



混合能源基站的用户关联与资源分配

肖海林^{1,2*}, 毛淑霞¹, 刘小兰¹, 张文倩¹

(1. 桂林电子科技大学信息与通信学院 广西 桂林 541004; 2. 湖北大学计算机与信息工程学院 武汉 430062)

【摘要】5G 超密集网络部署混合能源微小区基站 (SBS), 其网络架构和能源供应的异构性会导致负载分布的极度不均衡, 引起资源的严重浪费。为有效利用可再生能源和无线资源, 该文提出了一种约束目标通信速率的用户关联机制与资源分配策略的方法。该方法以最小化系统总能耗成本为前提, 采用基站喜好偏置因子作为用户关联依据, 考虑能量减少的不确定因素, 提出基于大偏差理论的能量饥饿概率估计算法。在保证用户关联的基础上, 利用拉格朗日对偶算法的资源分配策略合理利用带宽资源。数值仿真结果表明: 该算法在能量充足的条件下相比最大接收功率算法系统能耗成本减少 82.47%, 绿色能量的使用率相比最大信道增益算法增加 48%。

关键词 混合能源; 大偏差理论; 资源分配; 微小区基站; 用户关联

中图分类号 TN929.5 **文献标志码** A **doi**:10.12178/1001-0548.2019169

User Association Mechanism and Resource Allocation Strategy in Small Cell Base Stations with Hybrid Energy Supply

XIAO Hai-lin^{1,2*}, MAO Shu-xia¹, LIU Xiao-lan¹, and ZHANG Wen-qian¹

(1. School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology Guilin Guangxi 541004;

2. College of Computer and Information Engineering, Hubei University Wuhan 430062)

Abstract The network architecture and the heterogeneity of hybrid energy supply will lead to extreme imbalance of load distribution in 5G small cell base stations (SBS), which causes the waste of resources. A new challenge is faced about how to utilize renewable energy and radio resource efficiently. In this paper, an approach of user association mechanism and resource allocation strategy is proposed for a given communication rate. In order to minimize the total energy of system, the bias factor of the SBS' favorite is used to describe the extent of user association, and an estimation algorithm of energy hungry probability is presented for uncertainty reduction in energy by utilizing the large deviation theory. Moreover, the resource allocation strategy is proposed to allocate band resource reasonably through the Lagrange dual algorithm. Numerical simulation results show that the energy consumption of the proposed algorithm can reduce 82.47% than that of the maximum received power algorithm. Also, the utilization rate of green energy of the proposed algorithm will increase 48% than that of the maximum channel gain algorithm.

Key words hybrid energy supply; large deviation theory; resource allocation; small cell base station; user association

随着智能手机和平板电脑等智能设备的蓬勃发展, 对多媒体服务的爆炸性需求正在增加。根据思科视频网络指数, 对于新兴应用和服务的需求也开始呈现爆炸式增长, 预计到 2021 年将增长到 78%^[1]。5G 超密集网络大规模部署混合能源的微小区基站 (SBS) 被认为是应对数据流量猛增的最富前景的网络技术, 但其网络架构和能源供应的异构性会导致

负载分布的极度不均衡, 引起资源的严重浪费。

因此, 如何有效地使用可再生能源是网络管理和优化的重要考虑因素^[2-4]。文献 [2] 根据实际业务负载和太阳能状态自适应地协同调整在混合能源基站的开启/休眠状态, 以提高太阳能利用率。而采用基站休眠策略的节能可能会以增加延迟为代价。文献 [3] 考虑 SBS 休眠带来的延迟, 基于排队模型

收稿日期: 2019-07-24; 修回日期: 2019-12-31

基金项目: 国家自然科学基金 (61872406, 61472094); 浙江省重点研发计划项目 (2018C01059)

作者简介: 肖海林 (1976-), 男, 博士, 教授, 主要从事协作通信、MIMO 无线通信以及认知无线电技术等方面的研究. E-mail: xhl_xiaohailin@163.com

定量研究了延迟及能量消耗,推导出最佳休眠时间和关联半径,以实现能量消耗和延迟之间的最佳权衡。实际中由于切换技术问题和性能要求,很难频繁关闭和重启 SBS。文献 [4] 以近似算法选择性降低 BS(base station) 的覆盖范围以节省总功耗。以上文献均从基站角度考虑节能问题,并未详细分析用户需求。

联合基站能耗和用户关联展开研究也得到一些专家和学者的青睐^[5-8]。文献 [5] 考虑多个用户的服务质量 (QoS), 实现基站负载均衡和用户 QoS 之间的折中。文献 [6] 从用户体验质量角度考虑,提出一种用户位置操纵方法,通过控制用户的移动以改善服务时间。文献 [7] 设计了 SBS 的绿色内容缓存和移动用户关联机制,使用户内容请求数量被 SBS 服务最大化。文献 [8] 结合用户速率需求与 SBS 能量利用率,采用分布式信道偏置因子的用户关联算法,降低系统能耗成本。尽管以上文献能有效利用 SBS 存储的绿色能源,但未涉及资源的合理分配。近年来,针对资源分配问题也开展了研究^[9-11]。文献 [9] 利用迭代算法解决混合能源供应系统的功率分配问题。文献 [10] 建立 Actor-Critic 学习机制实现带宽资源的实时分配。文献 [11] 设置奖励机制,考虑用户活动和能量到达的变化,以最大化净奖励进行子载波和功率分配,从而实现系统吞吐量和电力成本之间的平衡。然而,这些研究工作并未涉及混合能源供电的 SBS 基站,其能源消耗成本不仅取决于能源消耗的种类和数量,还与 SBS 的流量负载和资源分配方案有关。

综合以上考虑,本文在 SBS 混合能源使用的场景下,提出一种基站喜好偏置因子用户关联策略与资源分配方法。该方法在目标通信速率约束下最大化使用绿色能量,为避免接入用户过多引起 SBS 上绿色能量不足,每个 SBS 基于大偏差理论估计出现能量饥饿的可能性,使用户能根据接收到的能量饥饿概率值重新选择新的关联 BS。在保证用户关联的基础上,利用拉格朗日对偶算法的资源分配策略来合理使用带宽资源。

1 系统模型

1.1 系统模型

考虑 5G 超密集网络中多媒体传输的下行链路,混合能源供电的多媒体传输结构如图 1 所示,包括单个 MBS(micro base station), L 个均匀分布的 SBS 集合为 Φ_s , Y 个用户 (UE) 组成, $Y \in \Phi_s$ 。

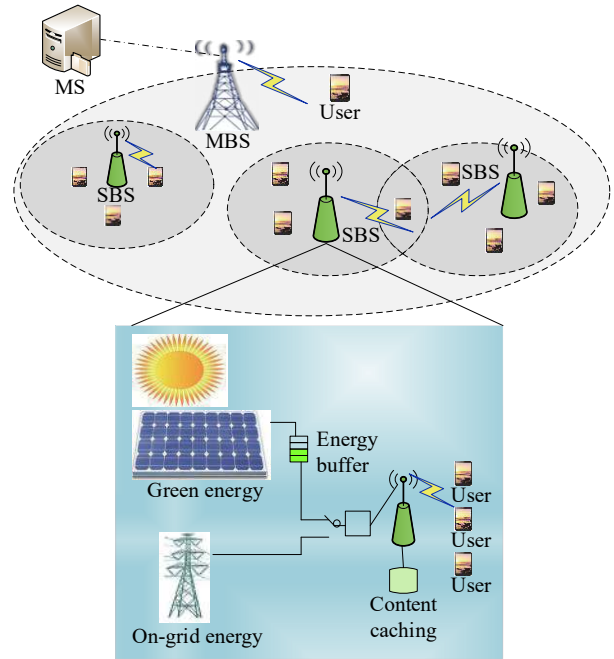


图 1 混合能源供电的多媒体传输结构

假设 MBS 只能由电能供电,其覆盖范围大,电能消耗大。而 SBSs 使用混合能源供电,即电能和绿色能源,如由太阳能电池板捕获的太阳能等。UE(user) 随机分布在 MBS 内,UE 在时间间隔内只能与一个 BS 关联用于传输数据,BS 间复用频谱,每个基站可以服务多个用户,用户间采用正交频分复用方式避免小区内的干扰。

MBS 用户所需的视频数据需从远程服务器端获取,假设 SBS 具有有限的缓存空间,连接在 SBS 上的用户可以直接从中获取内容。采用的是最大距离编码 (maximum-distance-separable, MDS) 方式将多媒体内容编码成多个段,每段文件大小相同,SBS 缓存的内容会根据用户喜好周期性的更新^[12],意味着 SBS 保持持续活跃状态,能持续为用户服务,即 SBSs 缓存的内容能满足其覆盖范围内用户的需求。

设 f_z 表示文件 z 被用户请求的概率,通过局部或全局预测其服从 Zipf 分布^[5,12],并成为广泛应用的模型:

$$f_z = \frac{1}{z^\gamma} \sum_{k=1}^T 1/k^\gamma \quad (1)$$

式中, $\gamma \geq 0$ 为受欢迎的偏移度, γ 越大则请求的内容基本为少部分文件, $\gamma = 1$, 表明该请求服从 Zipf 分布, $\gamma = 0$ 则是均匀分布。索引越小,表示该内容越受欢迎,如 $i > j$, $f_i < f_j$ 。

设无线信道服从准静态瑞利平坦衰落, 连接在 BS_j 上的 UE_i 接收的信干噪比 (SINR) 表示为:

$$\text{SINR}_{ij} = \frac{P_{ij}g_{ij}}{\sigma^2 + \sum_{j' \in \Phi_s+1 \setminus \{j\}} P_{ij'}g_{ij'}} \quad (2)$$

式中, p_{ij} , g_{ij} 分别为 UE_i 和 BS_j 之间的功率和信道增益; σ^2 为噪声功率 $I_{ij} = \sum_{j' \in \Phi_s+1 \setminus \{j\}} P_{ij'}g_{ij'}$, 表示 UE_i 受到其他基站 (包括宏基站) 的干扰。假设在用户关联和资源分配期间, 信道始终保持稳定, 为简化噪声计算, 假设 UE_i 连接到 BS_j 上的噪声为最大噪声且是常数^[8]。用 x_{ij} 表示 UE_i 与 BS_j 关联的指示因子:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & UE_i \text{ 关联 } BS_j \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

在用户关联期间, 由香农公式得 UE_i 的可达数据传输速率为:

$$r_i = b_{ij} \log_2(1 + \text{SINR}_{ij}) \quad (4)$$

式中, b_{ij} 为从 BS_j 上分得的带宽, 此时假设 UE_i 需求的数据给定 R_i 。此时可得 BS_j 给 UE_i 提供其所需数据的发射功率 p_{ij} :

$$p_{ij} = (2^{R_i/b_{ij}} - 1) \frac{\sigma^2 + I_{ij}}{g_{ij}} \quad (5)$$

则 BS_j 的总发射功率为:

$$P_j = \sum_{i \in \Phi_u} x_{ij} p_{ij} \quad (6)$$

假设 $N_j = \sum_{i \in \Phi_u} x_{ij}$ 个 UE 关联在 BS_j 上, 由文献 [13] 得 BS_j 总消耗功率为:

$$P_j^{\text{all}} = \mu_j P_j + P_j^s \quad (7)$$

式中, μ_j 为 BS_j 传输多媒体内容消耗的功率因子; P_j^s 为缓存内容以及静态电路消耗的功率, 对于 MBS 而言只有静态电路, 而对于 SBS 而言两者都包括。

1.2 问题形成

每个时间间隔 τ , 任意用户只能关联一个基站, 任意基站在此时隙只能使用一种能源。若 SBS 存储足够多的绿色资源支持其所关联的 UE 用于数据传输, 则可以优先使用绿色能源, 否则只能使用电能供电。间隔 τ 内, 任意 SBS 存储所有与其关联 UE 所需的多媒体内容。因此, BS_j 在 τ 内消耗的能量表示为:

$$E_j^c = P_j^{\text{all}} \tau \quad (8)$$

时隙开始时 SBS_j 存储的能量为:

$$E_j = \min\{Q - E_j^c + E_j^H, Q_{\max}\} \quad (9)$$

式中, E_j^H 为 τ 时隙的捕获量; Q 为上一时隙存储的能量, 只能在下一时隙使用; Q_{\max} 表示 SBS_j 存储的能量不能超过电池容量。能量到达服从参数为 ε 的泊松分布, 且每个 SBS 能量到达情况相同。定义 SBS_j 能量消耗指示因子 α_j 为:

$$\alpha_j = \begin{cases} 1 & E_j \geq E_j^c \\ 0 & E_j < E_j^c \end{cases} \quad (10)$$

$\alpha_j = 0$ 表示只能使用电能。由式 (10) 可知, 当存储的绿色能量给定时, α_j 的值由 x_{ij} 和 P_{ij} 确定。

定义 m , n 分别表示消耗电能和绿色能源的单价, 其中 $m > n > 0$, 绿色能源消耗的费用比电能的费用便宜很多, 甚至可以免费^[8]。故可计算系统消耗能量所需的费用:

$$U = \sum_{j \in \Phi_s+1} m(1 - \alpha_j) E_j^c + n \alpha_j E_j^c \quad (11)$$

考虑时间间隔 τ 内, 系统总能量成本取决于 SBS s 的功率消耗及其使用的能源类型, 而每个 SBS 的功耗又依赖于与其关联的 UE 和资源分配。因此找到使能量消耗成本最小的 UE 关联机制和资源分配策略是本文的目标, 能量消耗成本最小化的约束优化问题表示为:

$$\min U = \sum_{j \in \Phi_s+1} m(1 - \alpha_j) E_j^c + n \alpha_j E_j^c \quad (12)$$

$$C_1: P_j \leq P_j^{\max}, \quad \forall j \in \Phi_s+1$$

$$C_2: \sum_{i \in \Phi_u} x_{ij} b_{ij} \leq B_j, \quad \forall j \in \Phi_s+1$$

$$C_3: b_{ij} \log_2 \left(1 + \frac{P_{ij} g_{ij}}{\sigma^2 + I_{ij}} \right) = R_i, \quad \forall i \in \Phi_u$$

$$C_4: \sum_{j \in \Phi_s} x_{ij} = 1, \quad \forall i \in \Phi_u$$

$$C_5: x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in \Phi_u, \quad \forall j \in \Phi_s+1$$

$$C_6: \alpha_j \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in \Phi_s+1$$

$$C_7: m > n > 0$$

约束条件 C_1 表示每个 BS 消耗的功率不能超过其最大的发射功率; C_2 表示 BS_j 为其关联的 UE 分配的带宽不能超过最大带宽; C_3 表示每个 UE 的速

率需求; C_4 和 C_5 表示每个 UE 只能关联一个 BS; C_6 表示能源指示因子; C_7 为能源单价。上式问题是混合整数非线性 (MINLP) 问题, 也是 NP-hard 问题^[14]。

由于绿色能源比电能便宜得多, 如果 BS 可以使用其存储的绿色能源来支持它的流量负载, 其能源消耗成本相比使用电能可以大大减少。所以充分利用每个绿色 SBS 上的绿色能源储备对最小能耗问题至关重要。无论每个 SBS 采用哪种能源供能, 为减小网络的总能源成本, 应该最小化每个基站的功率消耗。一方面, 基站的功率消耗依赖于网络所采取的 UE-BS 关联机制; 另一方面, 对一个给定的用户关联机制, 每个基站的功率消耗也取决于带宽分配策略。

因此可将问题划分为两个子问题: 1) 设计 UE-BS 关联机制以最小化能量消耗成本。2) 给定 UE-BS 关联, BS_j 在满足其可用带宽的条件下, 为其关联的 UE 分配带宽资源, 以最小化其功率消耗。

2 用户关联机制与带宽分配策略

本节提出联合基站喜好偏置因子与大偏差理论的用户关联机制、基于拉格朗日对偶算法的带宽资源分配策略解决上述两个问题。

2.1 联合基站喜好偏置因子与大偏差理论的用户关联机制

最大接收功率 (maximum receive power, Max-RP) 关联算法用户会选择发射功率大的 MBS^[15], 这会导致极度的负载不均衡分布, 更多的用户接入 MBS, SBSs 上的绿色能源得不到充分利用, 消耗的电力成本增加。对此提出基站喜好偏置因子算法 (bias station receive power, BSRP), 即添加乘子 S_j 到每个 SBS 上, 当 SBS 的绿色能量充足时, 可以接受更多用户的请求。故此时关联的基站表示为:

$$j^* = \arg \max_{i \in \Phi_u} \{RP_{ij} * S_j\} \quad (13)$$

式中, RP_{ij} 为最大接收功率。定义 SBS $_j$ 能量消耗率 χ_j 为:

$$\chi_j = \frac{E_j^c}{E_j} \quad (14)$$

由以上分析知, 当 $\chi_j > 1$, 表明 SBS $_j$ 中的绿色能量不足以为用户提供数据传输时, 必须使用电能。为减少电能的消耗, SBS $_j$ 必须考虑舍弃某些服务的用户, 直到绿色能量满足其服务用户的能量需求, 此时将 SBS $_j$ 添加乘子 S_j , 以减少用户负载; 当

$0 < \chi_j < 1$ 时, 表明 SBS $_j$ 的绿色能量充足, 应吸引更多的用户为其提供服务, 故可以添加偏置因子 S_j 吸引更多用户。定义基站喜好偏置因子 S_j 为:

$$S_j = \begin{cases} 1 + \log_{\zeta}(\chi_j) & 0 < \chi_j < 1 \\ \zeta^{\chi_j - 1} & \chi_j > 1 \end{cases} \quad (15)$$

式中, $0 < \zeta < 1$ 。设 SBS $_j$ 的能量利用率较大时, 出现绿色能量饥饿的可能性会增大, 若继续让用户接入该基站, SBS $_j$ 只能使用电能。为保证能充分利用所有 SBSs 的绿色能源, 提出大偏差估计法, 估计 SBS $_j$ 出现能量饥饿的概率 p_{es} , 此时 SBS $_j$ 的绿色能源为 E_{jmin} 。若饥饿概率比较大, 用户必须选择其他 SBS, 若无法找到使用绿色能源的 SBS, 则该 SBS 只能使用电能供电或者用户连接到 MBS。

1) 基站绿色能量饥饿

将时隙 τ 分成若干等间隔的微时隙 w ($w \ll \tau$), 则 w 内, 绿色能量减少量表示为:

$$\Delta E_w = E_{wj}^c - E_{wj}^H \quad (16)$$

式中, $\Delta E_w = \{-e_{max}, \dots, 0, 1, \dots, e_{max}^c\}$; E_{wj}^c 为 w 时隙能量的消耗量; E_{wj}^H 为 w 时隙能量的捕获量。设 SBS $_j$ 中能量减少量 $\Delta E_w = h$ 的概率表示为 $\pi_h = p(\Delta E_w = h)$, 当 $\Delta E_w > 0$, 则 $\chi_j > 1$, 意味着此时连接的用户数量开始消耗电能; 当 $\Delta E_w < 0$, 表明绿色能量充足, 可以继续接收用户。 w 时隙到 $w + N$, SBS $_j$ 中能量的总变化量表示为:

$$\Delta E^{w+N} = \sum_i^N \Delta E_{w+i} \quad (17)$$

则在 N 个小时隙内 SBS $_j$ 存储的能量表示为:

$$E_j^{w+N} = E_j^w - \Delta E^{w+N} \quad (18)$$

式中, E_j^w 表示 w 微时隙存储的能量。由此能量饥饿概率表示为:

$$p_{esj}^{w+N} = p(E_j^w - \Delta E^{w+N}) \quad (19)$$

定义 N 个小时隙内, 最大可接受的平均能量减少量为:

$$a_{esj} = \frac{E_j^w - E_{jmin}}{N} \quad (20)$$

实际 SBS $_j$ 中 N 个小时隙内平均能量减少量的期望值为:

$$m_{esj} = E \left[\frac{\sum_{i=1}^N \Delta E_{w+i}}{N} \right] \quad (21)$$

因此, 当 $m_{esj} > a_{esj}$ 时, 继续接收用户将会出现绿色能量饥饿的可能, 重写式 (19) 可得:

$$\begin{aligned} p_{esj}^{w+N} &= p(E_j^w - \Delta E^{w+N}) = \\ p \left(\frac{\Delta E^{w+N}}{N} > \frac{E_j^w - E_{j\min}}{N} \right) &= \\ p \left(\frac{\sum_{i=1}^N \Delta E_{w+i}}{N} > a_{esj} \right) & \end{aligned} \quad (22)$$

当 $m_{esj} \geq a_{esj}$, 表明实际能量的平均减少量远远大于可容忍能量的平均减少量, 即如果继续传输视频数据, 则电池中存储的能量在 N 个时隙后可能会被完全消耗, 此时会出现严重的数据传输中断情况。因此 $m_{esj} \geq a_{esj}$ 情况在本文中是不予考虑的, 基站已知道其能量不足, 故会舍弃一些用户给能量充足的基站服务。

2) 基于大偏差原理的绿色能量饥饿概率估计

大偏差理论^[16-17] 是用于对小概率事件进行分析与预测, 而无线多媒体传输过程中的绿色能量饥饿现象被视为小概率事件。因此, 大偏差理论中的 Cramer's 原理可以用于对能量饥饿概率进行有效估计。

定义: 如果序列 A_1, A_2, \dots 服从速率函数为 $I(\cdot)$ 的大偏差原理 (large deviation principle, LDP), 则对于任意的闭集 F , 有:

$$\limsup_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \log P \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i \in F \right) \leq - \inf_{a \in F} I(a) \quad (23)$$

对于任意的开集 G 有:

$$\limsup_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \log P \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i \in G \right) \leq - \inf_{a \in G} I(a) \quad (24)$$

捕获的能量 E_{wj}^H 和消耗的能量 E_{wj}^C 是独立同分布的随机变量^[17]。矩母函数 $M(\theta) = E e^{\theta \Delta E_w}$, 若 $E\{\Delta E_w\} < a$, 则根据 Cramer's 原理^[16], 序列 ΔE_w 服从大偏差原理, 则有:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \log P \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_i \right) = -I(a) \quad (25)$$

式中, $I(a)$ 为速率函数。为了使 SBS_j 在时隙 τ 不出现绿色能源饥饿, 则必须使 $m_{esj} < a_{esj}$, 故由大偏差原理得:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \log P \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta E_{w+i} > a_{esj} \right) = -I(a_{esj}) \quad (26)$$

式中, $I(a_{esj}) = \sup_{\theta > 0} \{a_{esj}\theta - \log M(\theta)\}$, 通常通过 Legendre 变换得到^[18], 矩母函数: $M(\theta) = \sum_{h=-e_{\max}}^{e_{\max}} \pi_h \exp[i\theta h]$ 。 $I(a_{esj})$ 和 $M(\theta)$ 均为凸函数^[16]。对于 N 较大时, 能量饥饿概率可近似表达为:

$$p_{esj}^{w+N} \approx \exp[-NI(a_{esj})] \quad (27)$$

为求得式 (27), 需要参数 a_{esj}, π_h, m_{esj} 。 a_{esj} 可以直接由式 (27) 得出, 由于未知 ΔE_w 的概率分布, π_h, m_{esj} 的计算难度会加大, 可通过滑动窗口的方法, 根据微时隙观测到的信息估计这些参数值^[17]。设滑动窗口为 N_θ , 在此窗口内 SBS_j 的能量减少量序列可以表示为 $\Delta E_{w1}, \Delta E_{w2}, \Delta E_{w3}, \dots$, 第 n 个窗口观测序列向量为 $\mathbf{Z}_{wn} = [\Delta E_{wn}, \Delta E_{w(n-1)}, \dots, \Delta E_{w(n-N_\theta+1)}]$, 定义 N_h 表示 $\Delta E_w = h$ 发生的次数, 则发生的频率表示为:

$$\hat{q}_h(n) = \frac{N_h}{N_\theta} \quad (28)$$

由上式知, 当 N_θ 过小会导致对 $\hat{q}_h(n)$ 的估计误差偏大, N_θ 过大会影响该估计模型对参数的灵敏度。为此引入平滑因子 ρ 使得下式成立:

$$\hat{\pi}_h(n) = \rho \hat{\pi}_{h-1} + (1-\rho) \hat{q}_h(n) \quad (29)$$

Gardner's 理论^[19] 指出平滑因子用于动态估计中, $\rho \in [0.7, 0.9]$ 比较合适。可得:

$$\hat{m}_{esj} = \frac{\sum_{i=n-N_\theta+1}^n \Delta E_{wi}}{N_\theta} \quad (30)$$

2.2 基于拉格朗日对偶算法的带宽资源分配策略

根据功率消耗模型, 式 (7) 中 BS_j 的总功耗由 P_j 决定, μ_j 和 P_j^s 是固定不变的, 因此每个 BS 最小功率消耗问题可以表示为:

$$\begin{aligned} \min \sum_{i \in N_j} (2^{R_i/b_{ij}} - 1) \frac{\sigma^2 + I_{ij}}{g_{ij}} \\ S_1: \sum_{i \in N_j} b_{ij} = B_j \\ S_2: b_{ij} > 0, \forall i \in N_j \end{aligned} \quad (31)$$

子约束条件 S_1 表示所分带宽不能超过总带宽; S_2 表示 BS_j 应为与其关联的每个 UE 分配带宽。由文献 [8] 知带宽分配问题是单目标优化问题, 文献 [14] 指出 S_1 和 S_2 满足斯莱特条件是凹函数, 故式 (31) 为凸优化问题, 可以通过解其对偶问题来求解该凸优化问题。

定义对偶变量参数 λ 为约束条件 S_1 的拉格朗日乘子, η 为约束条件 S_2 的拉格朗日乘子, 故式 (31) 的拉格朗日函数可表示为:

$$\mathcal{L}(b_{ij}, \lambda, \eta) = \sum_{i \in N_j} (2^{R_i/b_{ij}} - 1) \frac{\sigma^2 + I_{ij}}{g_{ij}} + \lambda \left(\sum_{i \in N_j} b_{ij} - B_j \right) + \eta \sum_{i \in N_j} b_{ij} \quad (32)$$

运用 KKT 条件解得式 (32) 中最优解。假设 b^*_{ij} , λ^* , η^* 为最优原始解和最佳对偶解:

$$\lambda^* = 2^{\frac{R_i}{b^*_{ij}}} \frac{\sigma^2 + I_{ij}}{g_{ij}} \frac{R_i \ln 2}{b^*_{ij}{}^2} \quad (33)$$

$$\sum_{i \in N_j} b^*_{ij} = B_j \quad (34)$$

$$b^*_{ij} > 0 \quad (35)$$

令 $f(b_{ij}) = \lambda$, 则有:

$$f(b_{ij}) = \lambda = 2^{\frac{R_i}{b_{ij}}} \frac{\sigma^2 + I_{ij}}{g_{ij}} \frac{R_i \ln 2}{b_{ij}{}^2} \quad (36)$$

对 $f(b_{ij})$ 再次使用 KKT 条件, 可得: 当 $b_{ij} > 0$ 时, $\frac{\partial f(b_{ij})}{\partial b_{ij}} < 0$ 。因此式 (36) 是单调递减函数, 采用改进的二分法求得 λ^* 。给定 λ , 可得 BS_j 服务 UE $_i$ 上的所有带宽 $b_j = [b_{1j}, b_{2j}, \dots, b_{N_jj}]$ 。

2.3 算法实现

2.3.1 用户关联机制实现的具体步骤如下:

- 1) 每个 UE $_i$ 观测接收功率 RP_{ij} , 并接收将其覆盖 BS 的偏置因子 S_j , 如果 UE $_i$ 不能接收到任何乘子, 则将 S_j 初始化为 1。
- 2) 每个 UE $_i$ 根据 RP_{ij} 选择关联 BS_j 。
- 3) 每个 BS_j 根据提出的带宽分配算法 (见带宽分配算法) 计算总能耗 E_j^c , 由 E_j^c 和 E_j 计算 χ_j 。
- 4) 每个 BS_j 由式 (15) 将基站喜好偏置因子广播给所有用户, 根据式 (13) 选择偏置因子最大的 BS_j^* 。
- 5) 基于大偏差理论估计绿色能量饥饿概率 p_{es} , 若大于 $p_{es} > \rho$, 则执行步骤 4)。

2.3.2 改进的二分法

初始化拉格朗日乘子 λ_{\max} 、 λ_{\min} 、误差 error。

开始迭代, $\lambda = (\lambda_{\max} + \lambda_{\min})/2$, 求解式 (36) 得 b_j , 若 $|\sum b_{ij} - B_j| < \text{error}$, $b_j^* = b_j$; 若 $\sum b_{ij} > B_j$, $\lambda_{\max} = \lambda$, 否则, $\sum b_{ij} < B_j$, $\lambda_{\min} = \lambda$ 。迭代结束。

3 数值分析

本节首先分析在时隙 τ 的微时隙中能量饥饿概率。其次分析能量消耗率对基站喜好偏置因子的影响。最后将所提算法与 Max-RP、最大信道增益算法 (maximum channel gain, MCG) 算法分别在用户分布、系统能耗成本方面进行比较。

主要参数设置: MBS 位于原点, 在其覆盖范围内均匀分布 7 个 SBS, 其半径是 MBS 的 0.6 倍。同时考虑用户随机分布在 MBS 覆盖范围内, 用户速率需求相同且为 1 Mb/s, 用户质量的考虑会在以后的研究中开展。任意基站的信道带宽是 1 MHz。其他参数如表 1 所示, 由 3GPP 协议给出路径损耗^[20]。

表 1 基站仿真参数

基站类型	$p^{\max}(W)$	$p^s(W)$	μ	路径损耗
MBS	40	130	4.7	$128.1 + 37.6 \log(d)$
SBS	1	13.6	4.0	$130.7 + 36.7 \log(d)$

图 2 表示将每个时隙 τ 分成若干等间隔微时隙 w , 所有 SBSs 基于大偏差理论估计时隙 τ 内出现绿色能源饥饿的概率。从图 2 可以看出能量饥饿概率随能量到达数量的增加而减少, 即当 SBS_j 的能量到达量满足其所服务的用户需求, 则 SBS_j 出现能量饥饿的可能性越小, 可以继续接收用户的接入请求。当饥饿概率越大, 此时用户需考虑接入其他绿色能量充足的 SBS_j , 若系统中无绿色能量可用, 用户选择与其距离最近的 BS 关联。同时预测间隔足够大, 能量饥饿概率估计模型式 (27) 越能达到期望值。

图 3 表示在参数 ζ 不同值下, SBS_j 的绿色能量消耗率对其偏置因子的影响。表明能量消耗率越高, 即绿色能量消耗大, 剩余的量不足以为用户提供服务, 基站乘子就越低。然而当能量消耗率越低, 基站喜好偏置因子越大, 会吸引更多的用户接入其中 SBS_j 上的绿色能量。

图 4 表示在宏小区范围内随机分布 35 个用户, 每个基站捕获的能量为 160 uJ 的情况下, 利用所提的带宽分配算法, 分析并比较所提用户关联策略对用户分布的影响。可以看出, 所提的

BSRP 算法能将更多的用户吸引至 SBS, 且使用电能的用户与 Max-RP、Max-MCG 相比分布降低了 75%、92.8%, 关联在宏基站上的用户减少了 69.5%、41.67%, 使用绿色能量的用户增加了 70.3%、48.2%。

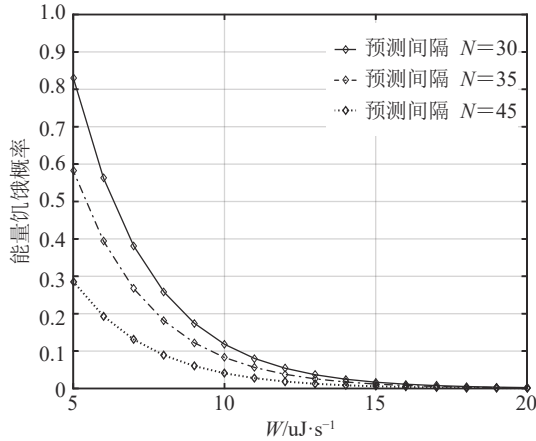


图 2 到达能量对基站能量饥饿概率的影响

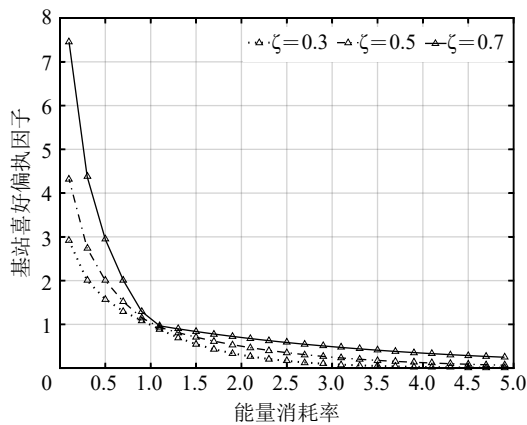


图 3 能量利用率对基站喜好偏置因子的影响

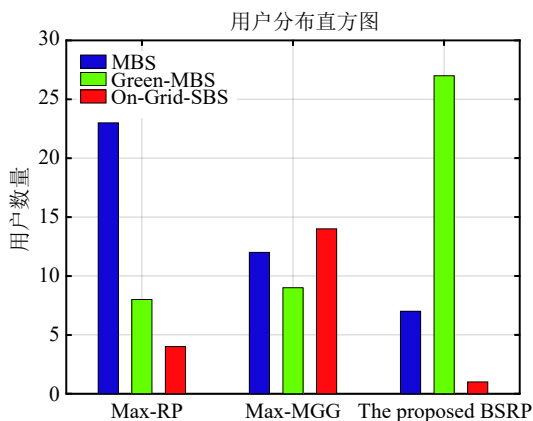


图 4 用户分布比较

图 5 表示在固定 SBS 捕获的能量条件下, 增加用户数量, 3 种算法系统消耗的成本比较。可以分析出, 当用户数量较小时, 本文算法的系统能耗成本(千元)低于其他两种关联策略, 但是随着用

户增加到一定值, 所有 SBSs 上的绿色能量几乎耗尽, 只能使用电能或者用户连接到 MBS 上以保障其所需速率, 故系统成本会急剧增加。同时可以看出用户数量增加, 消耗系统的能量成本也会随之增加。

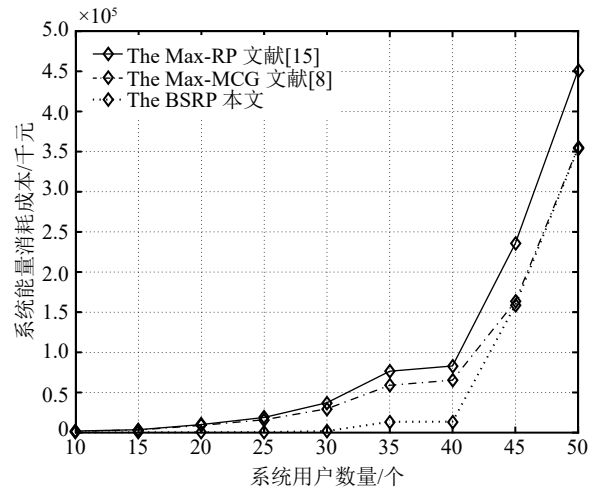


图 5 不同用户数量产生的能耗成本

4 结束语

本文考虑 5G 超密集网络部署混合能源的 SBS, 通过研究下行链路的用户关联和资源分配问题, 给出了一种联合大偏差理论与基站喜好偏置因子的用户关联机制和基于拉格朗日对偶算法的带宽分配策略。数值仿真数据表明, 相对于 Max-RP 和 MCG 两种算法, 在捕获能量和用户数量一定的条件下, 系统成本分别降低了 82.47% 和 77.2%。

参 考 文 献

- [1] CISCO. Cisco visual networking index: Global mobile data traffic forecast update, 2016–2021, white paper [EB/OL]. [2019-07-02]. <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/>.
- [2] WANG H, ZHAO Z Z, CHENG X D, et al. Base station sleeping strategy for on-grid energy saving in cellular networks with hybrid energy supplies in IoT environment[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 45578-45589.
- [3] PEI L, LIN J H, WEN P Z, et al. Energy-delay tradeoff in ultra-dense networks considering BS sleeping and cell association[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(1): 734-751.
- [4] GAO C F, ZHANG W Y, TANG J. Building elastic hybrid green wireless networks[J]. *IEEE Internet Things Journal*, 2017, 4(6): 2028-2037.
- [5] 苏恭超, 陈彬, 林晓辉, 等. 异构蜂窝网中基于匈牙利算法的用户关联方法[J]. *电子科技大学学报*, 2017, 46(2): 346-351.

SU Gong-chao, CHEN Bin, LIN Xiao-hui, et al. User

- association in heterogeneous cellular networks via the hungarian method[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2017, 46(2): 346-351.
- [6] SUTO K, NISHIYAMA H, KATO N. Postdisaster user location maneuvering method for improving the QoE guaranteed service time in energy harvesting small cell networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(10): 9410-9420.
- [7] GUO F X, ZHANG H L, LEUNG V C M, et al. Joint optimization of caching and association in energy-harvesting-powered small-cell networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(7): 6469-6480.
- [8] WANG B, KONG Q, LIU W Y, et al. On efficient utilization of green energy in heterogeneous cellular networks[J]. *IEEE Systems Journal*, 2017, 11(2): 846-857.
- [9] ZHANG H, HUANG S, JIANG C, et al. Energy efficient user association and power allocation in millimeter-wave-based ultra-dense networks with energy harvesting base stations[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2017, 35(9): 1936-1947.
- [10] WEI Y F, RICHARD F Y, SONG M, et al. User scheduling and resource allocation in HetNets with hybrid energy supply: An actor-critic reinforcement learning approach[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(1): 680-691.
- [11] LOHANI S, HOSSIAN E, BHARGAVA V K. Joint resource allocation and dynamic activation of energy harvesting small cells in OFDMA HetNets[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(3): 1768-1783.
- [12] XIANG L, DERRICK N W K, WANG J H, et al. Cross layer optimization of fast video delivery in cache and buffer-enabled relaying networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(12): 11366-11382.
- [13] AUER G. How much energy is needed to run a wireless network[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 18(5): 40-49.
- [14] 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.
- [15] KOIZUMI T, HIGUCHI K. Simple decentralized cell association method for heterogeneous networks in fading channel[C]//Proc of IEEE 78th Vehicular Technology Conference. [S.l.]: IEEE, 2013: 1-5.
- [16] MANDJES M. Large deviations for gaussian queues: Modelling communication networks[M]. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2007.
- [17] DEMBO A, ZEITOUNI O. Large deviations techniques and applications[M]. New York, NY, USA: Springer, 2009.
- [18] YANG J, CAI W Z, HANZO L, et al. Online measurement based adaptive scalable video transmission in energy harvesting aided wireless systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(7): 6231-6245.
- [19] GARDNER E. Exponential smoothing: The state of the art[J]. *Journal Forecasting*, 1985, 4(1): 1-28.
- [20] XIAO H L, EN Y H, CHRONOPOULOS A T, et al. Joint clustering and power allocation for the cross roads congestion scenarios in cooperative vehicular networks[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, 20(6): 2267-2277.

编辑 税 红