

## ◆ 计算科学 ◆

基于 5G 毫米波协作通信的小单元无线能量信标优化部署策略<sup>\*</sup>卢明好<sup>1,2,3</sup>, 李陶深<sup>1,2\*\*</sup>, 吕品<sup>1</sup>

(1. 广西大学计算机与电子信息学院, 广西南宁 530004; 2. 南宁学院信息工程学院, 广西南宁 530200; 3. 广西医科大学基础医学院, 广西南宁 530021)

**摘要:**为实现第五代移动通信(5G)无线网络中高频谱效率与低能耗的绿色通信目的,本文研究了基于毫米波(mmWave)协作通信小单元下无线能量信标(Power Beacons, PB)的优化部署策略。该策略构建了一个高低频混合组网的能量受限型用户设备(User Equipment Devices, UE)毫米波协作通信的小单元网络模型,通过设计一个“需求-选择-建链”模式的新型建链协议,将通信毫米波定向传输技术应用于该建链过程中。在此模型基础上,以提高边缘系统频谱效率和能量收集覆盖率为目标,通过最小化固定充电的能量信标数量,在实现系统能耗最小化问题基础上保证系统的正常运行。针对该最优化问题是一个混合整数规划的多项式复杂程度的非确定性(Non-deterministic Polynomial Hard, NP-难)问题,设计一个具有常数因子的贪心算法近似求解优化问题。理论分析证明了该算法的可行性。仿真结果表明,本研究提出的优化部署策略能有效优化能量信标部署,在同等覆盖率与区域频谱效率增益下能耗最低。

**关键词:**无线携能通信;移动边缘计算;设备间通信;任务卸载;功率分配

中图分类号: TP393 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2024)02-0302-09

DOI: 10.13656/j.cnki.gxkx.20240619.011

第五代移动通信(5G)延续了传统移动通信系统稳定、高速、可靠的特点,使得具有高计算性能智能终端设备数量和数据流量呈爆炸式增长,这给传统的能量受限的无线通信网络带来了新的挑战<sup>[1]</sup>。在增强移动宽带、超可靠与低时延通信、海量物联网通信三大主要场景下,5G的关键性能要求也相应提高,如

在频谱效率(Spectral Efficiency, SE)方面将较传统无线网络提升4—15倍,而对能量效率的需求也将提升百倍以上,以实现真正意义上的绿色通信。

能量收集技术是从周围环境中提取和收集能量,用于能量存储或用作设备后续运行的驱动力。电磁波本身就是一种能量载体,通信设备发出的射频

收稿日期: 2023-02-01

修回日期: 2023-05-12

\* 国家自然科学基金项目(62062008, 61762010)和广西科技计划项目(桂科 AD20297125)资助。

【第一作者简介】

卢明好(1993—),女,硕士,助教,主要从事无线携能通信、移动边缘计算研究。

【\*\*通信作者简介】

李陶深(1957—),博士,教授,主要从事无线网络、云计算与大数据、网络与信息安全等研究, E-mail: tshli@gxi.edu.cn。

【引用本文】

卢明好,李陶深,吕品. 基于5G毫米波协作通信的小单元无线能量信标优化部署策略[J]. 广西科学, 2024, 31(2): 302-310.

LU M Y, LI T S, LÜ P. Optimization Deployed Strategy of Wireless Power Beacon Based on 5G Millimeter Wave Cooperative Communication Small Cell [J]. Guangxi Sciences, 2024, 31(2): 302-310.

(Radio Frequency, RF)信号既是信息的载体也是能量的载体,可实现能量和信息的同步传输。因此,以 RF 信号为能量收集对象的相关研究受到了业界的广泛关注。在能量收集无线网络中,可大致分为基于发射端的无线供能通信网络(Wireless Powered Communication Networks, WPCN)和基于接收端的无线携能通信(Simultaneous Wireless Information and Power Transfer, SWIPT)<sup>[2]</sup>。

目前,基于无线能量传输(Wireless Power Transmission, WPT)的能量收集技术已经成为受能量限制的无线通信网络的关键候选技术<sup>[3-6]</sup>。而备受工业界青睐的一种无线能量收集方法是在传统蜂窝网络中部署一种低成本、不需要回程链路的设备,即能量信标(Power Beacons, PB),该设备在无线网络中只提供专用的能量传输<sup>[7]</sup>。例如,Wang 等<sup>[8]</sup>在大规模传感器网络中提出了一种自适应定向波束无线能量传输方案,并基于波束功率强度和传感器数量之间权衡的考虑提出 3 种无线能量传输方案。Liu 等<sup>[9]</sup>研究大规模认知蜂窝网络中的安全 D2D (Device-to-Device)通信问题,提出 3 种无线能量传输方案,从配备了多天线的 PB 中获取能量,然后使用宏基站(Base Station, BS)的频谱与相应的接收机进行安全通信。Guo 等<sup>[10]</sup>通过随机几何工具分析了基于 SWIPT 的 PB 辅助的自组网络(Ad Hoc Network)的中断概率。然而,上述工作均是基于传统低于 6 GHz 频段(Sub-6GHz)部分频谱的研究,没有进一步考虑频谱效率的要求。

毫米波(mmWave)段高频具有频谱资源丰富且干净、可实现高速率传输、少有干扰源等优点,采用高频 mmWave 进行短距离通信可以获得大量频谱资源,显著提高 5G 移动网络系统吞吐量和频谱效率。目前,采用 mmWave 进行 WPT 和无线信息传输(Wireless Information Transmission, WIT)的研究已取得一定进展,如 Zhai 等<sup>[11]</sup>考虑 5G 频率下的 SWIPT 网络设计和优化,设计了一个融合 5G 低频(Low Frequency, LF)和低频(High Frequency, HF)信道的双频 SWIPT 网络;Khan 等<sup>[12]</sup>和 Wang 等<sup>[13]</sup>分别对 Sub-6GHz 和 mmWave 两个频段的 WPT 和 WIT 进行性能比较,结果表明 mmWave 在能量收集和吞吐量方面比 Sub-6GHz 具有更好的效果。但是 mmWave 具有高路径损耗和对障碍物敏感的缺点,并不适合远距离传播。为了克服 mmWave 的高路径损耗,一些研究采用多天线技术来增加天线增

益。例如,Liu 等<sup>[14]</sup>和 Barati 等<sup>[15]</sup>提出了基于定向波束成形技术的 mmWave 定向传输机制。Liu 等<sup>[16]</sup>在对 mmWave 波束训练的基础上提出了穷举搜索和分层搜索的波束对准方法来实现定向传输。Liu 等<sup>[17]</sup>构建了一个典型的高低频混合组网的 mmWave 小型蜂窝小区,提出了 2 种经典的波束对准方法,给出了 2 个为该场景设计的波束对准方案。Psomas 等<sup>[18]</sup>研究了无线能量传输与 mmWave 通信在无线传感器网络中的技术结合,提出了 4 个不同复杂度的位置感知扇区选择方案。这些研究表明,虽然采用定向波束成形技术进行 mmWave 传输可以提高频谱效率,但是却没有考虑多天线所带来的能源消耗问题。

除了从技术改进方面入手外,研究者还将 mmWave 技术应用于短距离 D2D 通信场景之中,在提高频谱效率的同时能降低系统能耗。Giatsoglou 等<sup>[19]</sup>利用 mmWave 的方向性来增加 D2D 链路之间的频谱资源复用,减轻 D2D 通信在 Sub-6GHz 频段上共信道干扰。Niu 等<sup>[20]</sup>利用定向波束成形技术实现 mmWave 的高速回程,通过并发传输调度和功率控制将能耗最小化。Niu 等<sup>[21]</sup>研究了在 mmWave 小单元中实现 D2D 通信的节能多播调度问题,提出了一种高效节能的组播调度方案,通过调整链路的传输功率来降低能耗并确保吞吐量。另外,一些学者将 mmWave 应用于 PB 辅助的无线蜂窝网络之中。Khan 等<sup>[22]</sup>研究了 PB 和能量收集器组成的大规模网络中 WPT 问题。Zhou 等<sup>[23]</sup>提出了一种 PB 辅助 mmWave 的无线 Ad-hoc 网络。Kuang 等<sup>[24]</sup>通过联合优化频谱资源块分配、能量收集时隙以及发射功率,解决基于能量收集的异构网络中 D2D 通信的平均能量效率问题。Lee 等<sup>[25]</sup>提出了一种基于深度学习的资源管理方法,使 D2D 接收机可采用功率分流的工作方式实现 SWIPT。在以上的研究中,每个发射机从所有的 PB 中收集能量,然后利用所收集到的能量将信息发送给所需的接收机,并采用随机几何工具分析系统中中断概率,但未考虑系统能耗的问题。

综上所述,在移动通信中采用 PB 和 mmWave 技术进行无线能量与信息传输比传统 BS 服务的蜂窝网络具有更大的优势,但至今没有一个适应于 5G 实际发展需求的边缘网络结构模型以及同时权衡频谱效率和能耗管理的策略方案。为此,本研究基于 5G 无线网络,以提高频谱效率和减小能耗为目标,重点考虑在 5G 高低频混合组网的蜂窝网络边缘侧的一个小单元场景内(如高速热点网络、车联网或小蜂

窝)的通信问题,构建一个适应 5G 发展的新型网络结构,并提出使该系统正常运行的最低功耗方案,实现在满足频谱效率和能量覆盖率条件下最小化系统能耗,确保整个小单元能够维持正常边缘移动通信。

## 1 系统模型

### 1.1 网络模型构建

本研究考虑如图 1 所示的 5G 高低频混合组网的蜂窝小区。在 BS 覆盖的范围之内,有多个适合采用 mmWave 技术传输的 mmWave 小单元 (small cell),例如需要大量数据流量的室内或室外小蜂窝、需要提供高速接入和回程服务的高速热点网络以及支持新兴自动驾驶的车联网等。其中 BS 工作在 Sub-6GHz 频谱范围,为其他的 mmWave 小单元提供额外的信号服务。由于采用 mmWave 通信,mmWave 小单元与宏小区工作在不同的频带之上,故可以避免宏小区和 mmWave 小单元之间的干扰。此外,由于 mmWave 具有定向传输、较高的路径损耗、对阻塞敏感等特点,因此 mmWave 小单元之间的干扰几乎可以忽略不计。

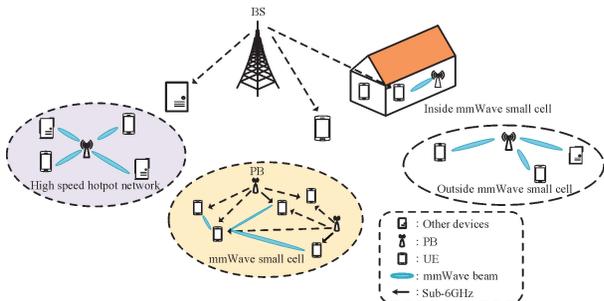


图 1 5G 高低频混合组网的蜂窝小区

Fig. 1 5G high-low frequency hybrid networking cellular cell

Huang 等<sup>[26]</sup>的研究表明,在宏基站中断的情况下,在蜂窝网络中部署 PB,并由 PB 为蜂窝用户提供上行传输能量是可行的。为此,本研究考虑在 5G 场景下,高低频混合组网的蜂窝网络边缘侧的一个小单元内(例如高速热点网络、车联网或小蜂窝),该小单元内不包含宏基站(即不考虑从宏基站收集能量及与宏基站发生数据传输),只包含若干 PB 和随机独立分布的能量受限型用户设备 (User Equipment Devices, UE),分别用集合  $\Phi_p$  和  $\Phi_u$  表示。由于不含宏基站,在模型中,PB 工作在 Sub-6GHz 频段并周期性地为小单元内的所有 UE 供电,以确保整个小单元能正常运行,而信息的传输与交换则通过 mmWave 只发生在 UE 之间。值得注意的是,本研究假设从室内到室外的损耗很高,所有的 PB 和 UE 都可以看作是

户外设备。

### 1.2 协作配对策略

为了更好地描述 UE 之间的无线能量与信息传输,将 UE 分为发射机 (Transmitters, TX) 和接收机 (Receivers, RX),并提出一个新型的 UE 之间协作配对策略,称为“Build to Order (BTO)”,即“需求-选择-建链”模式的新型配对策略(图 2)。

在目的接收机请求阶段[图 2(a)],RX 通过向小单元内其他 UE 发送请求信号;收到请求信号的 UE 搜索自身信息,若其自身存在 RX 所需的信息内容则被标记为备选源发射机。在选择最佳源发射机阶段,带有所需信息内容的备选源发射机均采用 mmWave 波束向 RX 发送信号。由于 mmWave 信道具有稀疏性的特点,因此在该选择阶段采用定向波束成形技术识别强通信路径[图 2(b)],选择满足传播性能最佳的信道,以进行最佳源发射机与目的接收机的配对。在确定最佳源发射机之后,UE 之间就完成配对(即确定 TX 到 RX 的具体链路)。此时,TX 向 RX 发送 mmWave 信号,由于该 mmWave 波束既是信息的载体也是能量的载体,RX 通过 SWIPT 技术将 TX 发送的波束用于能量收集和信息解码。

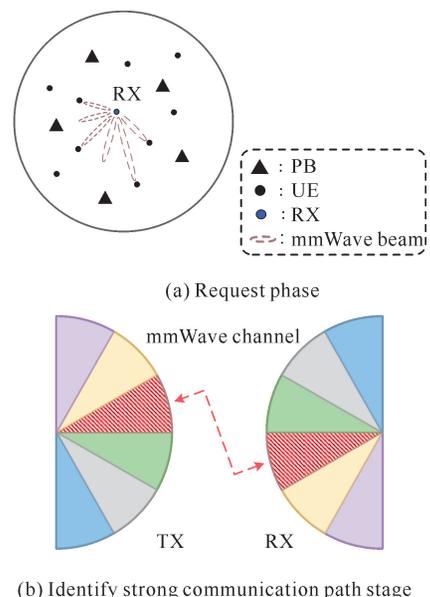


图 2 UE 协作配对协议

Fig. 2 Protocol of UE cooperative pairing

### 1.3 能量收集模型

假设每个 PB 可以访问专用电源(如:接入电网),并以恒定功率  $P_p$  全向地发射 RF 信号并为小单元内的 UE 提供能量。一旦 UE 的能量收集电路被激活,在任意位置的 UE 所能收集到的能量假定是线性正比于接收总功率和能量转化效率  $\eta$  ( $0 < \eta < 1$ ),

则假设在位置  $u$  处的 UE 从 PB 处所能收集到的能量可以表示为

$$P_u = \eta P_p \|h_{(p,u)}\|^2 L(r_{(p,u)}), \quad (1)$$

其中,  $h_{(p,u)}$  为 PB 与 UE 之间的小尺度信道衰落效应, 是服从零均值、单位方差的复高斯分布。假设本研究中所有信道为准静态衰落, 即每个传输块的信道系数为常数, 不同传输块之间独立变化。  $L(r_{(p,u)}) = r_{(p,u)}^{-\alpha}$  为路径损耗, 依赖于 PB 与 UE 之间的欧几里得距离  $r_{(p,u)}$ ;  $\alpha$  为路径损耗因子,  $2 \leq \alpha \leq 4$ 。

#### 1.4 mmWave 信道模型

在 TX-RX 链路阶段, 采用 mmWave 进行能量与信息的联合传输, 采用 Di Renzo 等<sup>[27]</sup> 提出的三态阻塞模型, 即: ① 如果不存在阻塞, 则链路状态为视距状态 (LOS); ② 若存在阻塞, 则链路状态为非视距状态 (NLOS); ③ 若链路太弱, 则称为中断状态 (OUT)。

在上述 3 种链路状态下, mmWave 信道经历不同的信道条件, 对其信道衰落  $h_{(T,R)}$ , 当链路处于 LOS 状态时, 采用 Nakagami- $m$  衰落, 服从伽马分布; 当链路处于 NLOS 状态时, 服从瑞利衰落分布。相应地, 对于路径损耗  $L(r_{(T,R)})$ , 可以用以下分段函数表示:

$$L(r_{(T,R)}) = \begin{cases} r_{(T,R)}^{-\alpha_L}, & \text{LOS} \\ r_{(T,R)}^{-\alpha_N}, & \text{NLOS} \\ \infty, & \text{OUT} \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $r_{(T,R)}$  是 TX 到 RX 的欧几里得距离,  $\alpha_L$  表示链路在 LOS 状态下的路径损耗,  $\alpha_N$  表示链路在 NLOS 状态下的路径损耗 ( $2 \leq \alpha_L \leq \alpha_N$ ), 并假设当链路处于 OUT 状态时路径损耗为无穷大。

#### 1.5 能量与信息联合传输

在 PB 为 UE 供电阶段, 当 UE 所能收集到的能量大于激活阈值  $\gamma_{PT}$  时, 称为激活的 UE, 所有满足能量收集阈值的 UE 用集合  $\Phi_{\text{active}}$  表示 ( $\Phi_{\text{active}} \subseteq \Phi_u$ )。只有处于激活状态的 UE, 才能彼此之间进行信息传输与交换。假设位于  $y$  处的 RX 完成配对之后的信号干扰噪声比  $SINR_y$  可以表示为

$$SINR_y = \frac{P_{X_0} |h_{(0,y)}|^2 L(r_{(0,y)})}{\sum_{X_i \in \Phi_{\text{active}}, i \neq 0} P_{X_i} |h_{(i,y)}|^2 L(r_{(i,y)}) + \sigma^2}, \quad (3)$$

式中,  $X_0$  为能与  $y$  处 RX 完成最佳配对的 TX, 即  $X_0 = \arg\max_{X_i \in \Phi_{\text{active}}} P_{X_i} |h_{(i,y)}|^2 L(r_{(i,y)})$ ,  $P_{X_i}$  表示  $X_i$  的发射功率,  $h_{(i,y)}$  表示  $X_i$  到  $y$  的链路准静态衰

落,  $L(r_{(i,y)})$  表示  $X_i$  到  $y$  的路径损耗。因此, 上式中分子项表示  $X_0$  到  $y$  链路上的信号信息。此外, 由于 PB 工作在 Sub-6GHz 频段, 与 TX-RX 链路异频工作, 故此时  $y$  处 RX 所受到的干扰为其他未配对的激活状态的 UE 所发射出来的 RF 信号之和, 即  $\sum_{X_i \in \Phi_{\text{active}}, i \neq 0} P_{X_i} |h_{(i,y)}|^2 L(r_{(i,y)})$ 。  $\sigma^2$  表示均值为零、方差为  $\sigma^2$  的加性高斯白噪声 (Additive White Gaussian Noise, AWGN)。

根据香农定理, 采用 mmWave 进行通信的位于  $y$  处 UE 的吞吐量  $R_y$  为

$$R_y = W \log_2(1 + SINR_y). \quad (4)$$

其中,  $W$  是 mmWave 带宽。

#### 1.6 性能指标

在传统移动通信系统中, 频谱效率是一个衡量系统性能的关键指标。但传统的频谱效率指标只是一个流量负荷度量, 不是吞吐量密度。如前所述, 5G 在频谱效率方面要求将提高 4—15 倍, 并且随着超密集小区、大规模多输入多输出等新技术的采用及部署, 传统的频谱效率表征系统已经不够全面。因此, 在考虑蜂窝网络空间特性的基础上, 本研究提出使用区域频谱效率 (Area Spectrum Efficiency, ASE) 来表示区域内所有用户的平均频谱效率, 该指标衡量了整个系统的网络行为。在给定区域  $A$  内的 ASE [用  $S(A, R)$  表示] 定义为

$$S(A, R) = \frac{\sum_{y \in \Phi_u} R_y}{W |A|}, \quad (5)$$

即单位带宽单位面积内的吞吐量之和, 式中  $\sum_{y \in \Phi_u} R_y$  表示该区域内所有可以进行 TX 和 RX 通信的链路的吞吐量,  $|A|$  表示面积, 单位为  $\text{bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz} \cdot \text{km}^2)$ 。

## 2 问题描述与最优值求解

本研究的目标是在满足区域频谱效率约束下, 最小化固定充电的 PB 数量  $N_p$ , 并规划每个 PB 的最佳部署方案, 从而保证系统能够正常运行。因此, 上述优化问题  $P$  的数学模型描述如下:

$$\begin{aligned} & \min_{N_p} |N_p| \\ & \text{s. t. } S(A, R) \geq S_{th}^* \\ & N_p \subseteq \Phi_p \\ & P_u \in \Phi_u \geq \gamma_{PT}, \end{aligned} \quad (6)$$

其中,  $S_{th}^*$  为该区域内的目标 ASE;  $\Phi_p$  是预置的 PB 集

合, 显然所要求解的最少 PB 个数  $|N_p|$  是  $\Phi_p$  的子集;  $\gamma_{PT}$  为激活阈值。另外, 需要保证区域内所有的 UE 都能通过收集 PB 发射的能量而进行下一步的信息传输, 即覆盖率达到 100%。问题(6)是一个混合整数规划问题, 具有多项式复杂程度的非确定性 (Non-deterministic Polynomial Hard, NP-难) 性质, 直接求其最优解是困难的。为此, 本研究考虑用一个近似算法来求解, 在降低复杂度的同时获得良好的性能。

为设计一个有效的算法来求解该最优化问题, 对集合  $B_n, B_p$ , 构造一个 ASE 增量函数  $F$ , 若在  $B_n$  基础上加入  $B_p$ , 所能获得的 ASE 增量可以表示为

$$F(B_p) = S(B_n \cup B_p) - S(B_n). \quad (7)$$

**定理 1:** ASE 的增量函数  $F$  满足子模性。

证明: 首先, 对于  $\emptyset$ , 代入式(7), 有  $F(\emptyset) = 0$ ; 然后, 函数  $F$  在关注的范围内是一个单调增函数, 即在未达到峰值目标  $S_{th}^*$  时是单调递增的; 最后, 定义一个能量收集覆盖率函数  $C_k$ , 表示当第  $k$  个 PB 部署到区域内所能覆盖的 UE 数, 则对  $N_p \subset N_p' \subset \Phi_p$ , 有以下能量收集覆盖率-ASE 增量的关系假设:

$$|C_k(N_p \cup \{k\})| \geq |C_k(N_p' \cup \{k\})| \Rightarrow S(N_p \cup \{k\}) - S(N_p) \geq S(N_p' \cup \{k\}) - S(N_p'), \quad (8)$$

即: 假设第  $k$  个 PB 的部署比第  $k'$  个 PB 的部署所能激活的 UE 更多, 称 PB $k$  比 PB $k'$  有更大的能量收集覆盖率; 又以等功率  $P_p$  发送能量信号的 PB 若在其覆盖区域内能使更多的 UE 被激活, 则其覆盖区域内所能获得的信息量更大。根据式(5), 显然部署第  $k$  个 PB 比部署第  $k'$  个 PB 能获得更高的 ASE 增益。

为证明 ASE 的增量函数  $F$  的子模性, 需要证明:

$$F(N_p \cup \{k\}) - F(N_p) \geq F(N_p' \cup \{k\}) - F(N_p'). \quad (9)$$

通过上述假设, 能量收集覆盖率函数满足:

$$|C_k(N_p \cup \{k\})| \geq |C_k(N_p' \cup \{k\})|, \quad (10)$$

可得:

$$S(N_p \cup \{k\}) - S(N_p) = F(N_p \cup \{k\}) \geq S(N_p' \cup \{k\}) - S(N_p') = F(N_p' \cup \{k\}). \quad (11)$$

又 ASE 的增量函数  $F$  是单调增函数, 则对  $N_p \subset N_p' \subset \Phi_p$ , 有:

$$F(N_p) \leq F(N_p'). \quad (12)$$

联合式(11)与式(12)可得式(9), 由此证明了 ASE 的增量函数  $F$  具有子模性。

由于 ASE 的增量函数  $F$  满足子模性, 因此为求问题  $P$  的最优解可以采用一个常数趋近因子的贪心算法进行求解。算法描述如下:

输入: PB 发射功率  $P_p$ , 能量转化效率  $\eta$ , 路径损耗因子  $\alpha, \alpha_L$  和  $\alpha_N$ , 高斯白噪声功率  $\sigma^2$ 。

输出: 满足约束条件的最少 PB 数量  $N_p^*$  的集合。

- ① 初始化  $N_p^* = \emptyset$
- ② while  $S(A, N_p^*) < S_{th}$  do
- ③ for each node  $k \in \Phi_p$
- ④ 计算备选节点的能量收集覆盖率并排序;
- ⑤ end for
- ⑥  $k^* = \operatorname{argmax}_{k \in \Phi_p} F(N_p^* \cup \{k\}) - F(N_p^*)$ ;
- ⑦  $N_p^* \leftarrow N_p^* \cup \{k^*\}$ ;
- ⑧ end while
- ⑨ return  $N_p^*$

为了分析评估上述贪心算法的性能, 给出以下定理。

**定理 2:** 通过贪心算法可获得  $(1 - \frac{1}{e})$  - approximation 趋近的近似解, 其中  $e$  为自然对数。

证明: 根据子模性最大问题 (SMP) 的证明, Nemhauser 等<sup>[28]</sup> 研究了一个非减子模函数的最大化问题, 得出以下结论:

当  $G(\emptyset) = 0$ , 子模性最大化问题为

$$\max_Z G(Z) \text{ s. t. } |Z| \leq K, \quad (13)$$

其中,  $G$  表示目标问题,  $Z$  是找到这个目标问题的最优解的值,  $K$  是一个有限集。

可得:

$$\frac{G(\text{greedy})}{G(\text{optimal})} \geq 1 - \left(\frac{K-1}{K}\right)^K, \quad (14)$$

其中,  $G(\text{greedy})$  表示通过贪心算法得到的解,  $G(\text{optimal})$  表示问题的最优解。

而对于本研究中的 ASE 增量函数  $F$ , 前面已经证明  $F(\emptyset) = 0$ , 且为单调增函数, 因此采用贪心算法得到的  $|N_p^{\text{greedy}}|$  个 PB 所带来的 ASE 增量与采用相同数量的 PB 带来的最大 ASE 增量满足下式:

$$\frac{F(N_p^{\text{greedy}})}{\max_{|N_p| = |N_p^{\text{greedy}}|} F(N_p)} \geq 1 - \left(\frac{|N_p^{\text{greedy}}| - 1}{|N_p^{\text{greedy}}|}\right)^{|N_p^{\text{greedy}}|} \geq 1 - \frac{1}{e}. \quad (15)$$

因此,证明了本研究所提的贪心算法保证能找到一个常数因子近似解。

### 3 数值仿真与性能分析

#### 3.1 实验环境与参数设置

实验仿真出于实际情况考虑,模拟了一个  $1\ 000\ \text{m} \times 1\ 000\ \text{m}$  区域内包含 200 个 UE 的场景。由于真实场景下通常不可能临时布置 PB,只能通过预置固定 PB,在满足区域频谱效率约束下,利用每个预置 PB 的开关完成对固定充电的 PB 的最佳选择部署。从真实场景进行考虑使得本研究所构建的边缘小单元网络模型更适应 5G 实际发展的需求,同时在此类真实场景的网络模型基础上讨论其频谱效率和能耗管理的权衡策略方案更为妥当。因此,本研究考虑将边缘小单元网络网格化,预置固定充电的 PB,并采用均匀分布,同时 PB 上配备开关,其中每两个候选 PB 之间间隔 100 m,当满足条件时则选取相应的 PB 作为部署。

前期已有学者通过研究论证采用 PB 为蜂窝用户提供上行传输能量及利用 mmWave 进行 UE 间信息交换的可行性<sup>[9,23,26]</sup>。本研究在此基础上考虑小单元内的 UE 通过 WPT 从 PB 收集能量,以便 UE 间可以采用 mmWave 进行信息传输的场景,从而实现在确保整个小单元能够维持正常边缘移动通信的前提下最小化系统能耗。因而,如无特殊说明,采用 Liu 等<sup>[9]</sup> 和 Zhou 等<sup>[23]</sup> 研究的 mmWave 信道和 WPT 参数作为本研究的仿真实验参数(表 1)。每个仿真实验值均为执行算法 100 次后生成的 100 个随机拓扑的平均值。

表 1 仿真实验参数设置

Table 1 Parameters setting of the simulation experiment

参数 Parameter	参数值 Parameter value
PBs transmit power	40 dBm
Energy conversion efficiency	0.8
Path-loss exponent of PB-UE link	3
Path-loss exponent of mmWave LOS	2
Path-loss exponent of mmWave NLOS	4
Energy harvesting threshold	-20 dBm
Additive White Gaussian Noise (AWGN)	-30 dBm
MmWave bandwidth	28 GHz

#### 3.2 算法的有效性

本小节对算法的有效性进行验证。图 3 给出了

采用本研究所提的贪心算法所获得的最少 PB 的图例。为了更好地显示 PB 的覆盖范围,用虚线圆圈表示每个 PB 所能覆盖的范围,圈内的点即为该 PB 所能服务的 UE,并将边界扩到  $1\ 500\ \text{m} \times 1\ 500\ \text{m}$ 。采用本研究算法,每次选择出最佳 PB,控制区域内预置的 PB 开关,直到此区域内所有用户都能进行通信。结果显示,每次都是从覆盖 UE 最多、能带来当前最大 ASE 增量的 PB 开始选择。从图 3 可以看到,对于 200 个 UE,选出 18 个 PB 就可以达到目标要求。

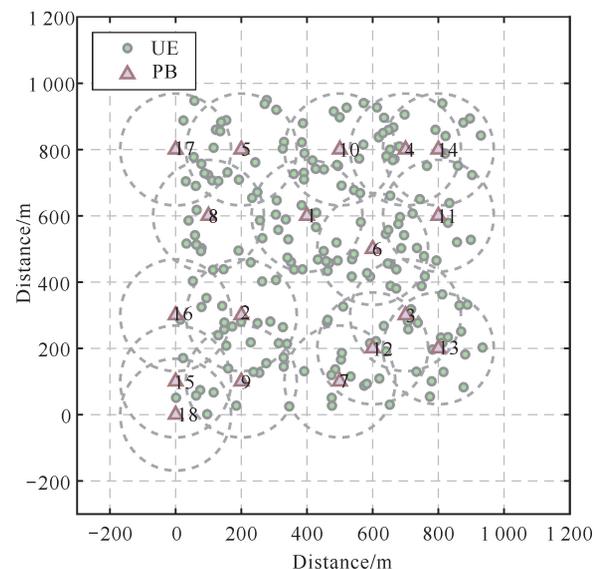


图 3 采用算法部署 PB 的实例

Fig. 3 Instance of PB deployment

为了评估算法的有效性,图 4 给出了在实验区域内随机分布 200 个 UE 的情况下,采用本研究的贪心算法部署不同发射功率的 PB 对系统 ASE 增量的影响。将  $P_p$  分别设置为 5、10、15、20 W,其原因如下:首先,此发射功率对于人体来说是安全的<sup>[29]</sup>;然后,当  $P_p$  很小时,则根据公式(1)在 UE 所能收集到的能量  $P_u$  小于激活阈值  $\gamma_{PT}$ ,不足以被激活进而参与后续的信息交换阶段;最后,本研究的目标是在满足区域频谱效率和能量覆盖率条件下最小化系统能耗,实现绿色通信,因此出于能耗管理策略方案的考虑,当发射功率超过 20 W 时,能耗会大大增加。从图 4 可以看出,随着  $|N_p|$  的增大,ASE 增加的速率逐渐减小,这很好地验证了定理 1 的正确性。另外,为了达到  $200\ \text{bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz} \cdot \text{km}^2)$  的 ASE,需要 5—20 W 的 PB 大致分别为 20、13、10、8 个。然而从能耗方面考虑,虽然布置 5 W 情况下所需 PB 的数量是 4 种情况下最多的,甚至是布置 20 W 情况下所需 PB 的 2.5 倍,但却节约了近 40% 的能耗。

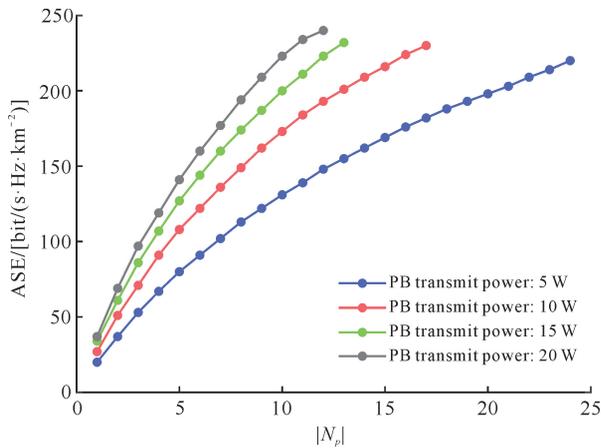
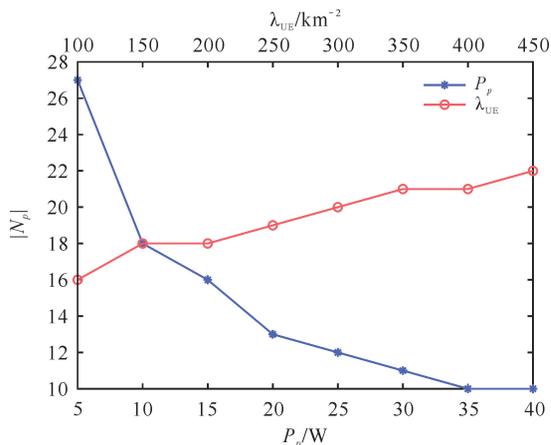


图4 PB发射功率对 ASE 增量影响

Fig. 4 Effect of different types of PB on ASE gains

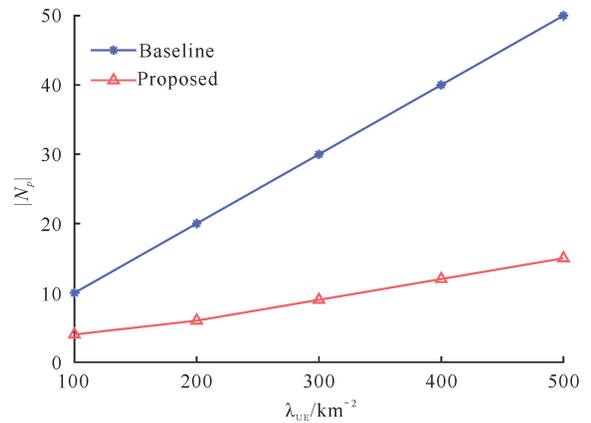
### 3.3 算法性能分析与对比

为了探讨各种参数对最小化工作 PB 数量的影响,实验模拟了在不同  $P_p$  和不同 UE 密度  $\lambda_{UE}$  (每平方千米内 UE 的数量)下,所要求最小工作的 PB 的数量  $|N_p|$ ,实验结果如图 5 所示。对于 200 个 UE,实验的  $P_p$  为 5—40 W,因为根据电气与电子工程师协会 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) 标准,人体暴露于该范围内的功率下是安全的<sup>[29]</sup>。从图 5 可看出,在安全发射功率范围内,工作 PB 的  $|N_p|$  一开始随着  $P_p$  的增大而急剧减小;随后当发射功率  $P_p > 20$  W 且区域内 UE 相对分散时,为达到 100% 能量覆盖率的约束条件,  $|N_p|$  受  $P_p$  的影响逐渐减小。而对固定  $P_p = 40$  dBW (10 W) 情况下,  $|N_p|$  虽然随  $\lambda_{UE}$  的增大而增大,但增幅相对平稳。这是因为当区域内 UE 越密集时,用尽可能少的 PB 就能完成区域内所有用户的能量覆盖。

图5  $P_p$  和  $\lambda_{UE}$  对部署 PB 的影响Fig. 5 Effect of  $P_p$  and  $\lambda_{UE}$  on the deployment of PB

为了比较分析本研究所提出方案的性能,采用 Zhou 等<sup>[23]</sup> 提出的部署方案作为对比。但是, Zhou

等<sup>[23]</sup> 提出的方案与本研究工作有所不同,该研究主要关注不同 PB 密度  $\lambda_{PB}$ 、 $P_p$ 、 $\gamma_{PT}$  对网络的能量覆盖率的影响,没有考虑系统能耗问题,故直接进行比较不合适。为此,本研究借鉴 Zhou 等<sup>[23]</sup> 的设计思想,设置了基准参考线,其中每个点表示在该文献中的参考  $\lambda_{UE}$  和能量覆盖率下,需要部署的 PB 数量。实验模拟是在相等  $\lambda_{UE}$  和能量覆盖率下,采用本研究算法所需的最小  $|N_p|$ 。对比结果如图 6 所示,可知为了达到与 Zhou 等<sup>[23]</sup> 相同的覆盖率,采用本研究方案可减少部署 30% 以上的 PB,从而大大减少系统能耗。

图6 不同覆盖率和  $\lambda_{UE}$  下部署 PB 个数对比Fig. 6 Comparison of the number of deployed PB under different coverage and  $\lambda_{UE}$ 

## 4 结论

本研究将能量收集技术应用于 5G 高低频混合组网蜂窝网络的边缘侧,构建一个不含传统宏基站 (BS)、只包含若干随机分布的 UE 和 PB 的蜂窝小单元新型网络模型,在该小单元中采用 PB 代替 BS,周期性地为小单元内的所有 UE 提供能量补给;提出了一个新型的 UE 之间协作配对策略,设计一个 BTO 模式的新型建链协议,将 mmWave 定向传输技术应用于该建链过程之中。基于所提模型和协议,在 ASE 和能量覆盖率联合约束下,提出最小化固定充电的 PB 数量的部署方案,从而在减少能耗的基础上保证该系统能够正常运行。针对该最优化问题是一个混合整数规划问题,被证明为 NP-难问题,提出一个常数因子的近似求解算法求解该最优化问题,并给出理论证明。仿真实验结果表明,本研究提出的算法在相同能量覆盖率情况下,可以减少部署 30% 的 PB,从而实现降低系统能耗的目的。

### 参考文献

[1] 李陶深,朱晴,王哲,等. 基于 5G 的无线携能通信技术

- 研究与发展[J]. 广西科学, 2021, 28(3): 229-241, 331.
- [2] CLERCKX B, ZHANG R, SCHOBER R, et al. Guest editorial wireless transmission of information and power: part II [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2019, 37(2): 249-252.
- [3] HUANG Y W, LIU Y, LI G Y. Energy efficiency of distributed antenna systems with wireless power transfer [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2019, 37(1): 89-99.
- [4] CHANG Z, WANG Z, GUO X, et al. Distributed resource allocation for energy efficiency in OFDMA multicell networks with wireless power transfer [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2019, 37(2): 345-356.
- [5] 周叶宁, 李陶深, 王哲, 等. 具有 SWIPT 和自能量回收的非分时全双工中继系统[J]. *计算机研究与发展*, 2020, 57(9): 1888-1897.
- [6] 李陶深, 施安妮, 王哲, 等. 基于 SWIPT 的吞吐量最优 NOMA 全双工中继选择策略[J]. *通信学报*, 2021, 42(5): 87-97.
- [7] LU X, WANG P, NIYATO D, et al. Wireless networks with RF energy harvesting: a contemporary survey [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, 17(2): 757-789.
- [8] WANG Z, DUAN L, ZHANG R. Adaptively directional wireless power transfer for large-scale sensor networks [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2016, 34(5): 1785-1800.
- [9] LIU Y, WANG L, ZAIDI S A R, et al. Secure D2D communication in large-scale cognitive cellular networks: a wireless power transfer model [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2016, 64(1): 329-342.
- [10] GUO J, DURRANI S, ZHOU X, et al. Outage probability of ad hoc networks with wireless information and power transfer [J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2015, 4(4): 409-412.
- [11] ZHAI D, ZHANG R, DU J, et al. Simultaneous wireless information and power transfer at 5G new frequencies: channel measurement and network design [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2019, 37(1): 171-186.
- [12] KHAN T A, ALKHATEEB A, HEATH R W. Millimeter wave energy harvesting [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(9): 6048-6062.
- [13] WANG L, WONG K K, HEATH R W, et al. Wireless powered dense cellular networks: how many small cells do we need? [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2017, 35(9): 2010-2024.
- [14] LIU C, LI M, COLLINGS I B, et al. Design and analysis of transmit beamforming for millimeter wave base station discovery [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(2): 797-811.
- [15] BARATI C N, HOSSEINI S A, MEZZAVILLA M, et al. Initial access in millimeter wave cellular systems [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(12): 7926-7940.
- [16] LIU C, LI M, HANLY S V, et al. Millimeter wave beam alignment: large deviations analysis and design insights [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2017, 35(7): 1619-1631.
- [17] LIU C, LI M, HANLY S V, et al. Millimeter-wave small cells: base station discovery, beam alignment, and system design challenges [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2018, 25(4): 40-46.
- [18] PSOMAS C, KRIKIDIS I. Energy beamforming in wireless powered mmWave sensor networks [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2019, 37(2): 424-438.
- [19] GIATSOGLOU N, NTONTIN K, KARTSAKLI E, et al. D2D-aware device caching in mmWave-cellular networks [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2017, 35(9): 2025-2037.
- [20] NIU Y, GAO C, LI Y, et al. Energy-efficient scheduling for mmWave backhauling of small cells in heterogeneous cellular networks [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(3): 2674-2687.
- [21] NIU Y, LIU Y, LI Y, et al. Device-to-device communications enabled energy efficient multicast scheduling in mmWave small cells [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2018, 66(3): 1093-1109.
- [22] KHAN T A, HEATH R W. Wireless power transfer in millimeter wave tactical networks [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2017, 24(9): 1284-1287.
- [23] ZHOU X, GUO J, DURRANI S, et al. Power beacon-assisted millimeter wave ad hoc networks [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2018, 66(2): 830-844.
- [24] KUANG Z, LIU G, LI G, et al. Energy efficient resource allocation algorithm in energy harvesting-based D2D heterogeneous networks [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(1): 557-567.
- [25] LEE K, HONG J P, SEO H, et al. Learning-based resource management in device-to-device communications with energy harvesting requirements [J]. *IEEE Trans-*

- actions on Communications, 2020, 68(1): 402-413.
- [26] HUANG K, LAU V K N. Enabling wireless power transfer in cellular networks: architecture, modeling and deployment [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(2): 902-912.
- [27] DI RENZO M, LU W, GUAN P. The intensity matching approach: a tractable stochastic geometry approximation to system-level analysis of cellular networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(9): 5963-5983.
- [28] NEMHAUSER G L, WOLSEY L A, FISHER M L. An analysis of approximations for maximizing submodular set functions: I [J]. Mathematical Programming, 1978, 14(1): 265-294.
- [29] XIA M, AISSA S. On the efficiency of far-field wireless power transfer [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2015, 63(11): 2835-2847.

---

## Optimization Deployed Strategy of Wireless Power Beacon Based on 5G Millimeter Wave Cooperative Communication Small Cell

LU Mingyu<sup>1,2,3</sup>, LI Taoshen<sup>1,2\*\*</sup>, LÜ Pin<sup>1</sup>

(1. School of Computer, Electronics and Information, Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004, China; 2. School of Information Engineering, Nanning University, Nanning, Guangxi, 530200, China; 3. School of Basic Medical Science, Guangxi Medical University, Nanning, Guangxi, 530021, China)

**Abstract:** In order to achieve the purpose of green communication with high spectral efficiency and low energy consumption in the fifth-generation mobile communication (5G) wireless network, the optimal deployment strategy of wireless Power Beacon (PB) based on mmWave cooperative communication small cell is studied experimentally. This strategy constructs a small cell network model of energy-constrained User Equipment Devices (UE) millimeter-wave cooperative communication in high and low frequency hybrid networks. By designing a new chain-building protocol with a “demand-selection-chain-building” mode, the communication millimeter-wave directional transmission technology is applied to the chain-building process. On the basis of this model, in order to improve the spectrum efficiency and energy collection coverage of the edge system, the normal operation of the system is ensured on the basis of minimizing the energy consumption of the system by minimizing the number of fixed charging energy beacons. The optimization problem is a Non-deterministic Polynomial Hard (NP-hard) problem with polynomial complexity of mixed integer programming. A greedy algorithm with constant factor is designed to solve the optimization problem approximately. Theoretical analysis proves the feasibility of the algorithm. The simulation results show that the proposed strategy can effectively optimize the PBs deployment, and the energy consumption is the lowest under the same coverage and regional spectrum efficiency gain.

**Key words:** Simultaneous Wireless Information and Power Transfer (SWIPT); mobile edge computing; communication between devices; task unicast; power splitting

责任编辑:米慧芝

---