

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2314851

基于多维效用函数的多基站运行成本优化方法^{*}

韩东升^{1,2} 武霏云¹ 宁晨¹

(1. 华北电力大学电子与通信工程系 保定 071003; 2. 华北电力大学河北省电力物联网技术重点实验室 保定 071003)

摘要: 现有移动通信系统出现业务量迅猛增长现象,为缓解增长的基站负荷带来的基站功耗,移动通信系统中为基站配备了可再生能源产能设备。如何实现通信系统信息流与能量流匹配,完成通信业务与基站可再生能源储备的精确配对,更加充分的利用通信系统内可再生能源,是下一步优化通信系统网络性能并降低系统运行成本的关键。为此,本文构建了一个多维效用函数,该函数联合考虑了用户的接受信干噪比、可再生能源利用与基站负载3种因素。通过将求解多基站系统运行成本最小化问题转化为多维效用函数效用值最大化问题,对多基站系统进行优化,并实现系统运行成本最小化。问题转化后为一个混合整数非线性优化的非凸问题。为求解该问题本文提出了多维效用函数迭代优化算法,将该问题拆分为用户调度、功率分配与基站负载均衡3个子问题,通过采用交替优化和连续凸近似技术对问题进行迭代求解。仿真结果表明,相比于最大SINR关联优化算法与“最大SINR+可再生能源利用”优化算法,本文算法在可再生能源利用率方面分别提升了58.68%和29.74%,且系统总费用一直维持在较低水平,具备显著优势。

关键词: 多基站协作;可再生能源;多维效用函数;负载均衡;用户关联

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.50

Multi-base station operation cost optimization method based a multi-dimensional utility function

Han Dongsheng^{1,2} Wu Feiyun¹ Ning Chen¹

(1. Department of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Hebei Key Laboratory of Power Internet of Things Technology, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: At present, there is a rapid growth in communication services in mobile communication systems. To alleviate the power consumption caused by the increasing base station load, renewable energy production equipment has been equipped for mobile communication system base stations. By matching the information flow and energy flow in the communication system, communication services and renewable energy storage in the communication system can be accurately paired. This can further improve the utilization rate of renewable energy within the communication system, which is the key to optimizing the network performance of the communication system and reducing system operating costs in the next step of research. Therefore, this paper constructs a multi-dimensional utility function. This function comprehensively considers three factors: user signal interference noise ratio, renewable energy utilization, and base station load. This paper solves the initial problem of minimizing the operating cost of a multi base station system by transforming it into a problem of maximizing the utility value of a multi-dimensional utility function. The transformed problem is a non-convex problem of mixed integer nonlinear optimization. To solve this problem, this paper proposes the Multidimensional Utility Function Iterative Optimization Algorithm. This algorithm divides the problem into three subproblems: user scheduling, power allocation, and load balancing. Then, this problem can be iteratively solved by using alternating optimization and continuous convex approximation techniques. The simulation results show that compared to the Maximum SINR Association Optimization Algorithm and the "Maximum SINR and Renewable Energy Utilization" Optimization Algorithm, the algorithm in this paper has improved the utilization efficiency of renewable energy by 58.68% and 29.74%, respectively. At the same time, the total cost of applying the algorithm proposed in this paper has been consistently lower than other algorithms during the simulation period. This indicates the advantages of the algorithm proposed in this paper.

Keywords: multi-base station cooperation; renewable energy; multi-dimensional utility function; load-balancing; user association

0 引言

随着无线通信系统业务量的迅猛增长,无线通信已成

为高能耗产业,其中50%~80%的能耗在基站侧^[1-2]。同时,由于近两年5G网络的发展与建设,移动通信系统业务量迅速增长,基站数目也随之增加。由于每台5G基站的

收稿日期:2023-10-26

^{*} 基金项目:河北省省级科技计划(SZX2020034)项目资助

功耗大于4G基站功耗约3~4倍,网络能耗也因此持续增加^[3]。因此,如何减少基站侧的能量消耗仍然是无线通信系统能耗优化的关键所在。

随着绿色能源技术的进步,利用太阳能和风能等绿色能源为基站供电成为基站节能并减少基站系统碳排放的重要途径^[4]。目前已有大量研究通过将可再生能源引入通信系统,来优化通信系统网络性能并降低系统运行成本。在文献[5]中,通过匹配随机产生的可再生能源与用户到达业务请求,可以降低基站的电网能耗成本。在文献[6]中,作者考虑到绿色能源发电的时间和空间多样性,通过提出双电池盈利驱动的用户关联方案,以提高通信系统的绿色能源利用率。在文献[7]中,作者通过一种基于短时间尺度的启发式方法,使用户忽略信号强度而优先考虑绿色能源供电小区。但是这种仅考虑绿色能源利用的用户关联方法会造成基站过载且用户服务质量差等问题。因此,需要综合考虑用户关联、绿色能源利用与基站负载均衡等问题,才能解决目前通信系统中应用绿色能源过程中遇到的基站负载均衡问题与进一步提升绿色能源利用率问题。

在现有研究中,大量文献针对用户关联、绿色能源利用与基站负载均衡问题进行了研究。在文献[8]中,作者提出一种基于遗传算法的基站休眠算法,实现了5G超密集基站网络不同基站负载下的能耗动态匹配。但是在该方法中,休眠基站一般为低负载基站,无法缓解多用户基站的能耗压力。文献[9]提出了一种在基站供电系统中加入光伏系统的方案,为基站利用可再生能源提供了一种通用方法。文献[10]从用户角度出发,通过联合考虑时间分配与功率控制,调整了用户在网络中的权重,并且最大化了系统的总能效。但在此方案中,对用户的权重分配是基于用户吞吐量完成的,忽略了单个用户的服务质量约束。在文献[11]中,作者提出一种面向服务质量的动态功率分配策略,通过为不同服务质量指标的用户分配不同的功率,保证了用户的服务质量,提高了通信系统的性能。更进一步的,文献[12]中对用户关联与功率分配问题进行了联合研究,提出了求解最优功率分配方案,实现异构通信网络能效最大化。在文献[13]中,将能效优化问题设计为多级决策问题,通过将原始问题分解为几乎空白子帧问题与小区范围扩展问题两个子问题进行求解,对异构网络的能效与负载均衡进行了联合优化,进一步提升了异构网络的性能。文献[14]中将基站的绿色能源收集与负载不平衡问题建模为多目标线性规划问题,提出了多运营商能源合作框架,在网络的成本、性能和能源利用率方面都进行了优化。

综上所述,在现有多基站系统通信系统中的研究中,对现有通信系统中的多个影响因素的联合优化仍然存在不足。为此,本文针对多基站通信系统的运行成本最小化问题,提出了一种新的多维效用函数迭代优化算法(multidimensional utility function iterative optimization algorithm, MUFOA)。该算法综合考虑系统内基站储能

设备储量与可再生能源产能,通过联合优化用户调度、功率分配和负载均衡问题使系统的运行成本最低。

本文主要贡献如下:

1) 本文针对多基站通信系统的运行成本最小化问题,构建了配备可再生能源产能设备的多基站系统网络模型,并提出了MUFOA算法。该算法综合考虑了基站负载、用户服务质量与可再生能源利用多种因素,通过联合优化降低了系统的运行成本。

2) 进行多基站通信系统的运行成本最小化问题求解时,由于用户关联变量约束,使得本文优化问题为一个混合整数非线性问题(mixed integer non linear programming, MINLP),需要将原始问题拆分为3个子问题:用户调度子问题、功率分配子问题和基站负载平衡子问题。分别对3个子问题求解,然后采用交替优化和连续凸近似技术对问题进行迭代求解,通过使多维效用函数效用值最大化,实现了系统的可再生能源利用率最大化与系统运行成本最小化。

3) 通过MATLAB仿真对本文提出的算法进行了仿真验证,并将本文MUFOA算法仿真结果与最大SINR关联优化算法(maximum SINR correlation optimization algorithm, MSOA)、“最大SINR+可再生能源利用”优化算法(optimization algorithm for maximizing SINR and renewable energy utilization, MSREOA)仿真结果进行对比,充分验证了本文算法的性能。

1 问题陈述与建模

1.1 系统模型

如图1所示,本文考虑一个可再生能源供电的多基站协作的5G通信场景,由 N 个基站与 K 个用户组成,其中 $N = 1, 2, \dots, n, K = 1, 2, \dots, k$ 。设时间划分为 T 个时段,且 $T = 1, 2, \dots, t$ 。其中, n, k 和 t 分别为基站、用户以及当前时间段的编号索引。本文中基站采用正交频分多址技术为基础,将每个基站频谱共划分为 M 个资源块(resource block, RB),每个RB带宽相同,RB的集合表示为 $\mathbf{RB} = \{RB_1, RB_2, \dots, RB_M\}$ 。各基站的服务覆盖范围部分重叠,共同为用户提供通信服务。用户 k 的通信业务记为 $\mathbf{f}_k = \{s_k, l_k\}$, s_k 与 l_k 为用户业务的数据属性; s_k 表示业务数据规模,单位为bit; l_k 表示通信业务给基站带来的负荷规模。

1) 用户调度子模型

在本文场景中,用户 k 在第 t 时段中产生的通信业务 \mathbf{f}_k 需要上传到基站完成处理。基站 n 在第 t 时段的用户调度决策变量用矩阵 $\mathbf{D}_{n,t} = [d_{1,n,t}, d_{2,n,t}, \dots, d_{k,n,t}]$ 表示。由于每个用户的服务基站只有一个,记 t 时段中基站 n 范围内的用户 k 的调度决策变量为 $d_{k,n,t}^i = \{0, 1\}$, $d_{k,n,t}^i = 1$ 表示将用户 k 切换到基站 j 上,基站 j 是基站 n 周围有能力接受新用户的基站;反之,用户 k 不需要向其他基站切换时取值为0。具体表述如式(1):

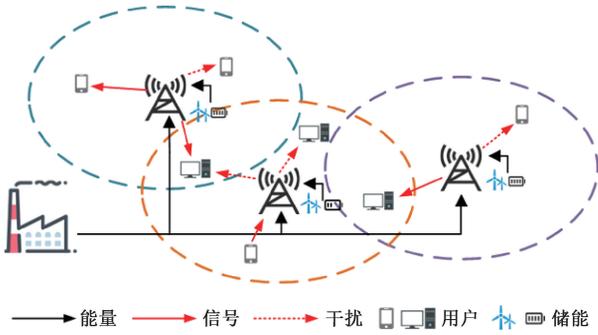


图 1 系统模型

$$d_{k,n,t}^j = \begin{cases} 1, & \text{用户 } k \text{ 接入到基站 } j \\ 0, & \text{用户 } k \text{ 没有接入到基站 } j \end{cases} \quad (1)$$

每时段的用户调度决策需满足:

$$\sum_{n=1}^N d_{k,n,t}^j \leq 1, \forall k \in K, \forall j \in N, j \neq n \quad (2)$$

即每个时段中需要切换基站的用户最多只能接入到另一个基站,式(2)约束用户只能同时接入一个基站。

2)无线通信子模型

在 t 时段,在用户 k 关联基站 n 后分配到的 RB 上 SINR 可表示为:

$$SINR_{k,n,t} = \frac{h_{kn} \cdot p_n^t}{\sigma^2 + \sum_{j \neq n, j \in N} h_{kj} \cdot p_j^t} \quad (3)$$

其中, h_{kn} 为基站 n 与用户 k 的信道增益,增益值与用户和基站之间距离有关; p_n^t 为 t 时段基站 n 在 RB 上的发射功率; σ^2 为每个 RB 上的噪声功率。在该 RB 上,对于给定的 p_n^t ,用户 k 的传输速率可表示为:

$$R_{k,n,t} = W_{RB,n} \log_2(1 + SINR_{k,n,t}) \quad (4)$$

其中, $W_{RB,n}$ 为基站 n 划分为 M 个 RB 后每个 RB 的带宽大小。且有, t 时段基站 n 总发射功率 $p_{total,n}^t$ 满足:

$$p_{total,n}^t = \sum_{k=1}^{K_n} d_{k,n,t}^j \cdot p_{n,k}^t = \sum_{k=1}^{K_n} d_{k,n,t}^j \cdot l_k \cdot p_n^t \quad (5)$$

$$0 \leq p_{total,n}^t \leq p_{max}, \forall t \in T, \forall n \in N \quad (6)$$

其中, $p_{n,k}^t$ 为 t 时段基站 n 分配给用户 k 的发射功率,且可将 t 时段基站 n 所有用户分配到的功率表示为矩阵 $P_{n,k,t} = [p_{n,1}^t, p_{n,2}^t, \dots, p_{n,k}^t]$; p_{max} 为基站 n 的发射功率上限阈值; K_n 为基站 n 服务的用户集合。

在 t 时段的信息传输过程中,基站 n 产生的能耗 $P_{n,t}$ 由基站的静态能耗 P_{fix} 和天线发射能耗 $p_{total,n}^t$ 组成^[15],即:

$$P_{n,t} = P_{fix} + \beta \cdot p_{total,n}^t \quad (7)$$

式中: β 为基站的能量效率系数; P_{fix} 为维持基站正常运行的能耗,此部分功耗包括基站自身的硬件能耗与制冷设备能耗。

3)基站负载子模型

在前文描述中可知,用户 k 的通信业务 $f_k = \{s_k, l_k\}$ 包含 s_k, l_k 两种数据属性,其中 s_k 表示业务数据规模, l_k 表示通信业务给基站带来的负荷规模。此时,可得到用户 k

的通信业务给基站带来的负荷规模,即用户 k 接入基站 j 消耗的 RB 数为:

$$l_k = \frac{s_k}{R_{k,j,t}} \quad (8)$$

系统内用户的数量为 K ,接入到基站 j 的用户集合定义为 K_j ,定义基站 j 的负载为 $Load_j$,则

$$Load_j = \sum_{k \in K_j} d_{k,n,t}^j \cdot l_k = \sum_{k=1}^K d_{k,n,t}^j \cdot l_k \quad (9)$$

此时,所有基站的负载情况的集合可用矩阵表示如下:

$$L_{n,t} = [Load_1, Load_2, \dots, Load_n], n \in N. \text{ 并且有:} \quad (10)$$

$$\eta_j^{\min} < Load_j < \eta_j^{\max}$$

式(10)中, η_j^{\min} 为基站 j 的负载下限; η_j^{\max} 为基站 j 的负载上限。基站 j 的负载达到上限值时需要将用户转移至相邻的基站以降低基站负荷。

4)基站储能子模型

本文用矩阵 $E_t = [E_{1,t}, E_{3,t}, \dots, E_{n,t}]$ 表示 t 时段的各基站产能情况,且各基站不同时段的产能功率随机。每个基站均配备有储能设备,为基站通信设备提供储备用电,用矩阵 $B_{n,t} = [b_1^t, b_2^t, \dots, b_n^t], n \in N$ 表示 t 时段各基站的储能容量。且储能充放电功率受到最大容量和剩余容量的限制,满足:

$$b_n^t = b_n^{t-1} + B_n^t \quad (11)$$

$$b_{\min} \leq b_n^t \leq b_{\max}, \forall t \in T, \forall n \in N \quad (12)$$

式中: b_n^{t-1} 为 t 时段基站 n 的储能电池初始容量; b_n^t 为 t 时段的基站 n 储能电池容量; B_n^t 为 t 时段下的充放电变量,可表示为 $B_n^t = P_{n,t} - E_{n,t}$ 。式(12)用于保护储能电池寿命,限制过度充放电。

1.2 问题建立

本文多基站系统以最小化多基站系统运行成本为优化目标,建立了综合考虑基站负载、用户服务质量与可再生能源的消纳多种约束条件的目标函数。具体函数构建如下:

$$\min C = \sum_{t \in T} \sum_{n \in N} ([P_{n,t} + B_n^t]^+) \cdot a \quad (13)$$

$$\text{s. t. } 0 \leq p_{total,n}^t \leq p_{max}, \forall t \in T, \forall n \in N \quad (14)$$

$$b_{\min} \leq b_n^t \leq b_{\max}, \forall t \in T, \forall n \in N \quad (15)$$

$$\eta_j^{\min} < Load_j < \eta_j^{\max} \quad (16)$$

$$SINR_{j,k,t} \geq \gamma_{j,k}^{\min}, j \in N, k \in K \quad (17)$$

$$d_{k,n,t}^j \in \{0,1\}, k \in K, n \in N, j \in N \quad (18)$$

$$B_{\min} \leq B_n^t \leq 0, \forall t \in T, \forall n \in N \quad (19)$$

$$\sum_{n=1}^N d_{k,n,t}^j \leq 1, \forall k \in K, \forall j \in N, j \neq n \quad (20)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N R_{k,j,t} \cdot d_{k,n,t}^j \geq k_j R_{th}, \forall k \in K, \forall j \in N \quad (21)$$

其中, $[x]^+$ 表示取值 $\max\{x, 0\}$, a 表示由电网供电时的单位费用。式(14)是基站发射功率的约束;式(15)为限制储能电池过度充放电的约束;式(16)表示系统中每个基

站的负载约束;式(17)表示系统中每个用户的服务质量约束;式(18)表示用户调度决策变量的取值范围;式(19)是可再生能源参与系统运行时的充放电范围;式(20)代表用户接入基站限制,即用户最多只能接入一个基站;式(21)代表每个基站的实际通信速率都必须大于或等于通信速率需求阈值。

2 问题求解

在这一部分对上文提出的优化问题进行转化与求解。由式(13)可知本文提出的优化目标旨在最小化多基站系统的运行成本,且本文多基站系统综合考虑了基站负载、用户服务质量与可再生能源的消纳多种因素来降低多基站系统的运行成本。可知最小化多基站系统的运行成本问题与多基站系统所考虑的多种因素相关,通过搭建综合考虑这三种因素的多维效用函数可将最小化多基站系统的运行成本问题转化为最大化多维效用函数效用值问题。此时,问题可以改写为:

$$\max \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N \psi_{k,j,t} \quad (22)$$

$$\text{s. t. 式(14) ~ (21)}$$

$$C \leq C_{\max} \quad (23)$$

在式(22)中,原问题转化为多基站系统效用最大化问题,约束(23)表示当获得的最大效用值可使多基站系统运行总成本 C 低于设定的阈值 C_{\max} 时,效用值有效。因此,可以通过求解多维效用函数得到满足约束条件的最小运行成本 C 。 $\psi_{k,j,t}$ 为 t 时段用户 k 与基站 j 之间的效用值,其计算方法如式(24)所示。

$$\psi_{k,j,t} = W_1 \times \lg(\text{SINR}_{j,k,t}) + W_2 \times \lg(b_j^t) - W_3 \times \text{Load}_j \quad (24)$$

式(24)中, $\text{SINR}_{j,k,t}$ 为保障用户服务质量的信干噪比因子, b_j^t 为体现系统内每个基站可再生能源影响的可再生能源储能因子, Load_j 为体现系统内每个基站负载情况的基站负载因子。式中对用户信干噪比与可再生能源储能进行对数处理是为了将3个参数调整到相同数量级,各参数的权重之和满足: $w_1 + w_2 + w_3 = 1$ 。各参数前的符号代表本文多维效用函数将选择用户信干噪比与可再生能源储能尽可能大(符号为正),而基站负载尽可能小(符号为负)的基站进行用户调度。根据各参数之间的重要程度存在区别,本文利用层次分析法^[16]计算得到各参数的对应权重值,主要计算步骤如下。

首先,根据1~9标度法构建判断矩阵 $\mathbf{A} = [a_{ij}]_{3 \times 3}$,如式(25)所示:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 3 \\ 1/5 & 1 & 3/5 \\ 1/3 & 5/3 & 1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

判断矩阵中元素 a_{ij} 表示与属性 j 相比,属性 i 的重要级别,且有 $a_{ij} = 1/a_{ji}$ 。通过计算得到判断矩阵的最大特

征根为3,一致性指标为 $CR = 0/0.58 = 0 < 0.1$ 。可知判断矩阵通过一致性检验,从而得到各影响因子的权重为:

$$\mathbf{w} = (w_1, w_2, w_3) = (0.65, 0.13, 0.22) \quad (26)$$

从问题的约束条件可知,由于式(18)中变量 $d_{k,n,t}^i \in \{0,1\}$ 的存在,使得问题包含整数约束。同时,约束(16)、约束(17)与优化变量 $\mathbf{P}_{n,k,t}$ 、 $\mathbf{D}_{n,t}$ 和 $\mathbf{L}_{n,t}$ 均存在高度耦合性。因此,该优化问题是一个MINLP问题,无法采用凸优化技术直接求解。本文将该优化问题分解为3个子问题进行求解,分别是用户调度子问题、功率分配子问题、基站负载平衡子问题,并提出了相应的低复杂度算法进行求解。通过采用交替优化和连续凸近似技术对这3个子问题进行迭代求解,最终将得到的最优优化变量代入目标函数获得最大化多维效用函数效用值问题的最优解。

2.1 最大化多维效用函数效用值问题求解

1) 子问题1:用户调度子问题

在子问题1中,给定功率分配矩阵 $\mathbf{P}_{n,k,t}$ 、基站储能矩阵 $\mathbf{B}_{n,t}$ 、基站负载矩阵 $\mathbf{L}_{n,t}$ 求解用户调度矩阵 $\mathbf{D}_{n,t}$ 。优化问题如下:

$$(P1) \max \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N \psi_{k,j,t} \quad (27)$$

$$\text{s. t. } 0 \leq p_{total,n}^t \leq p_{\max}, \forall t \in T, \forall n \in N \quad (28)$$

$$\text{SINR}_{j,k,t} \geq \gamma_{j,k}^{\min}, j \in N, k \in K \quad (29)$$

$$\sum_{n=1}^N d_{k,n,t}^i \leq 1, \forall k \in K, \forall j \in N, j \neq n \quad (30)$$

$$d_{k,n,t}^i \in \{0,1\}, k \in K, n \in N, j \in N \quad (31)$$

由式(31)可知子问题1是一个MINLP优化问题,难以直接求解。因此,需要把式(31)中的二值变量转为连续可微的变量来求解。本文采用松弛变量法,即将 $d_{k,n,t}^i \in \{0,1\}$ 松弛为 $d_{k,n,t}^i \in [0,1]$,子问题1可转化为:

$$(P1.1) \max \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N \psi_{k,j,t} \quad (32)$$

$$\text{s. t. 式(28) ~ (30)}$$

$$0 \leq d_{k,n,t}^i \leq 1, k \in K, n \in N, j \in N \quad (33)$$

在将问题中的二值变量松弛为连续变量后,转化后的问题P1.1中目标函数是凸函数,且约束条件(28)~(30)均为凸约束,所以问题P1.1是一个典型的凸优化问题。因此可以借助MATLAB算法工具箱中的CVX求解器进行凸优化问题求解,获得用户调度矩阵 \mathbf{D} 的取值。之后通过为用户调度变量设置阈值 $\beta_0, \beta_1 \in [0,1]$,将基站 j 中用户按照阈值分为3个集合 $\mathbf{K}_j^0, \mathbf{K}_j^x$ 和 \mathbf{K}_j^1 ,即 $\mathbf{K}_j^0 = \{k | d_{k,n,t}^i \leq \beta_0, k \in K_j\}$, $\mathbf{K}_j^x = \{k | \beta_0 \leq d_{k,n,t}^i \leq \beta_1, k \in K_j\}$, $\mathbf{K}_j^1 = \{k | d_{k,n,t}^i \leq \beta_1, k \in K_j\}$ 。然后,把集合 \mathbf{K}_j^0 中的用户调度变量取值置为0,把集合 \mathbf{K}_j^1 中的用户调度变量取值置为1。在集合 \mathbf{K}_j^x 中,将用户按照用户调度变量 $d_{k,n,t}^i$ 的取值降序排列,依次逐个检查用户是否满足问题的约束,若满足约束则将变量置0归为集合 \mathbf{K}_j^0 ,不满足则将变量置1归为集合 \mathbf{K}_j^1 。最终,得到二值函数:

$$d_{k,n,t}^j = \begin{cases} 0, & k \in \mathbf{K}_j^0 \\ 1, & k \in \mathbf{K}_j^1 \end{cases}, k \in K_j, j \in N \quad (34)$$

此时,可以获得使系统 SINR 最大化且考虑了基站的可再生能源储能余量与负载情况的用户调度决策二值参数矩阵 \mathbf{D} 。问题 1.1 的求解流程如算法 1 所示。

算法 1: 用户调度子问题求解算法

- 1: 初始化用户分布、用户调度阈值 β_0, β_1 , 最小误差 $\epsilon > 0$;
 - 2: 通过 CVX 求解器求解问题 1.1, 得到用户调度矩阵 \mathbf{D} 的各个元素的连续值;
 - 3: 利用用户调度阈值 β_0, β_1 进行判断, 将用户分为集合 $\mathbf{K}_j^0, \mathbf{K}_j^1$ 和 \mathbf{K}_j^2 ;
 - 4: 依次检验集合 \mathbf{K}_j^2 中的用户是否符合问题 1.1 约束条件, 并完成分类;
 - 5: 得到最优用户调度矩阵 \mathbf{D}^* ;
 - 6: 若此时目标函数的误差值小于 ϵ , 则停止迭代, 否则将 \mathbf{D}^* 作为初始值回到步骤 2 继续迭代;
 - 7: 输出最优用户调度矩阵 \mathbf{D} 。
-

2) 子问题 2: 功率分配子问题

在问题 2 中, 给定用户调度矩阵 $\mathbf{D}_{n,t}$ 、基站负载矩阵 $\mathbf{L}_{n,t}$ 求解优化后的功率分配矩阵 $\mathbf{P}_{n,k,t}$ 、与基站储能矩阵 $\mathbf{B}_{n,t}$ 。优化问题如下:

$$(P2) \max \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N \psi_{k,j,t} \quad (35)$$

$$\text{s. t. } 0 \leq p_{total,t}^n \leq p_{\max}, \forall t \in T, \forall n \in N \quad (36)$$

$$b_{\min} \leq b_n^t \leq b_{\max}, \forall t \in T, \forall n \in N \quad (37)$$

$$\text{SINR}_{j,k,t} \geq \gamma_{j,k}^{\min}, j \in N, k \in K \quad (38)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N R_{k,j,t} \cdot d_{k,n,t}^j \geq k_j R_{th}, \forall k \in K, \forall j \in N \quad (39)$$

由于式(39)中关于变量 p_j^t 的对数函数是一个凹函数, 使得问题 2 是一个非凸优化问题。本文通过连续凸近似方法来近似求解问题 2, 最终得到问题 2 的局部最优解。本文将问题在第 l 次迭代时的局部最优表示为 $p_{j,t}^l$, 对函数 $R_{k,j,t}$ 在局部点 $p_{j,t}^l$ 处进行一阶泰勒展开得:

$$R_{k,j,t}^{lb} = W_k (A(p_{j,t}^l) + B(p_{j,t}^l) \cdot (p_j^t - p_{j,t}^l)) \leq R_{k,j,t} \quad (40)$$

$$W_k = l_k \cdot W_{RB,n} \quad (41)$$

$$A(p_{j,t}^l) = \log_2 \left(1 + \frac{h_{kj} \cdot p_{j,t}^l}{\sigma^2 + \sum_{n \neq j, n \in N} h_{kn} \cdot p_n^t} \right) \quad (42)$$

$$B(p_{j,t}^l) = \frac{h_{kj}}{\ln 2 (h_{kj} \cdot p_{j,t}^l + \sigma^2 + \sum_{n \neq j, n \in N} h_{kn} \cdot p_n^t)} \quad (43)$$

此时问题 2 可转化为问题 P2.1 如下:

$$(P2.1) \max \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N \psi_{k,j,t} \quad (44)$$

s. t. 式(36) ~ (38)

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N R_{k,j,t}^{lb} \cdot d_{k,n,t}^j \geq k_j R_{th}, \forall k \in K, \forall j \in N \quad (45)$$

由于问题 2 中的非凸约束式(39)已经转化为问题 2.1 中的凸约束式(45), 可知问题 2.1 为一个凸优化问题。对于该优化问题已经有多种经典方法可以求解, 本文采用 MATLAB 算法工具箱中的 CVX 求解器进行求解, 从而获得功率分配矩阵 \mathbf{P} 的局部最优解。得到最优功率分配方案后, 可知基站所消耗的功率最低, 此时将储能矩阵减去各基站在得到最优功率分配方案时的能耗, 可得到优化后的储能矩阵。问题 2.1 的求解算法如算法 2 所示。

算法 2: 功率分配子问题求解算法

- 1: 初始化满足约束的功率初始值 $p_{j,t}^i, j \in N$, 得到功率分配矩阵 \mathbf{P} ; 获取基站储能矩阵 \mathbf{B} , 设定最小误差 $\epsilon > 0$;
 - 2: for $i = 1:N$ do
 - 3: while 目标函数的减少量小于 ϵ do
 - 4: 求解问题 2.1, 得到最优功率分配值 $p_j^i(*)$;
 - 5: 更新下一次功率分配初始值 $p_{j,t}^{i+1} = p_j^i(*)$;
 - 6: 令 $l = l + 1$;
 - 7: end while
 - 8: 得到基站 j 最优功率分配值后, 更新储能矩阵充放电变量: $B_n^l(*) = p_j^i(*) \cdot \Delta t$, 代入基站储能子模型可获得更新后基站储能 $b_n^l(*)$;
 - 9: end for
 - 10: 输出功率分配矩阵 \mathbf{P} 与基站储能矩阵 \mathbf{B} 。
-

3) 子问题 3: 基站负载均衡子问题

在实际情况下, 基站的资源是有限的, 不同用户携带的负荷会导致基站过载。同时, 为提高绿色能源利用率而改变用户关联基站, 也会造成基站过载。因此, 本文提出了负载平衡子问题来解决此问题, 使过载基站可以卸载部分用户, 从而实现系统的负载均衡。

在子问题 3 中, 给定功率分配矩阵 $\mathbf{P}_{n,k,t}$ 、基站储能矩阵 $\mathbf{B}_{n,t}$ 、用户调度矩阵 $\mathbf{D}_{n,t}$ 对基站负载矩阵 $\mathbf{L}_{n,t}$ 进行优化, 使系统满足负载均衡。优化问题如下:

$$(P3) \max \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N \psi_{k,j,t} \quad (46)$$

$$\text{s. t. } 0 \leq p_{total,t}^n \leq p_{\max}, \forall t \in T, \forall n \in N \quad (47)$$

$$\eta_j^{\min} < Load_j < \eta_j^{\max} \quad (48)$$

$$\text{SINR}_{j,k,t} \geq \gamma_{j,k}^{\min}, j \in N, k \in K \quad (49)$$

$$b_{\min} \leq b_n^t \leq b_{\max}, \forall t \in T, \forall n \in N \quad (50)$$

本文提出负载均衡算法求解子问题 3, 算法的求解过程主要可分为 3 步, 如算法 3。首先, 获取当前基站负载矩阵, 将基站负载进行升序排列; 其次, 将排列后的基站负载依次与基站负载上下限阈值进行比较; 最后, 若基站的实际

负载大于基站负载上限阈值,则将该基站资源消耗最少的用户转移至满足条件的相邻基站;若基站实际负载大于0小于基站负载下限阈值,则将相邻基站资源满足条件且消耗最少的用户转移至该基站。算法3中, \mathbf{L} 代表所有基站负载情况的集合矩阵; $Load_i$ 代表基站*i*的负载情况; η_i^{\max} 代表基站*i*的负载上限阈值; \mathbf{U}_i 代表与基站*i*关联的所有用户的负荷规模的集合; $U_{i,\min}$ 代表集合 \mathbf{U}_i 中最小的元素,即基站*i*关联用户中消耗RB最少的用户的负荷规模; $Load_j$ 为满足子问题3约束条件的基站*j*的负载情况; \mathbf{L}^* 代表优化后的基站负载集合。

算法3:基站负载均衡算法

- 1:获取每个基站*i*的负载情况 $Load_i, i \in N$, 基站负载集合为 \mathbf{L} ;
- 2:对基站负载集合 \mathbf{L} 中所有元素升序排列;
- 3:for $i = 1:N$ do
- 4: while $Load_i > \eta_i^{\max}$ do
- 5: 获取集合 \mathbf{U}_i , 并对其中元素进行升序排列;
- 6: 执行 $Load_i = Load_i - U_{i,\min}, Load_j = Load_j + U_{i,\min}$;
- 7: end while
- 8:end for
- 9:输出基站负载矩阵 \mathbf{L} 。

2.2 多维效用函数迭代优化算法

基于上述3个子问题的求解,本文提出对最大化多维效用函数效用值问题的求解算法,联合优化用户关联、功率分配、基站储能与基站负载多个变量。如算法4所示,算法4通过交替优化4个变量,不断提高目标函数的效用值,当相邻两次迭代值的误差值小于提前设定的阈值时,可以获得最大多维效用函数效用值,同时获得最优的用户调度方案、功率分配方案与基站负载平衡方案。

算法4:多维效用函数迭代优化算法(MUFOA)

- 1:初始化用户调度矩阵 $\mathbf{D}^{(0)}$ 、功率分配矩阵 $\mathbf{P}^{(0)}$ 、基站储能矩阵 $\mathbf{B}^{(0)}$ 与基站负载矩阵 $\mathbf{L}^{(0)}$, 最小误差 $\epsilon > 0, l = 0$;
- 2:while 目标函数的误差值小于 ϵ do
- 3: 固定 $\mathbf{P}^{(l)}, \mathbf{B}^{(l)}$ 与 $\mathbf{L}^{(l)}$, 按照算法1计算求得 $\mathbf{D}^{(l)}$;
- 4: 固定 $\mathbf{D}^{(l)}$ 与 $\mathbf{L}^{(l)}$, 按照算法2计算求得 $\mathbf{P}^{(l)}$ 与 $\mathbf{B}^{(l)}$;
- 5: 固定 $\mathbf{D}^{(l)}, \mathbf{P}^{(l)}$ 与 $\mathbf{B}^{(l)}$, 按照算法3计算求得 $\mathbf{L}^{(l)}$;
- 6: $l = l + 1$;
- 7:end while
- 8:输出 $\mathbf{D}, \mathbf{P}, \mathbf{B}, \mathbf{L}$ 。

3 仿真分析

本节将对本文提出的MUFOA算法进行仿真研究,以验证本文算法的性能。本文假设系统由4个基站组成,系

统中每个基站配备有风力发电设备。在仿真中,4个基站为分布在 $2000\text{ m} \times 2000\text{ m}$ 范围内的100个用户提供服务,用户在区域内随机分布。本文其余参数如表1所示。为充分展示本文提出的多维效用函数优化算法性能,将MSOA算法、MSREOA算法与MUFOA算法进行对比。3种算法原理如下:

1)MSOA算法:用户选择能提供最大SINR的基站进行关联。

2)MSREOA算法:首先,使用最大SINR关联优化方法完成用户关联。其次,通过本文提出的功率分配子问题求解算法提高各基站的可再生能源利用率。最后,对用户调度子问题与功率分配子问题进行迭代求解。

3)MUFOA算法:应用本文提出的MUFOA算法求解式(13)问题。

表1 仿真参数

参数名称	取值
基站个数	$N = 4$
用户数量	$K = 100$
蓄电池最低容量/Wh	$b_{\min} = 100$
蓄电池最高容量/Wh	$b_{\max} = 1500$
基站最大功耗/W	$P_{\max} = 2000$
基站静态能耗/W	$P_{fix} = 500$
系统带宽/MHz	20
基站路径损耗模型/dB	$PL(d) = 128.1 + 37.6 \log_{10}(d)$
噪声功率谱密度/(dBm/Hz)	-154
用户最低信干噪比需求/dB	$\gamma_{j,k}^{\min} = 5$
基站可再生能源最大发电功率/W	900

其中,MSOA算法参考了文献[17-19]的研究算法。在这些论文中都应用了以最大SINR作为用户关联的主要因素的思路,本文主要参考文献[17]设计了本文的MSOA算法,获得了使系统总SINR最大的用户关联策略。MSREOA算法也参考了多篇文献的研究算法,这些论文中对用户关联问题与功率分配问题进行了联合优化,本文主要参考文献[20]设计了本文的MSREOA算法,对用户关联问题与功率分配问题进行迭代求解。用于求解本文优化问题的MUFOA算法与前两种算法相比,MUFOA算法在考虑到用户关联与功率分配的前提下,还考虑了系统内各个基站间的负载均衡问题,并通过设计综合考虑多种因素的多维效用函数对多个因素进行联合优化。本文三种优化算法结合了已有研究的优化思路,并通过仿真分别对比了3种算法的系统用户关联策略、系统总费用、基站负载均衡与算法收敛速度等方面,充分展示了本文算法的优势。

在对用户调度子问题进行求解时,为确定用户调度上下限阈值,本文对场景中的100个用户进行了独立仿真。

仿真结果如图 2 所示,由图可知用户状态参数 d 的取值分布为: $d \in [0.9, 1.0]$ 区间占比 74%, $d \in [0.0, 0.1]$ 区间占比 25%。因此,用户调度上下限阈值可设置为 $\beta_0 = 0.1$, $\beta_1 = 0.9$, 从而提高用户调度子问题求解算法的运行速度。

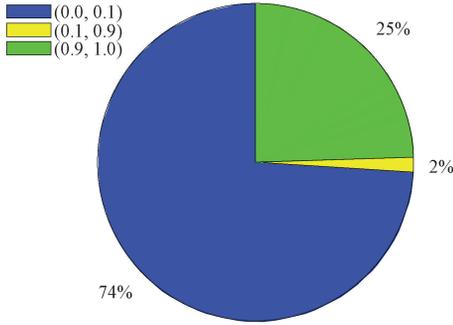


图 2 用户的状态参数取值分布

图 3 描述了基于 MSOA 算法时的用户与基站间关联情况。在图中,基站用红色空心正方形表示,与不同基站关联的用户用不同颜色与形状的较小图形表示。由图可知,由于用户基于最大 SINR 关联优化方法接入基站,不考虑基站负载与基站可再生能源状态,用户只接入距离最近的基站。这种接入方法会导致基站负载不均衡,且存在超载情况,使得系统内可再生能源利用率低。这是因为不同的用户携带的业务需求不同,给基站带来的负荷不同。有些用户需要较大的数据传输量,而其他用户只需要较小的数据传输量。在没有对基站负载进行调控的情况下,一些基站可能会过载运行,而另一些基站可能没有足够的负荷来充分利用其资源,造成了系统内可再生能源的利用率较低的情况。

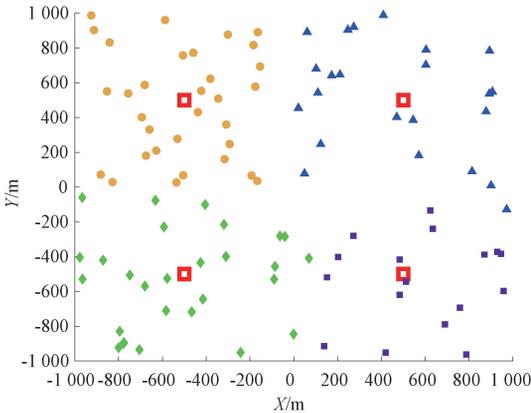


图 3 基于 MSOA 算法时的用户关联

图 4 描述了联合优化最大 SINR 关联与最大可再生能源利用率情况下的基站与用户关联情况。通过与图 3 对比可知,基站 4 向基站 1 转移了 3 个用户,基站 3 向基站 2 转移了 4 个用户,转移的用户在图 4 中用圆圈标注。通过部分用户的转移,使图 4 中基站间负载不均衡情况有所缓解,但依旧存在某些基站负载过重的情况。这是因为,

MSREOA 算法虽然考虑了基站的可再生能源利用率,可以将某些用户转移至可再生能源丰富且基站负载低的基站中,初步缓解基站间的负载不均衡情况,但是用户关联的更新依然与最大 SINR 关联策略有较大关系,会造成与基站 SNIR 较大的用户优先转移的现象,无法充分的实现各基站间负荷转移,造成仍然有些基站存在过载问题。

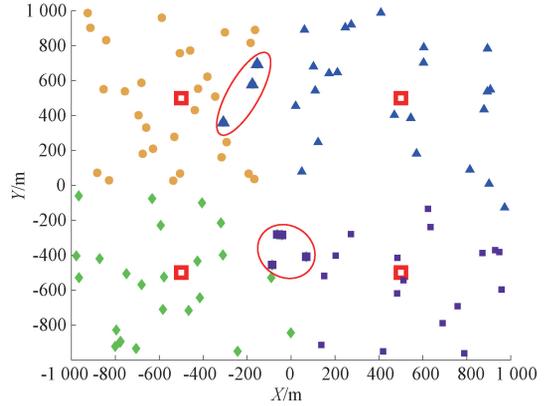


图 4 基于 MSREOA 算法时的用户关联

图 5 描述了应用本文提出的 MUFOA 算法综合考虑用户 SINR、功率分配和基站负载均衡多种因素得到的基站与用户关联情况。图 4 与 5 对比可知,图 5 中用户关联情况变化情况比图 4 中更大,使得基站间负载更均衡。这是由于,本文提出 MUFOA 算法同时考虑用户 SINR、功率分配和基站负载均衡多种因素,且在多维效用函数中基站负载因子的权重大于可再生能源储能因子,因此图 5 中优先转移负荷低的用户,完成了各基站间负荷合理分配,实现了系统内基站间的负载均衡。

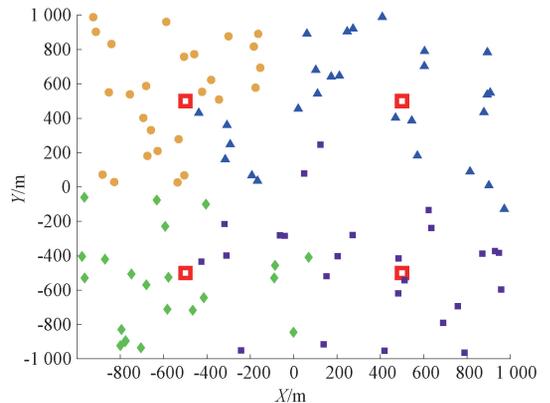


图 5 基于 MUFOA 算法的用户关联

图 6 分别描述了 MSOA 算法、MSREOA 算法以及本文提出的 MUFOA 算法 3 种算法情况下,每个基站的负载情况。由图 6 可知 MSOA 算法造成了明显的负载不均衡,在该算法中基站 3 与基站 4 负载过重,而基站 2 负载却很少。在 MSREOA 算法中,可以看到该算法将负载过重的基站的一部分负载转移到了负载低于基站负载阈值的基站

中,但仍然存在负载不均衡现象,例如基站4负载超过基站负载阈值很多,基站2负载仍然很少。而本文提出的MUFOA算法将基站负载均衡作为主要优化元素之一,实现了将过载基站的负载转移至负载低的基站中,且转移后所有基站都不再出现过载现象,实现了基站负载均衡。

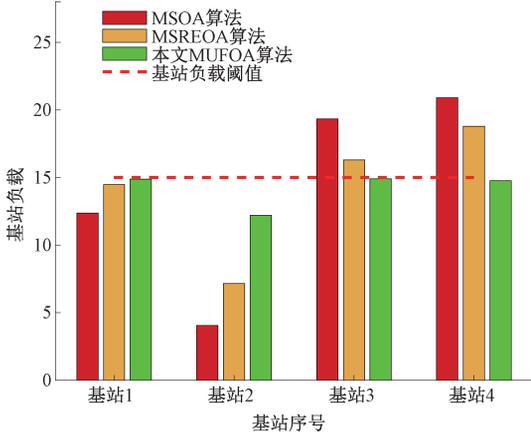


图6 3种算法下基站负载对比

图7分别给出了本文MUFOA算法与其他两种算法的效用值随迭代次数变化的变化曲线。从图中可以看到,基于MSOA算法的效用值随迭代次数增加波动不大,在迭代至第10次时完成收敛。基于MSREOA算法的效用值随迭代次数增加呈现先迅速增加然后缓慢减小的趋势,在迭代至第17次时完成收敛。出现这种现象是因为该算法在初期迭代时,算法将过载基站的负荷进行了部分转移使系统迅速进行了负荷分配,从而使效用值迅速增加,但是由于该算法没有考虑各基站间的负载均衡,在后期的迭代中,又重新造成了部分基站过载,致使效用值缓慢下降。而在本文MUFOA算法的效用值迭代优化曲线中,算法效用值一直保持上升趋势,在迭代至第11次时完成收敛。对比几种算法可知,本文MUFOA算法相比MSOA算法与MSREOA算法的效用值分别提升了373.5%和243.3%。因此,本文MUFOA算法可以在达到较快收敛速度的同时使系统效用值达到较高水平,使系统保持较高的性能。

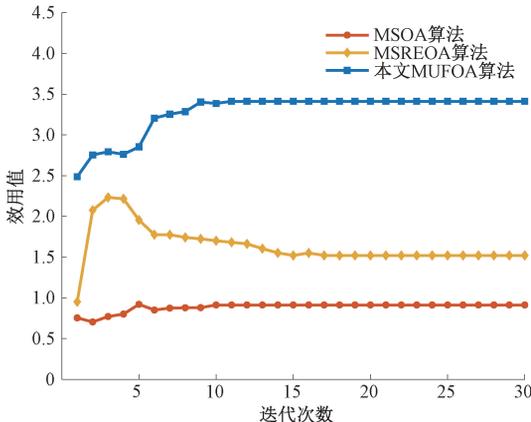


图7 效用值随迭代次数变化情况

图8给出了3种算法在不同用户数情况下系统总能源费用的变化情况。在本文仿真中,应用3种算法的系统环境都满足用户服务质量要求,且都可以完成不同种类用户业务的传送。由图可知,随着用户数的增加,3种算法的系统总费用都呈现上升趋势。在MSOA算法中,由于该算法没有基站负荷转移措施,导致其系统总费用随用户数增加一直呈现上升趋势。在MSREOA算法中,由于该算法仅考虑可再生能源利用,忽略了对基站负载的考虑,导致一部分基站出现过载,使得其在用户数低于76时系统总费用也呈现上升趋势,在用户数高于76后,系统总费用随着某些基站过载消耗功率增加,同时部分基站可再生能源不足,使得曲线仍为上升趋势。而在本文MUFOA算法中,由于本文算法将基站负载纳入多维效用函数的考虑范围,系统可以实现精确的负载分配,可以在实现系统负载均衡的同时最大化可再生能源利用率,因此在用户数低于88时该算法的系统总费用远低于其他两种算法。

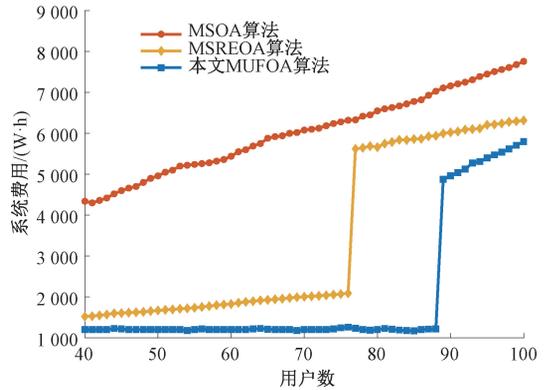


图8 3种算法下系统总费用对比

图9给出了3种算法在不同用户数情况下可再生能源利用率的变化情况。可再生能源利用率可以通过计算使用的可再生能源与基站中初始可再生能源储能的比值获得。从图中可以得知,在MSOA算法中,由于该算法只考虑SINR因素,导致可再生能源充足的基站接入的用户少,使得该算法中可再生能源利用率一直处于较低水平。在

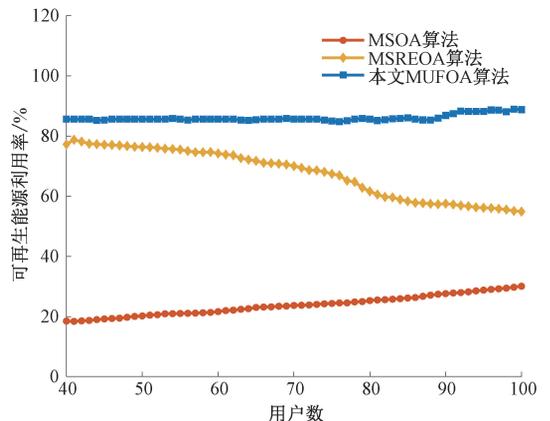


图9 3种算法下系统可再生能源利用率对比

MSREOA 算法中,随着系统负载的增加,该算法的可再生能源利用率呈现下降趋势,这是因为该算法在运行过程中没有考虑到基站间的负载均衡,致使部分基站出现超载,使可再生能源利用率逐渐降低。而在本文 MUFOA 算法中,多维效用函数可以在考虑到基站可再生能源储备的情况下实现基站间负载均衡,从而最大化可再生能源利用率。可以看到,在用户数达到 100 时,本文 MUFOA 算法的可再生能源利用率保持在 90%左右,分别优于其他两种算法

29.74%和 58.68%。

由以上仿真结果可全面分析 3 种算法的优劣性,3 种算法的各类指标的仿真结果概括为表 2 所示。由表 2 可知,本文 MUFOA 算法在全面考虑多个影响因素后可以制定更加合理的用户关联策略,使用户可以分散的关联到周围基站,从而合理利用通信资源。并且,本文算法能够实现最高的绿色能源利用率、最小的系统总能耗与基站间的负载均衡。最后,本文算法还能以较低的迭代次数完成收敛。

表 2 3 种算法优劣性对比

算法	评估指标				
	用户关联	最高绿色能源利用率/%	基站负载	最大系统能耗/kWh	迭代收敛次数
MSOA 算法	集中分布	30.05	严重不平衡	7 764	10
MSREOA 算法	较分散分布	58.99	略微不平衡	6 316	17
MUFOA 算法	分散分布	88.73	平衡	5 807	11

最后,本文通过表 3 进一步分析了本文优势与创新点。表 3 中给出了 2015 年~2023 年间通信系统相关研究的代表性工作,从优化方法所考虑的影响因素

与仿真评估指标两方面整理了相关研究概况,将本文优化方法与相关研究进行比较充分展示了本文优势与创新点。

表 3 本文优化方法与已有研究优化方法总结对比

文献	考虑影响因素				评估指标				
	用户服务	绿色能源	功率分配	负载均衡	用户关联	绿色能源利用率	基站负载	系统能耗	迭代收敛次数
[5]	✓	✓				✓		✓	
[6]	✓	✓			✓	✓		✓	
[7]	✓	✓				✓		✓	
[8]			✓	✓	✓			✓	✓
[9]		✓		✓				✓	
[10]	✓		✓		✓			✓	
[11]	✓		✓		✓				✓
[12]	✓		✓		✓			✓	✓
[13]	✓			✓	✓		✓	✓	✓
[14]		✓		✓	✓			✓	
本文	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

4 结 论

本文主要研究了多基站系统运行成本最小化问题。本文以最小化网络总能源费用为目标,构建了一个配备可再生能源产能设备的多基站系统网络模型,提出了一种 MUFOA 算法对系统进行联合优化。该算法综合考虑用户的接受信干噪比、可再生能源利用与基站负载 3 种因素,将问题建模为 MINLP 优化的非凸问题。为了实现多维效用函数的效用值最大化,且避免由于 MINLP 问题带来的求解困难,本文将原始问题解耦为用户调度、功率分配与基站负载均衡 3 个子问题,通过采用交替优化和

连续凸近似技术对这 3 个子问题进行迭代求解。本文通过提出的低复杂度子问题求解算法分别求解子问题,降低了本文算法的复杂度,提高了算法的收敛性。最后,通过将本文 MUFOA 算法与 MSOA 算法以及 MSREOA 算法进行对比,仿真结果表明本文提出的算法可以在用户较多时在可再生能源利用率与系统总能源费用方面仍然保持优势。

参 考 文 献

[1] HAN C, HARROLD T, ARMOUR S. Green radio: Radio techniques to enable energy-efficient wireless networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2011,

- 49(6): 46-54.
- [2] HAN T, ANSARI N. On optimizing green energy utilization for cellular networks with hybrid energy supplies [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(8): 3872-3882.
- [3] 牛志升, 周盛, 孙宇璇. 面向“双碳”战略的绿色通信与网络: 挑战与对策[J]. 通信学报, 2022, 43(2): 1-14.
- [4] LIU X, HUANG X, ANSARI N. Green energy driven user association in cellular networks with dual battery system [C]. 2016 IEEE International Conference on Communications(ICC), 2016:1-6.
- [5] ZHOU S, GONG J, ZHOU Z Y, et al. Green Delivery; Proactive content caching and push with energy-harvesting-based small cells [J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(4): 142-149.
- [6] LIU X, ANSARI N. Dual-battery enabled profit driven user association in green heterogeneous cellular networks [J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2018, 2(4): 1002-1011.
- [7] FLETSCHER L A, SUÁREZ L A, GRACE D, et al. Energy-aware resource management in heterogeneous cellular networks with hybrid energy sources [J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2019, 16(1): 279-293.
- [8] CHANG K C, CHU K C, WANG H C, et al. Energy saving technology of 5G base station based on internet of things collaborative control [J]. IEEE Access, 2020, 8: 32935-32946.
- [9] YE G. Research on reducing energy consumption cost of 5G base station based on photovoltaic energy storage system [C]. 2021 IEEE International Conference on Computer Science, Electronic Information Engineering and Intelligent Control Technology(CEI), 2021: 480-484.
- [10] WU Q Q, CHEN W, NG D W K, et al. User-centric energy efficiency maximization for wireless powered communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(10): 6898-6912.
- [11] YIN Y, LIU M, GUI G, et al. QoS-oriented dynamic power allocation in NOMA-based wireless caching networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2021, 10(1): 82-86.
- [12] FANG F, YE G, ZHANG H, et al. Energy-efficient joint user association and power allocation in a heterogeneous network [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(11): 7008-7020.
- [13] 张茜茜, 李君, 李正权, 等. 基于多智能体 Actor-Critic 算法的异构网络能效优化[J]. 电子测量技术, 2022, 45(22): 12-18.
- [14] TAHSIN A, ROY P, RAZZAQUE A, et al. Energy cooperation among sustainable base stations in multi-operator cellular networks [J]. IEEE Access, 2023, 11: 19405-19417.
- [15] CUI E, YANG D, ZHANG H K, et al. Improving power stability of energy harvesting devices with edge computing-assisted time fair energy allocation [J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2021, 5(1): 540-551.
- [16] LUO J T, YU J W, CHEN Q, et al. Analysis of bandwidth and site relationship for power communication network based on analytic hierarchy process [C]. 2019 IEEE 3rd International Conference on Circuits, Systems and Devices (ICCS), 2019: 115-118.
- [17] HAN D S, LIU T, WU F Y, et al. Performance optimization of multi-base station heterogeneous network based on new energy power supply [J]. IEEE Systems Journal, 2023, 17(2): 2331-2342.
- [18] 方旭愿, 田红心, 孙德春, 等. 基于绿色能源感知的效用函数异构网络接入算法 [J]. 计算机科学, 2019, 46(8): 127-132.
- [19] ALQASIR A M, KAMAL A E. Cooperative small cell HetNets with dynamic sleeping and energy harvesting [J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2020, 4(3): 774-782.
- [20] 梅容芳, 曾孝平, 简鑫. 多波束小基站协作通信的资源分配和位置规划 [J]. 无线电工程, 2023, 53(6): 1458-1466.

作者简介

韩东升, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为无线通信、无线通信新技术、数字通信系统和电力系统通信等。

E-mail: handongsheng@ncepu.edu.cn

武霏云, 硕士, 主要研究方向为绿色通信、新能源接入和资源分配。

E-mail: 18629948229@163.com

宁晨, 硕士, 主要研究方向为无线通信、无线通信新技术和时间敏感网络。

E-mail: 1059978994@qq.com