

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181414

面向电力无线专网的分层异构网络接入协同选择方案

唐元春¹, 林文钦¹, 陈力¹, 朱佳佳²

(1. 国网福建省电力有限公司经济技术研究院, 福建 福州 350012; 2. 华北电力大学, 北京 102206)

摘要: 针对电力无线专网应用场景部分地区存在盲、弱覆盖等问题, 提出了一种分层异构网络接入协同选择方案。该方案研究了均衡网络静态性能指标和动态性能指标的多目标联合优化, 并利用改进非支配排序遗传算法求解该方案的最优解。仿真结果表明, 提出的方案在承载实时和非实时业务时, 都能够保证静态性能指标和动态性能指标之间的均衡性, 因而能够完整地表征网络的整体性能。进而用户终端能够合理地选择整体性能较好的网络进行接入, 使得分层异构网络资源能够得到合理的分配。

关键词: 电力无线专网; 分层异构网络; 接入协同选择; 多目标优化; 改进非支配排序遗传算法

An access synergetic selection approach in hierarchical heterogeneous network oriented to power wireless communication

TANG Yuanchun¹, LIN Wenqin¹, CHEN Li¹, ZHU Jiajia²

(1. Economic Technology Research Institute, State Grid Fujian Electric Power Company, Fuzhou 350012, China;
2. North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The deployment of power wireless private network could trigger the severe problems of blind and weak coverage in some areas, thus this paper focuses on an access synergetic selection approach in hierarchical heterogeneous network oriented to power wireless communication. This scheme studies the joint optimization of static performance index and dynamic performance index of network. Then it's converted into a multi-objective optimization problem. It solves the problem by using the nondominated sorting genetic algorithm version II and gains a set of Pareto optimal solutions. Simulation results show that the proposed scheme can guarantee the balance between static performance index and dynamic performance index, and thus can fully characterize the overall performance of the network. Therefore, user terminal could choose the network with better overall performance to access, which makes the hierarchical heterogeneous network resources be allocated reasonably.

This work is supported by State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd. Economic Research Institute (No. JYYFW 2018JT06006) and National Natural Science Foundation of China (No. 51507063).

Key words: power wireless private network; hierarchical heterogeneous networks; access synergetic selection; multi-objective optimization; nondominated sorting genetic algorithm version II

0 引言

随着国网公司“两个一流”建设的不断深化以及“一体两翼”战略布局的逐步展开, 建设“安全、泛在、友好”的通信网络势在必行。无线专网技术以其独特的优势在智能电网中发挥着重大作用, 是解决配用电全覆盖、信息全采集的关键。然而单一

电力无线专网受自身位置、周围地形、高层楼宇遮挡等的影响, 导致部分地区存在盲、弱覆盖等问题^[1]。目前, 国内电力无线专网主要采用 LTE230^[2-3]和 LTE1800^[4]进行组网, 并且考虑到 WLAN 与 LTE 网络融合在应对数据流量增长、用户体验提升等方面发挥了重大作用^[5]。因而, 融合 LTE230、LTE1800 以及 WLAN 的分层异构网络^[6]成为解决上述问题的关键。为了满足分层异构网络环境下用户终端的通信服务质量(Quality of Service, QoS)需求以及充分利用多种网络之间的互补特性, 需要提出合理、

基金项目: 国网福建省电力有限公司经济技术研究院项目资助 (JYYFW2018JT06006); 国家自然科学基金 (51507063)

高效的网络接入协同选择策略, 保证网络侧负载的均衡、提升用户侧用户体验质量(Quality of Experience, QoE)以及降低用户中断概率。

目前, 关于异构网络接入选择策略, 文献[7]系统地各个接入算法进行了分类和总结, 本文则根据静态属性和动态属性将其分为两类, 包括基于网络静态属性的接入选择算法, 如文献[8]提出了一种分层异构网络接入协同选择算法, 文献[9]提出了一种多终端协同接入网络选择算法, 文献[10]提出了一种基于灰度关联层次分析的异构网络选择算法, 该类算法根据网络自身属性(网络可用带宽、时延、覆盖范围等), 建立一套属性指标体系对网络性能进行评估, 现有的多数算法都是为了追求网络自身属性评价的合理性。这类算法虽然能够在一定程度上改善用户需求与网络的匹配程度, 但并未考虑用户接入对网络自身性能以及用户体验质量所带来的性能影响。另一类算法为基于网络动态性能指标的接入选择算法。该类算法主要考虑信号接收强度或者负载均衡程度, 如文献[11]提出了一种以网络负载均衡为目标的多接入选择机制, 文献[12]提出一种基于负载均衡的联合接入控制算法, 该类算法选择最能有效保证性能指标提升的网络进行接入, 然而该类算法容易面临单一性能提升的瓶颈问题。

综上, 一方面为了解决现阶段电力无线专网存在承载业务种类单一、资源利用率不高的问题。另一方面, 为了解决由于目前异构网络接入选择策略中缺乏对负载程度、接入信号强度等动态性能指标以及可用带宽、频谱效率、覆盖范围等网络静态性能指标的联合研究, 从而引发网络整体性能和用户体验质量降低等问题。本文结合上述两类算法的优点, 提出了均衡网络静态性能指标和动态性能指标的联合优化接入协同选择方案。首先, 该方案将协同应用于静态性能指标的体系评价过程, 构建了以可用度、耗费度和可靠度等为主要指标作为协同评价体系的子系统层。可用度中的频谱效率和可用带宽、耗费度中的功耗和费用以及可靠度中的丢包率和时延等多个属性作为子系统的序参量, 并以协同度为目标函数作为网络静态性能指标来衡量网络的整体性能。其次, 以负载均衡和用户体验质量为主要目标函数作为网络动态性能指标来评价网络及其用户的性能。在此基础上, 根据建立的目标函数构建接入协同选择多目标优化^[13-15]模型, 并利用改进非支配排序遗传算法求解该方案的 Pareto 解集。最后, 从 Pareto 解集中选择均衡网络协同度、网络负载均衡以及用户体验质量的最优解作为最优接入协同选择方案。并与经典的 SINRmax 接入选择策略以

及负载均衡(Multi-Radio Access Selection Load Balance, MLB)接入选择策略做对比。仿真结果表明, 本文提出的接入协同选择方案的负载均衡性能优于 SINRmax 接入选择策略, 并在中断概率和用户平均体验质量性能方面要优于 MLB 接入选择策略。这是因为本文提出的方案能够保证静态性能指标和动态性能指标之间的均衡性, 因而能够完整地表征网络的整体性能。从而用户终端能够合理地选择整体性能较好的网络进行接入, 使得分层异构网络资源能够得到合理的分配。

1 系统模型

如图 1 所示, 本文考虑 LTE230、LTE1800 以及 WLAN 网络重叠覆盖的分层异构无线网络场景。该网络场景包含 I 个基站, 用集合 $I = \{1, 2, \dots, I\}$ 表示。 M 个用户终端在重叠覆盖范围内随机分布, 用集合 $M = \{1, 2, \dots, M\}$ 表示。本文算法假设任意用户终端 m 拥有多模无线网络接口, 当用户终端发出接入请求时, 网络控制中心将会根据网络接入协同选择方案给每个用户终端分配合适的网络。

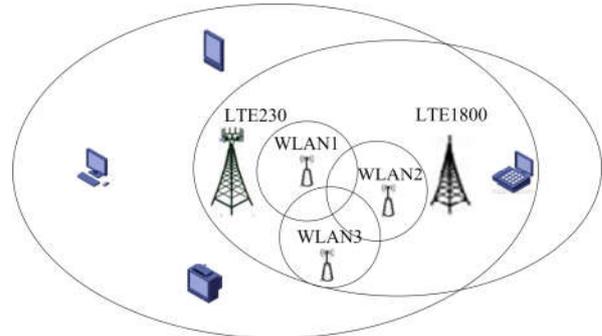


图 1 面向电力无线专网的分层异构网络场景

Fig. 1 Hierarchical heterogeneous network oriented to power wireless communication

2 基于多目标优化的接入协同选择方案

2.1 优化目标

(1) 最大化分层异构网络整体协同度

本文基于协同理论, 建立了分层异构网络接入协同选择方案中的静态性能指标评价体系, 如图 2 所示, 将每个网络看作一个整体系统, 将可供接入的网络的性能属性作为子系统, 与子系统属性相关的参数作为子系统的序参量。基于协同的分层异构网络接入协同选择, 可以从子系统层和序参量层两个层面上全面衡量目标网络各个属性的综合性能, 避免网络选择中可能出现的“木桶效应”^[8]。本文从可用度、耗费度和可靠度三个属性子系统构建基于协同的分层异构网络接入协同选择指标体系。对

于任意可供接入的网络 $i (i \in I)$, 其属性子系统 $S_x (x \in \{1, 2, \dots, X\})$ 包含 l_x 个序参量, 单个序参量 $j (j \in \{1, 2, \dots, l_x\})$ 所代表的网络属性表示为 r_{xj} , 则属性子系统 S_x 中第 j 个序参量的有序度 A_{xj} 计算方法如式(1)和式(2)所示。

$$A_{xj} = \xi_j \frac{r_{xj} - r_j^{\min}}{r_j^{\max} - r_j^{\min}} \quad (1)$$

$$A_{xj} = \xi_j \frac{r_j^{\max} - r_{xj}}{r_j^{\max} - r_j^{\min}} \quad (2)$$

式中, r_j^{\max} 、 r_j^{\min} 分别表示单个序参量 j 的最大值和最小值。引入 ξ_j 因子, 用来放大或缩小该序参量 j 在所在属性子系统的影响。对于取值越大网络性能越好的正效用序参量(如吞吐量、可用信道数等), A_{xj} 用式(1)计算, r_{xj} 越大分子越大, 即有序度越大。而对于负效用序参量(如功耗、费用、丢包率等), A_{xj} 用式(2)计算, r_{xj} 越小分子越大, 即有序度越大。

属性子系统 S_x 的有序度 Q_x 可以利用序参量有序度的均值得到, 计算方法为

$$Q_x = \frac{1}{l_x} \sum_{j=1}^{l_x} A_{xj} \quad (3)$$

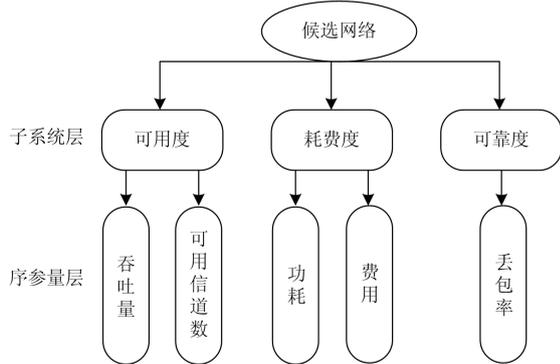


图2 基于协同的分层异构网络接入协同选择指标体系

Fig. 2 Access synergetic selection index system based on synergy in hierarchical heterogeneous network

考虑到协同理论系统性能协同度体现在整体的有序和无序, 而信息学科的信息熵能够体现信息分布的协同有序程度。因此, 本文从 Shannon 熵的角度来描述网络系统性能的协同状态。这样, 可以利用属性子系统有序度均值计算任意网络 i 的协同度 ψ_i , 计算方法如式(4)所示。

$$\psi_i = - \sum_{x=1}^X \left\{ \omega_x \cdot \frac{1-Q_x}{X} \ln \left(\frac{1-Q_x}{X} \right) \right\} \quad (4)$$

式中, ω_x 为属性子系统 S_x 对于网络系统整体影响的权重, 计算方法如下^[16]:

$$\omega_x = (1-E_x) / \sum_{x=1}^X (1-E_x) \quad (5)$$

式中, $E_x = -(\ln l_x)^{-1} \sum_{j=1}^{l_x} p_{xj} \ln p_{xj}$, $p_{xj} = A_{xj} / \sum_{j=1}^{l_x} A_{xj}$ 。

因此, 所有用户终端协同选择接入网络后的系统协同度效用函数计算方法为

$$u_1 = \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^I a_{mi} \psi_i \quad (6)$$

式中, a_{mi} 为二进制变量, $a_{mi}=1$ 表示用户终端 m 接入网络 i , 否则, $a_{mi}=0$ 。

(2) 最小化负载率方差

为了保证分层异构网络接入协同选择方案的负载均衡性, 本文将负载率方差作为分层异构网络接入协同选择方案的又一效用函数。

$$u_2 = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I (Load(i) - \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I Load(i))^2 \quad (7)$$

式中: $Load(i) = \sum_{m=1}^M b_{mi} / C_i$, $b_{mi} = a_{mi} b_m$; b_{mi} 为用户终端 m 接入网络 i 时占用的带宽; b_m 为用户终端 m 的带宽需求; C_i 表示接入网络 i 的可用带宽。

(3) 最大化用户体验质量

对于网络所提供的业务传输服务, 用户终端存在主观上的差异性体验, 即存在不同等级的用户体验质量。相较于传统评估网络性能的客观指标服务质量不同, 用户体验质量引入了用户主观感受所产生的影响。本文选择国际标准组织通用的平均意见得分(Mean Opinion Score, MOS)模型作为主观评价指标, 它能够将用户的主观感受分为4个等级^[17], 从而直观地体现用户感受, 如表1所示。

表1 MOS值与用户体验质量对应关系

Table 1 MOS value vs. user experience

MOS 区间	用户体验质量
[1,2)	十分不满意
[2,3)	不满意
[3,4)	满意
[4,5)	十分满意

对于无线用户终端, 其体验质量是与用户终端的主观感受相一致的, 而用户终端传输速率与用户的主观感受密切相关。当用户终端的传输速率较高时, 其体验质量也会提升, 但传输速率达到某一门限时, 用户终端体验质量并不会增加; 同样, 当用户终端的传输速率减小到某一门限时, 由于不满足

其自身业务服务需求, 其体验质量将达到最低值, 即十分不满意接入网络所提供的服务。为此, 本文依据文献[18]使用的 MOS 模型作为用户终端体验质量的评判指标, 即对于用户终端 m , 其体验质量为

$$MOS_m(R_m) = \begin{cases} 1, & R_m \leq R_{\min} \\ \alpha \log_{10}(\beta R_m), & R_{\min} \leq R_m \leq R_{\max} \\ 4.5, & R_m \geq R_{\max} \end{cases} \quad (8)$$

式中: R_m 为用户终端 m 的传输速率; R_{\min} 和 R_{\max} 分别为最小传输速率和最大传输速率需求。其中 α 、 β 分别通过 $R_m = R_{\min}$ 、 $MOS_m(R_m) = 1$ 和 $R_m = R_{\max}$ 、 $MOS_m(R_m) = 4.5$ 求得。

$$R_m = b_{mi} \log_2(1 + b_{mi} p_0 g_{mi} / \sigma^2) \quad (9)$$

式中: p_0 为单位带宽上的发射功率; g_{mi} 为用户终端 m 接入网络 i 时的信道增益; σ^2 表示加性高斯白噪声功率。所有用户终端的平均体验质量效用函数为

$$u_3 = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M MOS_m(R_m) \quad (10)$$

2.2 多目标优化模型

综上, 分层异构网络接入协同选择多目标优化模型可描述为

$$\begin{cases} f_1 = \min_{a_{mi}}(-u_1) \\ f_2 = \min_{a_{mi}} u_2 \\ f_3 = \min_{a_{mi}}(-u_3) \\ \text{s.t.} \begin{cases} \sum_{i=1}^I a_{mi} \leq 1, \forall m \in \{1, 2, \dots, M\} \\ \sum_{m=1}^M b_{mi} \leq C_i, \forall i \in \{1, 2, \dots, I\} \end{cases} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\sum_{i=1}^I a_{mi} \leq 1$, 表示任意用户终端 m 只能选择一个网络接入; $\sum_{m=1}^M b_{mi} \leq C_i$ 表示接入网络 i 的所有用户终端占用的资源不能大于该网络的可用带宽。

2.3 多目标优化模型求解

目前, 与分层优化^[19]研究不同, 对于多目标优化问题的求解主要分为两类。一类是利用加权求和的方法将多目标优化问题转化为单目标优化问题求解^[16,20], 另外一类是利用启发式搜索算法^[21]、遗传算法^[22]及其他智能算法^[23-24]求解。本文采用改进非支配排序遗传算法(Nondominated Sorting Genetic Algorithm Version II, NSGA-II)实现对多目标优化问题的求解^[25]。NSGA-II 作为一种有效的遗

传算法, 用于求解多目标优化问题并获得 Pareto 最优解的集合。

1) 种群初始化

假设初始化种群为 $\mathbf{X}^t = (x_1^t, x_2^t, \dots, x_N^t)$, 其中 x_n^t ($n \in \{1, 2, \dots, N\}$) 表示一个个体, N 为种群规模。初始化迭代次数 $t = 0$ 。种群中每个个体是接入协同选择优化变量。由于接入协同选择优化变量是离散型变量, 同时为了提升算法的运算效率, 本文采用十进制整数编码的方式为每个个体进行编码。即 $x_n^t = \{a_{mi}\}_{M \times I}$ 。

2) 变异

本文通过对接入协同选择优化变量数值的变异, 从而扩大搜索空间, 避免陷入局部陷阱, 具体变异计算方法如式(12)所示。

$$x_n^{t+1} = x_n^t + (x_n^{tu} - x_n^{tl}) \delta_n \quad (12)$$

式中: x_n^{tu} 表示第 n 个个体 x_n^t 取值的上界; x_n^{tl} 表示第 n 个个体 x_n^t 取值的下界; δ_n 表示变异常量, 计算方法如式(13)所示。

$$\delta_n = \begin{cases} (2r_n)^{\frac{1}{m_{um}+1}} - 1, & r_n < 0.5 \\ 1 - [2(1-r_n)]^{\frac{1}{m_{um}+1}}, & r_n \geq 0.5 \end{cases} \quad (13)$$

式中: r_n 表示产生 (0,1) 的随机数; m_{um} 为变异算子。

当种群个体的优化变量为整数时, 需要对变异产生的数值进行取整, 即

$$x_n^{t+1} = \lfloor x_n^t + (x_n^{tu} - x_n^{tl}) \delta_n \rfloor \quad (14)$$

式中, 符号 $\lfloor \bullet \rfloor$ 表示向下取整。

3) 交叉

为了保证种群的多样性, 采用式(15)和式(16)对选择的两个父代种群个体进行交叉, 从而保证父代个体的分量能够被继承, 计算方法如下:

$$x_{1,n}^{t+1} = \frac{1}{2} [(1 - \beta_n) x_{1,n}^t + (1 + \beta_n) x_{2,n}^t] \quad (15)$$

$$x_{2,n}^{t+1} = \frac{1}{2} [(1 + \beta_n) x_{1,n}^t + (1 - \beta_n) x_{2,n}^t] \quad (16)$$

式中, β_n 表示交叉常量, 计算方法为

$$\beta_n = \begin{cases} (2u_n)^{\frac{1}{m_{uc}+1}}, & u_n < 0.5 \\ \frac{1}{[2(1-u_n)]^{\frac{1}{m_{uc}+1}}}, & u_n \geq 0.5 \end{cases} \quad (17)$$

式中: u_n 表示产生 (0,1) 的随机数; m_{uc} 为交叉算子。

4) 选择

本文采用的选择策略是根据非支配排序和拥挤距离计算共同作用的结果。通过计算所有种群个

体的目标函数值, 比较变异交叉后产生的 $t+1$ 代个体 x_n^{t+1} 与 t 代个体 x_n^t 的目标值, 若个体 x_n^{t+1} 支配个体 x_n^t , 则个体 x_n^{t+1} 进入种群 \mathbf{X}^{t+1} , 否则个体 x_n^t 进入种群 \mathbf{X}^{t+1} ; 若个体 x_n^{t+1} 与个体 x_n^t 的目标值相同, 则比较个体 x_n^{t+1} 与个体 x_n^t 的拥挤距离, 且拥挤距离较大的个体进入种群 \mathbf{X}^{t+1} 。其中个体 x_n^{t+1} 支配个体 x_n^t , 满足

$$f_o(x_n^t) < f_o(x_n^{t+1}), o=1,2,\dots,O \quad (18)$$

式中: $f_o(\cdot)$ 表示第 o 个优化目标函数; $<$ 表示左边劣于右边, 当目标函数为最大化目标时, 表示小于, 否则表示大于; O 表示优化目标的个数。拥挤距离为每个个体的 O 个目标函数值的欧式距离。

2.4 最优解的选择

通过上述求解步骤可以得到多目标问题的 Pareto 解集。而在实际网络接入选择机制中, 需要从 Pareto 解集中选择最优解作为用户终端最终的接入方案, 即需要均衡网络协同度、网络负载均衡以及用户体验质量的最优接入协同方案。本文通过式 (19) 确定最优解。

$$\arg \min \left\{ \frac{f_{1j}}{f_{1\max}} + \frac{f_{2j}}{f_{2\max}} + \frac{f_{3j}}{f_{3\max}} \right\}, j=1,2,\dots,J \quad (19)$$

式中: J 表示 Pareto 解集中解的个数; $f_{o\max}$ 表示第 o 个目标的上界, $o=1,2,3$ 。由于 Pareto 解集中的用户终端最终的接入方案不能保证网络协同度、网络负载均衡以及用户体验质量同时最优, 但可以希望 $\frac{f_{1j}}{f_{1\max}} + \frac{f_{2j}}{f_{2\max}} + \frac{f_{3j}}{f_{3\max}}$ 越小越好, 因而式(19)是目标 f_1 、 f_2 和 f_3 的较好折衷, 从而与均衡网络协同度、网络负载均衡以及用户体验质量的最优接入协同方案保持一致。

3 仿真实验与结果分析

3.1 仿真参数设置

本文仿真场景如图 1 所示, 分层异构无线网络包含 LTE230、LTE1800 以及 WLAN 网络。考虑电力通信^[26]时用户终端进行实时业务和非实时业务^[27]传输, 且用户终端随机分布在网络覆盖范围内。假设信道衰落特性包含大尺度衰落(路径损耗)和小尺度衰落(频率选择特性)。其中, 大尺度衰落采用自由空间传播模型 $d^{-\alpha}$, d 为基站与用户之间的距离, α 为衰落因子, 小尺度衰落服从瑞利分布。种群规模 $I=100$, 最大迭代次数 $gen=100$, 交叉概率 $p_c=0.9$, 变异概率 $p_m=0.03$, 交叉算子 $m_{uc}=20$, 变异算子 $m_{um}=20$ 。具体的仿真参数如表 2 所示,

其中费用是指 LTE 建设、维护以及 WLAN 带宽租赁费用。

表 2 仿真参数

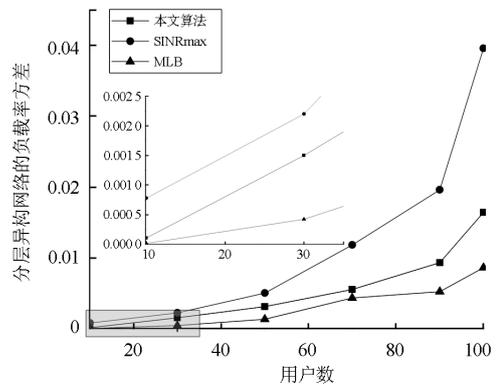
Table 2 Simulation parameter

参数名称	LTE230	LTE1800	WLAN
费用/(1年/万元)	146	106	126
丢包率	0.1	0.1	0.15
时延/s	1	0.005	5
频谱效率/(bps/Hz)	5	2.44	20
覆盖半径/km	3	1	0.2
总带宽/MHz	1	5	11
基站最大发射功率/dBm	43	43	20
实时业务的带宽需求/(kbit/s)	64	64	64
非实时业务的带宽需求/(kbit/s)	5	5	5
噪声功率密度/dBm	-136	-136	-136
大尺度衰落因子 α	3.5	3.5	3.5

3.2 仿真结果及分析

为了证明本文接入协同选择方案的有效性, 并保证算法性能对比的公平性, 本节从网络维度(网络负载均衡程度)和用户维度(用户中断概率、用户平均体验质量)分别与 SINRmax 算法以及多接入选择负载均衡(Multi-Radio Access Selection Load Balance, MLB)算法做对比, 使得每个算法的优势都能得到体现, 同时反映出各个算法的不足之处。

图 3 分析了分层异构无线网络负载均衡程度。可以看出, 随着接入用户终端个数的增加, 由于各个网络的覆盖范围不同, 各个网络覆盖范围内的用户终端数量、负载率差异性变大, 因而三种算法的网络负载率方差都会增加。另外, 图 3(a)和图 3(b)分别对比了用户终端传输实时业务和非实时业务时的负载均衡程度。可以看出, 随着用户终端传输业务带宽需求的增加, 异构网络的负载率方差会增加。这是由于负载率差异性变大的结果。显然, 本文算



(a) 用户终端传输实时业务时的网络负载率方差

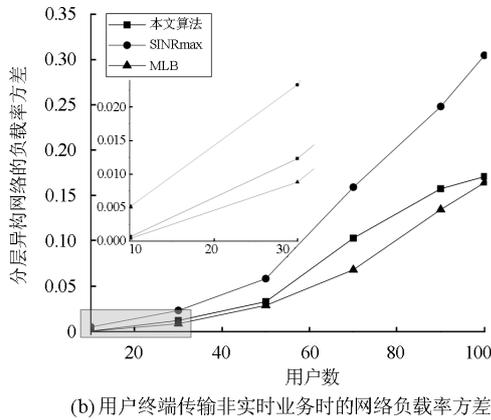


图3 负载率方差

Fig. 3 Load rate variance

法的网络负载均衡程度优于 SINRmax 算法，而 MLB 算法的网络负载均衡程度优于本文算法。这是由于本文算法接入选择时不仅考虑了网络维度的负载均衡性能，而且从用户维度考虑了用户的体验质量等，而 SINRmax 算法并未考虑网络负载的均衡性能，MLB 算法考虑了网络负载的均衡性能。

图4分析了分层异构无线网络中断概率情况。可以预计，随着接入用户终端个数的增加，其中断概率会随之增加。这是由于随着用户终端个数的增多，各个网络可用带宽越来越紧缺，难以保证用户终端的满意接入。进一步地，由图4可知，本文算法的用户中断概率曲线介于 SINRmax 与 MLB 算法之间，其中断概率性能优于 MLB 算法，劣于 SINRmax 算法。本文算法出现用户终端传输业务中断，晚于 MLB 算法，早于 SINRmax 算法。这是由于 SINRmax 算法要求用户终端接入接收信号更强的网络，其用户终端传输速率最大，因而中断概率最小。而 MLB 算法优先考虑网络负载均衡性能，无法保证用户终端传输速率最优，因而中断概率最大。另外，图4(a)和图4(b)分别对比了用户终端传

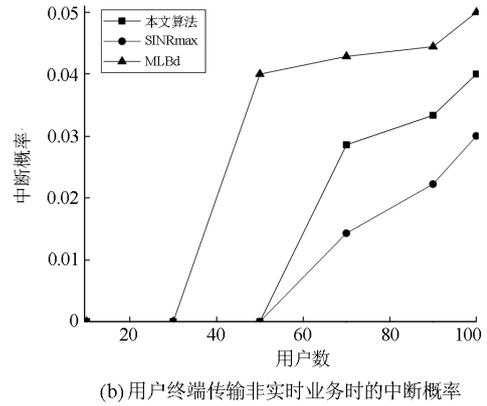
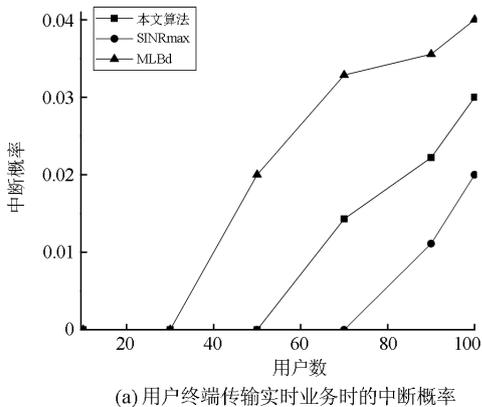


图4 用户中断概率

Fig. 4 User outage probability

输实时业务和非实时业务时的中断概率情况。可以看出，随着用户终端传输业务带宽需求的增加，其中断概率会相应提升。这是由于用户终端带宽需求的增加，导致网络可用带宽紧缺程度增加，从而使得用户终端业务传输难以保证。

图5分析了分层异构无线网络的用户平均体验质量情况。可以看出，本文算法的用户平均体验质

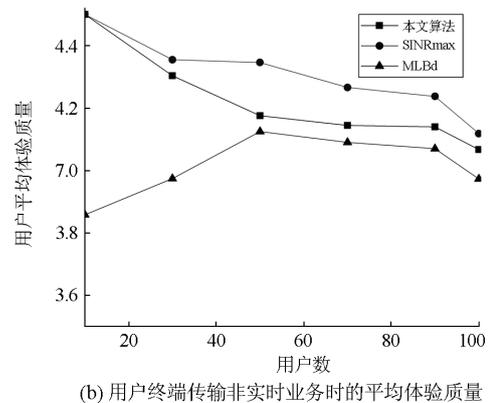
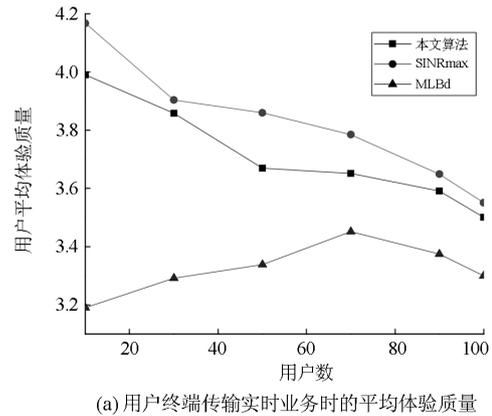


图5 用户平均体验质量

Fig. 5 Average user quality of experience

量曲线介于 SINRmax 与 MLB 算法之间, 其用户平均体验质量性能优于 MLB 算法, 劣于 SINRmax 算法。随着用户终端个数的增加, 由于网络可用带宽资源受限, 三种算法的用户体验质量最终将会减小。MLB 算法由于其主要考虑网络负载均衡性能最优, 忽略了用户体验质量性能, 因而随着用户终端个数的逐渐增加, 其用户接入合适网络的概率增加, 因而其用户体验质量会随之增加。

4 结论

针对电力场景中用户终端分别承载实时和非实时业务, 研究分层异构无线专网如何选择接入的问题。本文综合考虑了网络的静态性能指标和动态性能指标中网络整体协同度、负载均衡以及用户体验质量三个主要目标, 并与现有的方案进行了性能比较。仿真结果表明, 本文提出的接入选择方案在承载实时和非实时业务时, 其负载均衡性能优于 SINRmax 接入选择策略, 并在中断概率和用户平均体验质量性能方面要优于 MLB 接入选择策略。因而保证了各个性能指标之间的均衡性, 确保了网络侧和用户侧性能的均衡性提升。

参考文献

- [1] 陆茜文. 电力无线专网规划技术研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
LU Qianwen. The power wireless special network planning technology research[D]. Wuhan: Wuhan University, 2018.
- [2] 周浩, 吴国庆, 陆竣, 等. TD-LTE 230 无线专网在嘉兴电力通信的应用[J]. 浙江电力, 2018, 37(5): 16-21.
ZHOU Hao, WU Guoqing, LU Hong, et al. Application of TD-LTE 230 wireless private network in Jiaxing power communication[J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(5): 16-21.
- [3] 闫龙, 王智海, 祁兵. 基于 GNU Radio 的 230 MHz 多通道主站电台的设计[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(9): 100-104.
YAN Long, WANG Zhihai, QI Bing. Design of 230 MHz multi-channel master station radio based on GNU Radio[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(9): 100-104.
- [4] 徐杰, 侯功华, 何尚骏, 等. 基于 TD-LTE 1800MHz 的电力无线专网覆盖性能优化研究[J]. 信息通信, 2018, 1(1): 127-128.
XU Jie, HOU Gonghua, HE Shangjun, et al. Research on coverage performance optimization of power wireless private network based on TD-LTE 1800 MHz[J]. Information & Communications, 2018, 1(1): 127-128.
- [5] NAVARATNARAJAH S, HAN C, DIANATI M, et al. Adaptive stochastic radio access selection scheme for cellular-WLAN heterogeneous communication systems[J]. IET Communications, 2016, 10(15): 1986-1994.
- [6] 李映雪, 朱文广, 黄超, 等. 基于自组织临界性的电力异构通信网络稳定性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 118-122.
LI Yingxue, ZHU Wenguang, HUANG Chao, et al. Research on stability of power heterogeneous communication network based on self-organization criticality[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 118-122.
- [7] 俞鹤伟, 梁根. 异构无线网络接入选择算法综述[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(11): 178-188.
YU Hewei, LIANG Gen. A survey of access selection algorithms in heterogeneous wireless networks[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(11): 178-188.
- [8] 刘斌, 朱琦. 多网络接入协同选择与聚合算法[J]. 信号处理, 2017, 33(1): 25-35.
LIU Bin, ZHU Qi. Multi-network access collaborative selection and aggregation algorithm[J]. Journal of Signal Processing, 2017, 33(1): 25-35.
- [9] 陈美娟. 无线网络资源协同优化方法及其关键技术[D]. 南京: 南京邮电大学, 2016.
CHEN Meijuan. Resource collaborative optimization methods and key techniques in wireless networks[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2016.
- [10] 冯宝, 高雪, 龚亮亮. 电力无线通信系统中基于灰度关联层次分析的异构网络选择算法[J]. 电子设计工程, 2018, 26(10): 35-40.
FENG Bao, GAO Xue, GONG Liangliang. A heterogeneous network selection algorithm based on gray relation hierarchy analysis in power wireless communication system[J]. Electronic Design Engineering, 2018, 26(10): 35-40.
- [11] 孙文琦. 面向未来无线网络的资源管理研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
SUN Wenqi. Research on resource management for future wireless networks[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.
- [12] 夏玮玮, 丁兆明, 沈连丰. 异构网络中基于负载传递的联合接纳控制算法[J]. 通信学报, 2018, 39(5): 34-47.
XIA Weiwei, DING Zhaoming, SHEN Lianfeng. Joint admission control algorithm based on load transfer in heterogeneous networks[J]. Journal on Communications, 2018, 39(5): 34-47.
- [13] 王鲁浩, 李歧强, 丁然, 等. 可再生能源微网鲁棒多目标优化调度[J]. 电工技术学报, 2017, 32(5): 184-192.
WANG Luhao, LI Qiqiang, DING Ran, et al. Renewable energy microgrid robust multi-objective optimization scheduling[J]. Transactions of China Electrotechnical

- Society, 2017, 32(5): 184-192.
- [13] 肖浩, 裴玮, 孔力. 含大规模电动汽车接入的主动配电网多目标优化调度方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(增刊 2): 179-189.
XIAO Hao, PEI Wei, KONG Li. Multi-objective optimal scheduling method for active distribution network with large-scale electric vehicle access[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(S2): 179-189.
- [15] 郑能, 丁晓群, 管志成, 等. 含多种分布式电源的配电网多目标无功优化研究[J]. 智慧电力, 2017, 45(5): 17-21.
ZHENG Neng, DING Xiaoqun, GUAN Zhicheng, et al. Research on multi-objective reactive power optimization of distribution network with multiple distributed power sources[J]. Smart Power, 2017, 45(5): 17-21.
- [16] TAO M, DONG M, OTA K, et al. Multiobjective network opportunistic access for group mobility in mobile Internet[J]. IEEE Systems Journal, 2018, 12(1): 1-10.
- [17] 王大鸣, 陈松, 崔维嘉, 等. 多用户 MIMO-OFDM 系统基于 QoE 效用函数的跨层资源分配[J]. 通信学报, 2014, 35(9): 175-183.
WANG Daming, CHEN Song, CUI Weijia, et al. QoE utility function-based cross-layer resource allocation in multi-user MIMO-OFDM systems[J]. Journal on Communications, 2014, 35(9): 175-183.
- [18] WU R Z, ZHU J J, HU H L, et al. Resource allocation for relay-aided cooperative systems based on multi-objective optimization[J]. KSII Transactions on Internet and Information Systems, 2018, 12(5): 2177-2193.
- [19] 张春阳, 张攀, 周倩, 等. 含风电场电力系统的可用输电能力分层优化决策研究[J]. 智慧电力, 2017, 45(1): 27-31.
ZHANG Chunyang, ZHANG Pan, ZHOU Qian, et al. Research on stratified optimization decision of available transmission capability of power system containing wind farm[J]. Smart Power, 2017, 45(1): 27-31.
- [20] 陈丽萍, 林晓明, 许苑, 等. 基于能源集线器的微能源网建模与多目标优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 9-16.
CHEN Liping, LIN Xiaoming, XU Yuan, et al. Modeling and multi-objective optimal dispatch of micro energy grid based on energy hub[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 9-16.
- [21] BATAWY S A E, GRAY M K, MORSI W G. Multi-objective optimization of energy storage and wind DGs for self-adequacy of microgrid equipped with fast DC charging station[C] // Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference, April 23-26, 2017, Washington, DC, USA: 1-5.
- [22] 张福民, 崔海波, 李占凯, 等. 基于改进 NSGA-II 算法的微网交互式多目标优化[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(12): 24-31.
ZHANG Fumin, CUI Haibo, LI Zhankai, et al. Interactive multi-objective optimization of microgrid based on improved NSGA-II algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(12): 24-31.
- [23] REN C, XU Y, ZHANG Y. Post-disturbance transient stability assessment of power systems towards optimal accuracy-speed tradeoff[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 194-203. DOI: 10.1186/s41601-018-0091-3.
- [24] 丁丹军, 戴康, 张新松, 等. 基于模糊多目标优化的电动汽车充电网络规划[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(3): 43-50.
DING Danjun, DAI Kang, ZHANG Xinsong, et al. Network planning for electric vehicle charging based on fuzzy multi-objective optimization[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(3): 43-50.
- [25] 吴润泽, 高丽媛, 唐良瑞, 等. 认知无线网 Underlay 模式下频谱资源优化分配[J]. 北京邮电大学学报, 2017, 40(1): 105-110.
WU Runze, GAO Liyuan, TANG Liangrui, et al. Optimal spectrum allocation of cognitive wireless network under underlay mode[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2017, 40(1): 105-110.
- [26] 吕振宇, 苏晨, 吴在军, 等. 孤岛型微电网分布式二次调节策略及通信拓扑优化[J]. 电工技术学报, 2017, 32(6): 209-219.
LÜ Zhenyu, SU Chen, WU Zaijun, et al. Distributed secondary regulation strategy and communication topology optimization of island-type microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(6): 209-219.
- [27] 唐良瑞, 盛洁, 祁兵, 等. 面向智能配电网的异构融合通信网络动态负载均衡[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 39-49.
TANG Liangrui, SHENG Jie, QI Bing, et al. Dynamic load balancing in heterogeneous integrated communication networks oriented to smart distribution grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 39-49.

收稿日期: 2018-11-12; 修回日期: 2019-03-08

作者简介:

唐元春(1973—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为电力通信与信息网络规划;

朱佳佳(1990—), 女, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为无线资源管理。E-mail: 15811446189@126.com

(编辑 许威)