + \theta_3 j + \theta_4 l + \theta_5 r + \theta_6 t \quad (11)$$

式中: $\varphi$ 为候选网络效用值; $\theta = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6\}$ 为权重因子,体现不同网络特征对于网络效用的影响,该权重因子通过异构网络权重预测模型预测得到。

## 4 仿真分析

### 4.1 仿真数据集

实验数据集采用了北卡罗来纳州立大学发布的异构网络数据集<sup>[21]</sup>,该数据集包含了5个移动终端用户的网络数据流量,异构网络由WLAN、LTE、全球微波互联接入(worldwide interoperability for microwave access, WiMax)组成。在中国电力物联网的网络类型中,5G网络具有较好的部署前景,WiMax网络则应用较少。基于这一特点,参考中国移动公开的5G数据中的无线链路质量预测数据包<sup>[22]</sup>,对该数据集进行相应调整,将WiMax网络更新为5G网络类型。为保证数据的一致性和可靠性,对调整后的数据集进行了预处理,包括异常数据的剔除、数据归一化等操作。在调整后的数据集中,异构网络由LTE网络、WLAN和5G网络构成,是新型电力系统中较为常见的一种异构网络组成类型。终端用户运行4种类型的服务,参见表1。利用切换期间终端用户上运行的4种服务类型服务的网络通信连续性,验证本算法进行异构网络垂直切换的效果。

### 4.2 对照算法

所对照的算法为模糊层次分析法(fuzzy analytical hierarchy processor, FAHP)<sup>[23]</sup>、熵-模糊层次分析-加权法(entropy-FAHP-simple additive weighting, Entropy-FAHP-SAW)<sup>[24]</sup>、熵-模糊层次分析-综合评价法(entropy-FAHP-technique for order preference by similarity to an ideal solution, Entropy-FAHP-TOPSIS)<sup>[11]</sup>,上述算法是应用于异构网络垂直切换的典型算法。FAHP算法作为层次分析法的一种,将异构网络不同网络参数进行多层分类,计算网络属性的权重。Entropy-FAHP-SAW算法充分考虑了网络用户的特征,结合熵值法和模糊层次分析进行异构无线网络接入,能够有效减少用户的切换次数,但未充分考虑负载情况。Entropy-FAHP-TOPSIS基于改进的TOPSIS方法,使用曼哈顿距离代替欧几里得距离和熵方法来确定目标权重。该方法在切换次数的平均值方面,比其他基于主观的算法提供了最佳的性能,但没有充分考虑终端用户特性。

### 4.3 仿真设计

仿真软件中,在一个5 km×5 km的区域内建立了一个由100个小区组成的移动通信网络。每个小区有5 MHz带宽,25个资源块和2 GHz载波频率。每个资源块由12个频宽15 kHz的子载波组成。时隙的持续时间为0.5 ms,传输时间间隔为1 ms。在仿真中100个终端用户均匀分布在固定的初始化位置上。根据电力业务场景中非固定终端的部署和移动特点,100个终端的移动轨迹使用曼哈顿移动模型生成。在曼哈顿移动模型中,业务终端在一定区域内沿水平或垂直方向移动。在每个可能发生运动方向改变的位置,终端采用概率方法来选择其运动方向,其直行、左转、右转的概率分别定义为0.5、0.25、0.25。

### 4.4 仿真结果对比

为验证本文所提算法的有效性,在相同终端用户移动速度下,选择单位时间内网络垂直切换次数、网络垂直切换失败率、乒乓效应作为评估指标。为更好体现实验对比效果,仿真测试共执行50次。

在电力异构网络相近小区的连接区,移动终端的网络效能值具有相近的特点。若不考虑移动终端当前的业务类型和移动速度,单位时间内移动终端在连接区会产生多次网络垂直切换现象。由图4可以知,所提LSTM-HO算法具有更少的平均网络切换次数,减少了网络频繁切换有可能带来的通信带宽突变问题。在手持移动终端业务中,本文算法的垂直切换次数低于对照算法次数的50%。在可穿戴运维工具、无人机巡检、变电站巡检机器人业务中,本文所提算法的垂直切换次数在同类算法中最少。

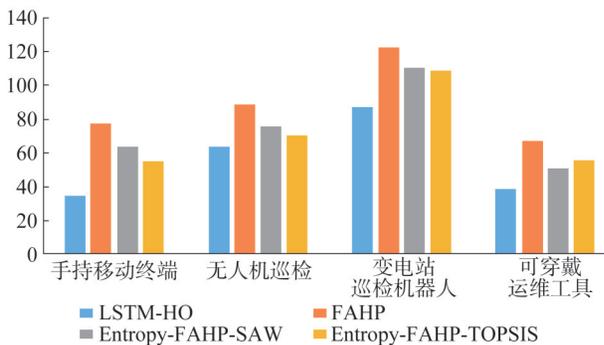


图4 垂直切换次数对比

Fig. 4 Comparison of the number of vertical handover

由图5可以知,在4种网络类型中执行切换操作,所提算法相应的切换失败率有了明显降低。在手持移动终端业务上,垂直切换失败率低于同类算法的50%,这一优势在高带宽业务类型中体现更为明显。

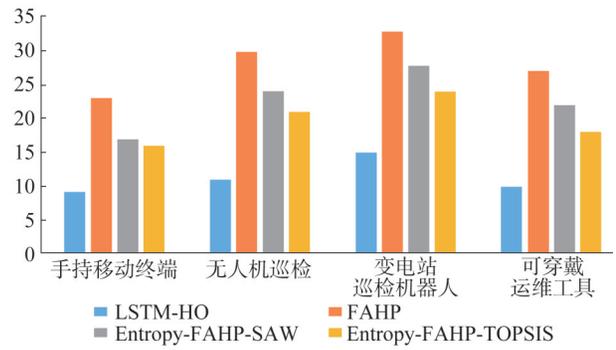


图5 垂直切换失败率

Fig. 5 Failure rate of vertical handover

在异构网络垂直切换中,乒乓效应是指移动终端在一段时间内在相邻小区进行了多次垂直切换操作,乒乓效应是评估异构网络垂直切换算法的重要指标。为在不同算法间进行客观比较,将同一时间段内相邻小区终端执行3次及以上垂直切换操作的现象定义为一次乒乓效应<sup>[5]</sup>。由图6可以知,本文所提算法的乒乓效应发生频次相较于FAHP、Entropy-FAHP-SAW分别有33%、24%的改进,和Entropy-FAHP-TOPSIS算法具有类似的能力。

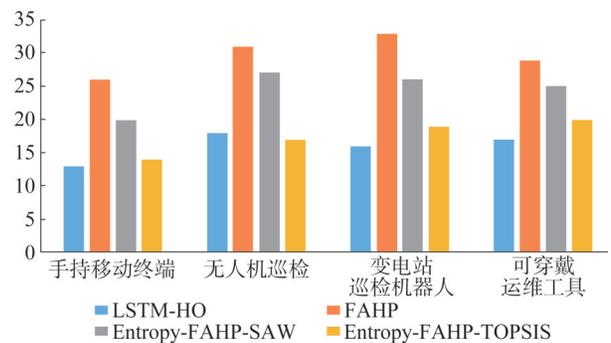


图6 乒乓效应对比

Fig. 6 Comparison of ping-pong effect

### 4.5 模型实时性

提出的电力物联网异构网络权重预测模型采用

离线训练、在线预测的方式进行部署。在训练阶段采用大量训练数据对该模型进行训练直至模型收敛,经过训练后,输入异构网络数据,预测模型只需要经过简单的代数计算就能输出网络特征权重,从而得到最优网络切换选择决策。依据表1中的超参数设置,所提预测模型的参数为55万个,所需计算资源满足实时性预测需求。

#### 4.6 实际测试结果分析

为验证所提垂直切换方法的有效性,以变电站巡检机器人应用场景进行了实际效果测试。未使用此模型时,遇到网络切换,监控视频会出现明显卡顿现象,切换时延大于50 ms。执行连续发送数据包测试时,累计发送数据包31 820个,丢失数据包3 250个,丢包率10%。在部署所提垂直切换方法后,网络切换时监控视频流畅无卡顿,切换时延小于20 ms。执行连续发送数据包测试时,累计发送数据包92 165个,丢失数据包356个,丢包率小于0.1%,满足巡检机器人通信要求。

## 5 结束语

针对电力物联网异构网络中的垂直切换问题,提出了一种基于数据驱动垂直切换算法。基于LSTM算法构建电力物联网异构网络权重预测模型,并基于预测得到的异构网络权重参数计算网络整体效能函数,最后采用排序算法选择效能值最大的候选网络作为目标网络进行网络切换。仿真结果显示,所提算法可有效减少无效网络垂直切换次数,降低异构网络垂直切换的乒乓效应,提升终端用户的QoS体验。

## 参考文献

[1] LIU Y J, CHENG S M, HUANG P Y. Cognitive vertical handover in heterogeneous networks [C] // Proceedings of the 11th EAI International Conference on Heterogeneous Networking for Quality, Reliability, Security and Robustness. IEEE, 2015: 392-397.

[2] 成哲. 多业务环境下异构无线网络的垂直切换算法研究[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2016.

[3] SINGH A. Design of efficient vertical handover in heterogeneous networks[M]. 2016.

[4] 柴进. 异构网络环境下的切换策略研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2022.

[5] 王瑞山. 无线异构网络融合环境中的垂直切换方案研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2016.

[6] RAMIREZ-PEREZ C, RAMOS-R V M. On the effectiveness of multi-criteria decision mechanisms for vertical handoff [C] // 2013 IEEE 27th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA). IEEE, 2013: 1157-1164.

[7] KUNARAK S, SULEESATHIRA R. Multi-criteria vertical handoff decision algorithm for overlaid heterogeneous mobile IP networks [J]. Journal of the Franklin Institute, 2020, 357(10): 6321-6351.

[8] 苏荣昕. 基于FAHP的异构无线网络垂直切换算法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.

[9] 李远彤, 石振刚. 基于组合权重和多属性决策的异构网络接入算法[J]. 科技资讯, 2023, 21(8): 25-28.

LI Yuantong, SHI Zhengang. The heterogeneous network access algorithm based on combined weights and multi-attribute decision-making [J]. Science & Technology Information, 2023, 21(8): 25-28.

[10] BHOSALE S, DARUWALA R. Multi-criteria vertical handoff decision algorithm using hierarchy modeling and additive weighting in an integrated WiFi/WiMAX/UMTS environment-A case study [J]. KSII Transactions on Internet and Information Systems, 2014, 8(1): 35-57.

[11] XIAO K Y, LI C G. Vertical handoff decision algorithm for heterogeneous wireless networks based on entropy and improved TOPSIS [C] // 2018 IEEE 18th International Conference on Communication Technology (ICCT). IEEE, 2018: 706-710.

[12] CHANDAVARKAR B R, GUDDATI R M R. Simplified and improved multiple attributes alternate ranking method for vertical handover decision in heterogeneous wireless networks [J]. Computer Communications, 2016, 83: 81-97.

[13] YU H W, MA Y N, YU J X. Network selection algorithm for multiservice multimode terminals in heterogeneous wireless networks [J]. IEEE Access, 2019, 7: 46240-46260.

[14] 张振浩, 梁俊, 肖楠, 等. 空天异构网络中基于Q学习的切换判决优化算法[J]. 计算机工程, 2018, 44(5): 296-302.

ZHANG Zhenhao, LIANG Jun, XIAO Nan, et al. Handoff decision optimized algorithm based on Q-learning approach for heterogeneous networks in aerospace [J]. Computer Engineering, 2018, 44(5): 296-302.

[15] 唐鑫, 徐彦彦, 潘少明, 等. 基于SDN架构的垂直切换算法[J]. 计算机工程与设计, 2022, 43(5): 1201-1206.

TANG Xin, XU Yanyan, PAN Shaoming, et al. Vertical handover algorithm based on SDN architecture [J]. Computer Engineering and Design, 2022, 43(5): 1201-1206.

[16] 孟磊, 唐鑫, 徐彦彦. 基于移动用户位置预测的垂直切换算法[J]. 计算机应用研究, 2022, 39(8): 2438-2442.

MENG Lei, TANG Xin, XU Yanyan. Vertical handoff algorithm based on mobile user location prediction [J]. Application Research

- of Computers, 2022, 39(8): 2438–2442.
- [17] GUO S W. An improved KNN based decision algorithm for vertical handover in heterogeneous wireless networks [C] // 2021 40th Chinese Control Conference (CCC). IEEE, 2021: 3011–3016.
- [18] AWADA A, WEGMANN B, VIERING I, et al. A SON-based algorithm for the optimization of inter-RAT handover parameters [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(5): 1906–1923.
- [19] LIN P C, CASANOVA L, FATTY B, et al. Data-driven handover optimization in next generation mobile communication networks [S]. Mobile Information Systems, 2016: 1–11.
- [20] 丁雨, 李晨凯, 卢为党, 等. 基于强化学习的异构网络垂直切换方法[J]. 信息对抗技术, 2023(3): 35–43.  
DING Yu, LI Chenkai, LU Weidang, et al. Vertical handover for heterogeneous networks based on deep reinforcement learning [J]. Information Countermeasure Technology, 2023(3): 35–43.
- [21] RHEE I, SHIN M, HONG S, et al. CRAWDAD Dataset [EB/OL]. (2021-07-21) [2023-09-30]. <https://crawdad.org/ncsu/mobilitymodels/20090723>.
- [22] China Mobile Co., Ltd. 5G Dataset [EB/OL]. (2023-07-18) [2023-09-30]. <https://jiutian.10086.cn/open/#/setlist?platform=OpenInnovation>.
- [23] SAATY T L. Analytic hierarchy process [D]. New York: Mc Graw Hill, 1980.
- [24] 梁根. 异构无线网络接入选择关键技术研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- 
- 收稿日期: 2023-10-07  
修回日期: 2023-12-30
- 作者简介:  
赵洋(1991), 通信作者(liuxingf4001@163.com), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统信息通信技术;  
管蕙(1979), 女, 硕士, 正高级工程师, 主要研究方向为电力系统信息通信技术、电力系统及其自动化;  
赵晓红(1990), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统信息通信技术;  
任天成(1975), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要研究方向为电力系统信息通信技术;  
王文婷(1988), 女, 博士在读, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统信息通信技术及工控网络安全技术。
- (责任编辑 娄婷婷)