

面向配电网的 5G 异构网络部署策略 *

张 平¹, 邱 超¹, 张琳娟¹, 郑 征¹, 樊 冰², 辛亚楠²

(1. 国网河南省电力公司经济技术研究院, 河南 郑州 450000;

2. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

摘要: 随着能源互联网的发展与“双碳”能源发展目标的提出, 配电网将产生一批新兴业务用以监测和控制网络运行情况。为适应配电网业务通信新需求, 提出一种考虑终端重要性的宏微基站联合部署策略。该策略考虑终端业务承载状况, 基于业务重要度来量化配电网中终端重要性, 并以终端重要性作为权重, 以加权信噪比、部署成本与终端覆盖重叠度作为优化目标, 采用遗传算法实现 5G 宏基站与微基站的联合部署。仿真验证表明, 该部署策略在加权信噪比与部署成本上均优于对比算法, 可有效提高配电网中 5G 网络的部署效益。

关键词: 配电网通信; 5G 网络部署; 宏微协同; 终端重要度

中图分类号: TN929.53; TP393

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.212496

中文引用格式: 张平, 邱超, 张琳娟, 等. 面向配电网的 5G 异构网络部署策略[J]. 电子技术应用, 2022, 48(3): 13–17.

英文引用格式: Zhang Ping, Qiu Chao, Zhang Linjuan, et al. A 5G heterogeneous network deployment strategy for power distribution network[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(3): 13–17.

A 5G heterogeneous network deployment strategy for power distribution network

Zhang Ping¹, Qiu Chao¹, Zhang Linjuan¹, Zheng Zheng¹, Fan Bing², Xin Yanan²

(1. State Grid Henan Electric Power Company Economic Research Institute, Zhengzhou 450000, China;

2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,

North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: With the development of the Energy Internet and the “dual-carbon” goal, a batch of new services will bloom to monitor and control the operation of power distribution network. To adapt to the developing demands of power distribution network, a terminal importance-based base-station deployment strategy(TI-BSDS) is proposed. The strategy takes into account the terminal service carrying status, quantifies the importance of the terminal in the distribution network based on the importance of the service, and taking importance of the terminal as weight, using the weighted signal-to-interference and noise ratio, deployment cost and terminal overlap coverage as the optimization target, adopts genetic algorithm to realize the deployment of 5G macro base stations and micro base stations. Simulation results show that TI-BSDS is superior to the comparison algorithms in terms of weighted signal-to-noise ratio and deployment cost, and TI-BSDS can effectively improve the deployment benefit of 5G networks in power distribution networks.

Key words: power distribution network; 5G network deployment; macro and micro collaboration; terminal importance

0 引言

随着能源互联网的发展与“双碳”目标的提出, 配电网将产生一批新兴业务, 已有业务的通信需求及分布特征也将发生变化。5G 通信技术具有大带宽、低时延和广连接的突出优势^[1], 与能源互联网发展战略、配电网业务需求高度吻合, 是支撑配电网通信的最佳选择。

5G 宏基站覆盖范围小于 3G/4G 基站, 需要通过部署微基站实现网络覆盖^[2-4]。已有基站部署策略研究中, 大多采用遗传算法^[5-6]、免疫算法^[7-9]、贪婪算法^[10]等算法进行基站部署策略优化求解。上述研究忽略了终端的

多样性, 还未实现多种基站联合部署。

为满足配电网业务通信未来需求, 本文提出一种考虑终端重要性的宏微基站联合部署策略(Terminal Importance-based Base Station Deployment Strategy, TI-BSDS)。该策略基于配电网业务对通信指标的需求程度求解各业务重要度, 然后基于配电终端承载业务情况得到配电终端重要度, 最后以覆盖重叠度、部署成本、终端加权信噪比为优化目标, 采用遗传算法求解部署方案, 实现终端全覆盖, 提高重要配电终端的通信服务质量。

1 系统模型

5G 基站工作频段高, 信号衰减大, 其覆盖半径仅为 4G 基站的 0.3~0.5 倍^[2], 仅部署宏基站难以满足网络建

* 基金项目: 国家自然科学基金(51677065)

设低成本、高效益目标。微基站覆盖半径小,建造成本低,因而本文采用“宏微协同”的异构网络架构,其网络模型如图1所示。

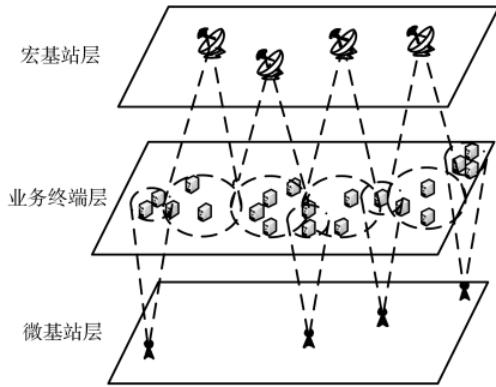


图1 分层异构网络模型

2 配电终端重要性

2.1 配电业务重要度

针对非数值型指标,通过映射函数 f_1 实现数值化:

$$f_1(k, s, q) = \begin{cases} 1, & q(k, s) = 1 \\ f_1(k, s, q-1) + 1, & s(k, s) > s(k, q-1) \\ f_1(k, s, q-1), & s(k, s) < s(k, q-1) \end{cases} \quad (1)$$

其中, K 为通信指标集,通信指标 $k \in K$,将业务类型按照对指标要求的高低程度升序排序,对指标要求越高的业务类型序号越大,要求相同的业务排序随机;业务类型 $s \in S$; $q(k, s)$ 为业务类型 s 在指标 k 下排序后的序号; $s(k, q)$ 为指标 k 下序号 q 对应的业务类型;符号 $>$ 表示左侧业务类型比右侧业务类型重要; $<$ 表示两侧业务类型同等更重要。

针对数值差异较小的指标,本文通过映射函数 f_2 扩大差异并归一化:

$$f_2(y_k) = \frac{\min}{\max - \min} (1-X) + X \quad (2)$$

其中, y_k 为业务对指标的需求值, y_k^{\min} 、 y_k^{\max} 分别为业务对指标 k 需求的最小值和最大值; $0 < X < 1$,为映射后的区间下限值。

针对数值跨度较大的指标,本文通过映射函数 f_3 缩小跨度:

$$f_3(y_k) = \ln y_k \quad (3)$$

对业务通信指标需求数值化后,若指标为效益型,采用式(2)进行归一化,若指标为成本型时,采用 f_4 进行归一化:

$$f_4(y_k) = \frac{\max}{\max - \min} (1-X) + X \quad (4)$$

业务通信指标权重列向量 $W(S)$ 中的业务 j 的通信指标权重定义为:

$$W^j(S) = W_1^j(S) W_2^j(S) \quad (5)$$

其中, $W_1^j(S) W_2^j(S)$ 为列向量 $W_1(S)$ 与 $W_2(S)$ 中的第 j 个元素相乘, $W_1(S)$ 为熵权法下通信指标权重,为 n 维列向量, n 为通信指标数; $W_2(S)$ 为层次分析法下通信指标权重,为 n 维列向量。

业务类型 j 的业务重要度 I_j 为:

$$I_j = b_j W(S) \quad (6)$$

其中, b_j 为业务类型 j 的通信指标需求数值化与归一化后的结果,为 n 维行向量。

2.2 终端重要度

定义终端集 T 对应的重要度列向量 W_T 为:

$$W_T = AI \quad (7)$$

其中, I 为业务重要度向量,为 m 维列向量, m 为业务类型的数量; A 为业务在终端的分布状况,为 $t \times m$ 维矩阵, t 为终端数量, A 中元素 a_{ij} 表示终端 i 承载业务 j 的状况:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{终端 } i \text{ 承载业务 } j \\ 0 & \text{终端 } i \text{ 不承载业务 } j \end{cases} \quad (8)$$

3 基于终端重要度的5G基站部署策略

3.1 基站候选位置集

为平衡算法效果和复杂度,本文以实现网络全覆盖为目标,进行网络网格化,并构成候选基站集 Q_1 ,具体方法如图2所示。

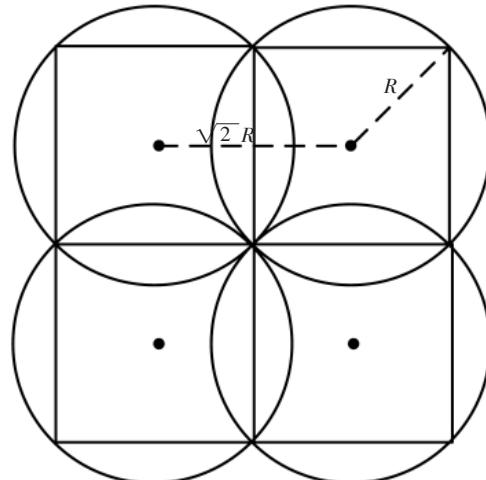


图2 网格化得到基站候选位置

R 为微基站覆盖半径,实现网络全覆盖时,候选基站间最近距离为 $\sqrt{2}R$,因此本文以 $\sqrt{2}R$ 为距离间隔选取候选基站位置,记为 Q_1 。

为降低建网成本,快速部署5G网络,应在有条件情况下复用公网资源与配电网设施^[11],故本文将已有4G杆塔与配电机房所在位置也作为基站候选位置,构成候选基站集 Q_2 。候选基站位置集合 $Q = Q_1 \cup Q_2$ 。

3.2 优化目标

本文基于覆盖重叠度、终端信噪比和部署成本构建优化目标函数,求解最佳部署方案。定义 F_1 为网络部

署成本：

$$F_1 = \mathbf{L}_0 \cdot \boldsymbol{\eta}_0 + \mathbf{L}_1 \cdot \boldsymbol{\eta}_1 \quad (9)$$

其中, \mathbf{L}_0 表示宏基站部署方案, 为 N 维行向量, 每个元素对应一个基站候选位置, 若某个位置部署宏基站, 则对应元素为 1, 否则为 0; N 为候选基站位置数; $\boldsymbol{\eta}_0$ 为宏基站部署成本, 为 N 维列向量, 每个元素对应该位置建设宏基站的单位化成本, 依据位置是否存在基础设施而确定; \mathbf{L}_1 为微基站部署方案, $\boldsymbol{\eta}_1$ 为微基站部署成本, 定义同宏基站。

为衡量网络终端处信号干扰状况, 将终端可加入的最少同类型基站的数量定义为终端的覆盖重叠度, 终端平均覆盖重叠度定义为网络覆盖重叠度 F_2 :

$$F_2 = \frac{\sum_{i=1}^t u_i}{t} \quad (10)$$

其中, t 为终端数量, u_i 表示终端 i 的覆盖重叠度:

$$u_i = \min \left\{ \sum_v q_{iv}^0, \sum_v q_{iv}^1 \right\} \quad (11)$$

其中, q_{iv}^0 表示候选位置 v 部署宏基站及对终端 i 的覆盖情况, 若候选位置 v 部署宏基站且该基站覆盖终端 i 则 $q_{iv}^0 = 1$, 否则 $q_{iv}^0 = 0$; q_{iv}^1 表示微基站部署及对终端 i 的覆盖情况, 定义类同于 q_{iv}^0 。宏、微基站的覆盖范围一般分别为 300~500 m 和 50~200 m^[12], 本文中, 宏基站覆盖范围取 300 m, 微基站覆盖范围取 100 m。

定义 F_3 为终端信噪比:

$$F_3 = \frac{\omega W_T}{W_{T_{\max}}} \quad (12)$$

其中, $W_{T_{\max}}$ 为终端重要度最大值; ω 表示终端信噪比, 为 t 维行向量, 终端 i 的信噪比可定义为:

$$\omega_i = \max \left\{ \frac{P_w^0 q_{iv}^0}{\sum_{v \in Q} P_w^0 q_{iv}^0 + \delta}, \frac{P_w^1 q_{iv}^1}{\sum_{v \in Q} P_w^1 q_{iv}^1 + \delta} \right\} \quad (13)$$

其中, δ 为噪声功率; P_w^0 、 P_w^1 分别为候选位置部署宏、微基站时, 终端 i 处的功率:

$$P_w = \frac{G_b(P_B + P_t)}{d^\alpha} \quad (14)$$

其中, G_b 为基站的功率增益, P_B 为基站静态功率, P_t 为基站发射功率。上述参数需要依据候选位置 v 处基站部署情况确定, 当部署宏基站时, 将 P_w 记为 P_w^0 ; 当部署微基站时, 将 P_w 记为 P_w^1 ; 当不部署基站时 $P_w=0$, P_w^0 、 P_w^1 均为 0; d 为候选位置 v 与终端 i 的距离; α 为功率衰减因数, 一般 $\alpha=2$ 。

本文优化目标为:

$$F = \frac{F_3}{F_1 F_2} \quad (15)$$

3.3 遗传算法求解

基于优化目标 F , 本文采用遗传算法求解 5G 基站部署策略, 具体步骤为:

(1) 种群初始化。生成 $g \times N$ 维矩阵 D , g 为种群规模, D 中元素 $D_{ij} \in \{0, 1, 2, 3\}$, 分别表示方案 i 中候选位 j 处不部署基站、部署宏基站、部署微基站和不部署基站。

(2) 优势个体选择。将各基站部署方案拆分为宏基站部署方案 L_0 和微基站部署方案 L_1 , 带入式(9)和式(11), 进而通过式(15)计算适应度函数, 若某基站部署方案终存在 $u_i=0$, 令该方案的适应度函数 $F=\infty$, 以保证终端的全覆盖; 然后, 对当前种群适应度 F 降序排序, 适应度在前 $a\%$ 的个体作为优势个体。

(3) 种群更新。采用轮盘赌方法从非优势个体中选取父代, 执行随机单点交叉和随机单点变异, 产生 $g(1-a\%)$ 个子代, 子代与父代共同构成新一代种群。

(4) 若当前迭代次数 h 达到上限 H , 将当前最优个体作为最优基站部署方案输出, 否则, $h=h+1$, 返回步骤(2)。

4 仿真结果与分析

为验证 TI-BSDS 的有效性, 将 TI-BSDS 与基于免疫遗传算法的 5G 基站选址策略(IGBSL)^[5]和基于竞争函数的无线接入站址选址算法(CFSSA)^[13]进行对比仿真分析。

以 2 km×2 km 配电网为例, 配电终端与基础设施分布如图 3 所示, 业务分布状况如表 1 所示, 相关仿真参数如表 2 所示。

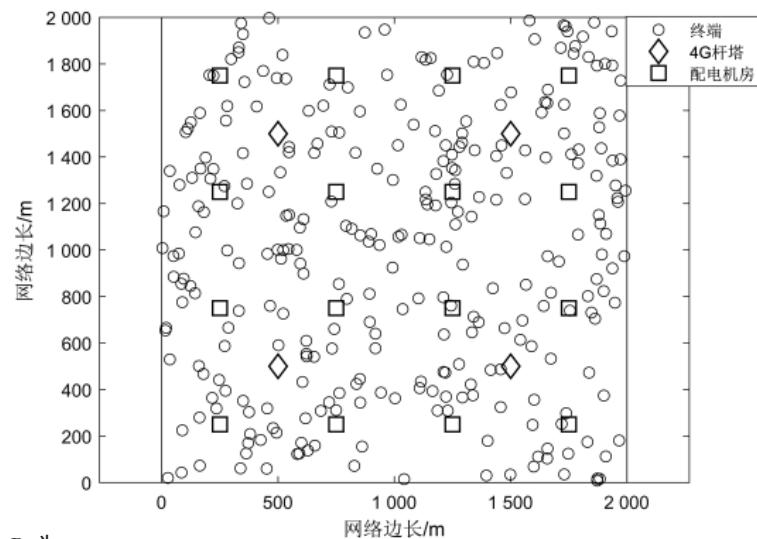


图 3 配电终端与基础设施分布

本文所述策略 TI-BSDS 与 IGBSL 和 CFSSA 的基站部署结果如图 4 所示, 网络性能参数如表 3 所示。

TI-BSDS 共联合部署 7 个宏基站与 7 个微基站协同实现网络全覆盖, 通过对宏基站覆盖重叠区域部署微基站的方法提高网络终端的信噪比, 保证重要终端的通信质量; 对已有 4G 杆塔设备、配变机房、基础设施的利用率为 25%、31.25% 和 25%, 网络建设单位化成本

表 1 配电终端业务

名称	端到端时延/s	用户体验速率/(kb/s)	连接数密度/(台/km ²)	误码率	可靠性
遥测	30	64	105	1×10^{-3}	极高
遥信	30	64	105	1×10^{-3}	极高
遥控	6	10	105	1×10^{-4}	极高
遥调	6	10	64	1×10^{-4}	极高
分布式馈线自动化	1	30	20	1×10^{-5}	高
配电视频监控	0.2	2 000	64	1×10^{-3}	高
电力调度电话	0.15	64	30	1×10^{-3}	极高
电力设备运行状态监测	1	4	90	1×10^{-3}	高
电能质量监测	0.5	24	32	1×10^{-5}	高

表 2 仿真参数

符号	含义	数值
a	优势个体比例/%	20
C_0	宏基站单位化部署成本	1.0
C_0^0	4G杆塔处宏基站单位化部署成本	0.6
C_0^1	配电机房处宏基站单位化部署成本	0.7
P_T	宏基站发射功率/dBm	46
P_B	宏基站静态功率/dBm	56
G_B	宏基站增益	14
H	迭代上限	2 000
C_1	微基站单位化部署成本	0.2
C_1^0	4G杆塔处微基站单位化部署成本	0.12
C_1^1	配电机房处微基站单位化部署成本	0.14
P_t	微基站发射功率/dBm	38
P_b	微基站静态功率/dBm	45
G_S	微基站增益	14

仅为 6.74, 明显低于 IGBSL 与 CFSSA。但由于 TI-BSDS 为多目标联合优化, 为实现低成本建设与终端高加权信干噪比, 导致网络覆盖重叠度略有提升, 故 TI-BSDS 策略下的网络覆盖重叠度指标略高于 IGBSL, 但优于 CFSSA。

IGBSL 基于 4G 杆塔以网络建设成本与终端覆盖率为目标进行基站部署, 通过 6 个宏基站实现了网络

表 3 部署方案性能对比

部署方案	TI-BSDS	IGBSL	CFSSA
宏基站数	7	6	8
微基站数	7	9	0
基站部署总成本	6.74	7.40	8.00
4G杆塔利用率/%	25	25	0
配电机房利用率/%	31.25	0	0
基础设施总利用率/%	30	5	0
网络覆盖重叠度	1.167	1.107	1.487

中约 85% 的终端覆盖, 对于分散的少数未被覆盖终端, 需要部署 9 个微基站实现网络全覆盖, 对 4G 杆塔、配电机房及基础设施的利用率分别为 25%、0% 和 5%, 网络建设单位化成本为 7.40, 高于 TI-BSDS。此外, 该策略下相同类型基站间隔较远, 因此网络覆盖重叠度较小。

CFSSA 仅考虑覆盖率, 通过部署 8 个宏基站实现网络全覆盖。由于该策略未考虑基础设施, 因而 4G 杆塔、配电机房、基础设施的利用率均为 0%, 网络建设单位化成本为 8.0, 大于其他算法。此外, 由于同类型基站重叠区域大, 其覆盖重叠度远大于 TI-BSDS 与 IGBSL。

为进一步观察网络中重要终端的信干噪比情况, 本文将终端按重要度均匀分为 10 组, 将各组重要等级依次定义为 1~10, 等级 1 为最重要, 等级 10 为最不重要, 各重要度等级下的信干噪比为各分组内终端的信干噪比均值, 各组归一化后的信干噪比如图 5 所示。由于

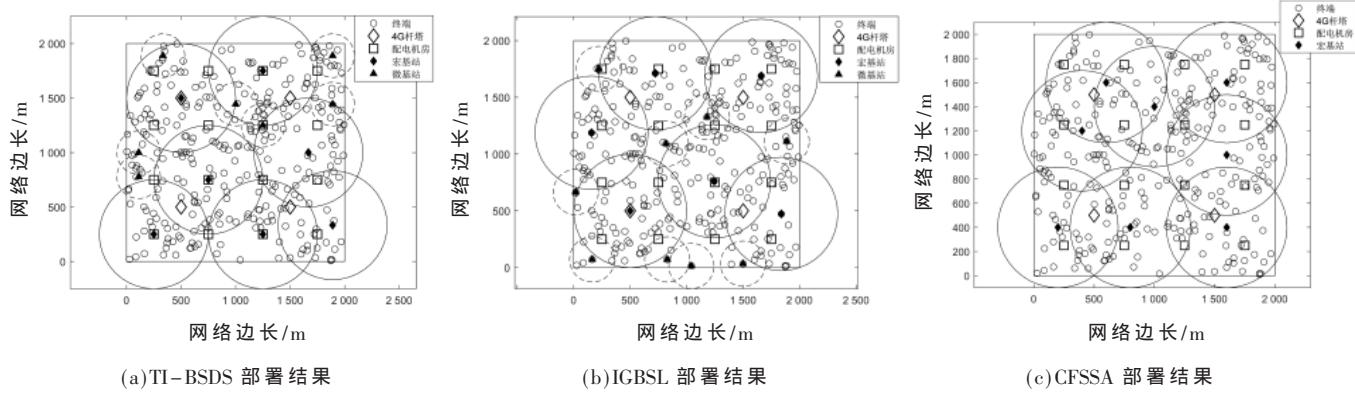


图 4 基站部署结果图

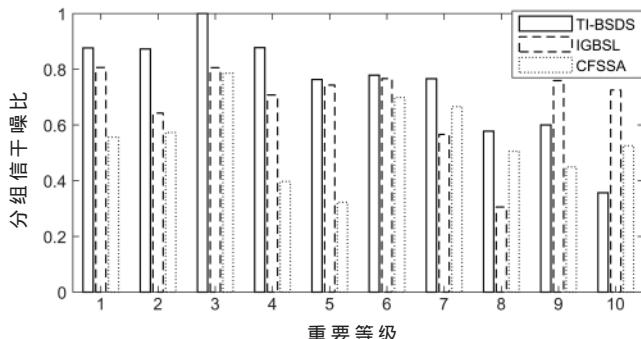


图 5 终端分组信干噪比

TI-BSDS 策略考虑了加权信干噪比, 因而该策略下, 较为重要的终端其信干噪比普遍较大, 保障了重要终端的通信质量。IGBSL 与 CFSSA 中均未考虑终端信干噪比与终端重要性之间的关系, 因而其信干噪比与终端重要等级不相关, 无法保障重要终端通信质量。

为更加直观地观察各网络部署方案下的 5G 网络部署投资效益, 定义网络部署效益为:

$$\eta = \frac{\omega W_T}{F_1} \quad (16)$$

各算法下网络部署效益归一化结果如图 6 所示。与另外两种算法对比, TI-BSDS 部署策略成本最低、加权终端信干噪比最高, 网络部署效益最高。TI-BSDS 通过利用已有基础设施来降低网络部署成本, 通过区分终端服务来保障网络服务质量, 通过宏微基站联合部署进一步降低网络部署成本和提高重要终端信干噪比, 因此 TI-BSDS 下的网络部署效益明显高于对比算法。

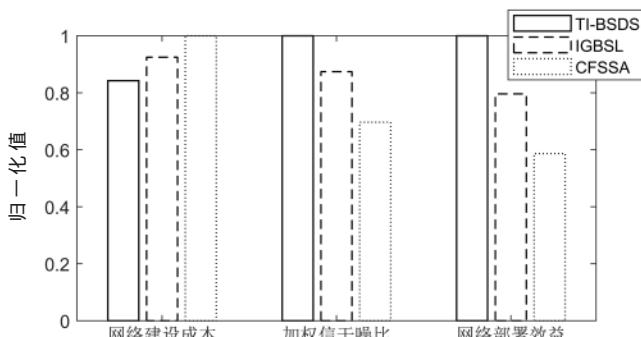


图 6 网络性能归一化对比结果

5 结论

考虑配电网业务特征, 本文提出了一种基于网络部署成本、终端加权信干噪比与网络覆盖重叠度的 5G 基站部署策略 TI-BSDS。该策略中, 基于终端承载业务重要性来衡量终端重要性, 通过加权信干噪比优化目标来保障重要终端的通信质量。同时, 为了降低网络部署成本, 在候选基站位置集合中加入已有基础设施位置, 以

充分利用已有基础设施。基于 5G 异构网络特征, 为进一步优化宏微基站联合部署效益, 通过网络覆盖重叠度优化目标约束基站部署数量同时优化重要终端处的信干噪比。基于上述优化目标, 采用遗传算法进行求解并与已有部署算法进行仿真对比, 对比结果证明了 TI-BSDS 的有效性, 该方法可为 5G 技术在配电网中的规模化应用提供有价值的参考。

参考文献

- [1] LV Z, SINGH A K, LI J. Deep learning for security problems in 5G heterogeneous networks[J]. IEEE Network, 2021, 35(2): 67–73.
- [2] 贝斐峰, 华昉. 浅析小基站在 5G 网络覆盖中的应用[J]. 通信世界, 2019(22): 20–22.
- [3] 沈爱国, 黄国晖. 5G 微站站址部署的策略探讨[J]. 信息通信, 2017(5): 158–159.
- [4] LEE D, JANG G, HA T, et al. BS deployment strategy and energy efficient BS switching in heterogeneous networks for 5G[C]//2021 International Conference on Information Networking(ICON), 2021: 727–729.
- [5] 谢许凯, 程松林. 基于免疫遗传算法的 5G 基站选址规划[J]. 现代信息科技, 2020, 4(2): 4–6.
- [6] 任贊. 面向智能配用电的绿色基站规划及优化方法研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2017.
- [7] 李纪鲁, 张晓, 朱杰. 基于自适应免疫算法的配送中心选址问题研究[J]. 中国储运, 2019(8): 141–144.
- [8] 陈实. 基于改进的人工免疫算法的 NB-IoT 基站选址研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2020.
- [9] 张英杰, 毛赐平, 俎云霄, 等. 基于免疫算法的 TD-SCDMA 网络基站选址优化[J]. 通信学报, 2014, 35(5): 44–48.
- [10] COSKUN C C, AYANOGLU E. A greedy algorithm for energy-efficient base station deployment in heterogeneous networks[C]//2015 IEEE International Conference on Communications(ICC), 2015: 7–120.
- [11] 孙丽楠, 朱红绿, 孙慧. 面向工业的 5G 组网方案研究[J]. 电子技术应用, 2021, 47(5): 5–10.
- [12] 刘玮, 李凤, 张燕燕, 等. 5G 基站型路侧设备技术方案与应用研究[J]. 电子技术应用, 2020, 46(12): 39–42.
- [13] 程啸, 叶斌, 王姣, 等. 面向分布式发电系统的无线接入站址选择算法[J]. 电子设计工程, 2020, 28(14): 135–140.

(收稿日期: 2021-12-24)

作者简介:

张平(1982-), 女, 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向: 电力系统通信。

邱超(1985-), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向: 电力系统通信。

张琳娟(1985-), 女, 博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向: 电力系统通信。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所