

文章编号:1007-5321(2020)03-0024-08

DOI:10.13190/j.jbupt.2019-175

基于射频能量收集的无人机协助的分时段功率分配策略

刘志超, 赵宜升, 高锦程, 陈忠辉

(福州大学 福建省媒体信息智能处理与无线传输重点实验室, 福州 350108)

摘要: 针对毫微微基站(FBS)在不同时间段用户数量的差异,研究了最大化下行总信息量的功率分配问题. 不同时间段包含忙时和闲时2个阶段,忙时用户数量较多,闲时用户数量较少. 通过部署一个无人机携带的微微基站(PBS-UAV)为多个FBSs闲时的用户提供服务. FBS和PBS-UAV都具有能量收集功能. 在FBS忙时,FBS和PBS-UAV同时从宏基站收集能量,并且向用户发送数据. FBS闲时,由PBS-UAV接替多个FBSs,与用户进行下行通信. 将功率分配问题建模为最优化问题,以最大化FBS和PBS-UAV的下行信息量为目标,同时满足FBS和PBS-UAV能量消耗及发射功率的约束条件. 由于建立的最优化问题是凸优化问题,可通过引入增广拉格朗日乘子法获得最优解. 仿真结果表明,与PBS-UAV参与的等功率及部分功率固定的方法相比,所提出的方法在总信息量方面有一定程度的增加.

关键词: 能量收集; 功率分配; 无人机

中图分类号: TN915.65

文献标志码: A

UAV-Assisted Time Division Power Allocation Strategy Based on RF Energy Harvesting

LIU Zhi-chao, ZHAO Yi-sheng, GAO Jin-cheng, CHEN Zhong-hui

(Fujian Key Laboratory for Intelligent Processing and Wireless Transmission of Media Information, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Aiming at the difference of users in different time periods for the femto base station (FBS), the power allocation problem of maximizing the total downlink information is investigated. The different time periods include busy time and spare time. There are more users in the busy time and less users in the spare time. By deploying a pico base station carried by unmanned aerial vehicle (PBS-UAV), it provides services for users of multiple FBSs in spare time. Both the FBS and PBS-UAV have energy harvesting function. During the busy time, the FBS and PBS-UAV simultaneously harvest energy from the macro base station, and FBSs transmit data to users. During the spare time, multiple FBSs are replaced by the PBS-UAV to communicate with users in downlink. The power allocation problem is modeled as an optimization problem. The objective is to maximize the amount of downlink information of FBSs and PBS-UAV while satisfying the constraints of FBS and PBS-UAV energy consumption and transmission power. Because the formulated optimization problem is a convex optimization problem, the optimal solution is obtained by using an augmented Lagrange multiplier method. Simulations show that compared with the equal power

收稿日期: 2019-08-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(61871133, 61971139); 福建省自然科学基金项目(2018J01805)

作者简介: 刘志超(1995—), 男, 硕士生.

通信作者: 赵宜升(1984—), 男, 讲师, E-mail: zhaoyis@fzu.edu.cn.

method and partial fixed power method with PBS-UAV, the proposed method has an increase in terms of total information to different degrees.

Key words: energy harvesting; power allocation; unmanned aerial vehicle

射频能量收集是一种可以持续从环境电磁波收集能量的技术. 通信设备通过从环境电磁波收集能量获得电能, 是一种新兴的绿色环保供电方式^[1-2]. 然而, 这种供电方式存在着收集到的能量相对较少的缺点. 因此, 为了充分利用有限的能量, 研究射频能量收集通信系统的资源分配问题, 对于提升通信系统的性能具有重要意义.

能量收集通信系统的资源分配问题已经吸引了极大的研究兴趣. Zhao 等^[3]在具有环境射频能量收集功能的蜂窝网络中, 研究上行资源分配的问题, 在满足能耗和数据速率要求的同时, 最大化能量效率. Guo 等^[4]在移动无线传感器网络中, 中继节点通过从发射机接收射频信号来获取能量, 收集到的能量用于补偿中继节点数据转发所消耗的能量, 从而实现能量效率最大化. Luo 等^[5]在具有能量收集功能的设备到设备(D2D, device-to-device)的蜂窝网络中, 由收集的能量驱动的 D2D 设备可以复用蜂窝用户占用的频谱资源, 在系统可用能量和服务质量的约束下, 最大化蜂窝网络的总速率. Lohani 等^[6]在具有能量收集功能的异构无线网络中, 通过研究热点小区中微微基站的动态激活和功率分配来提高用户的平均吞吐量. Wang 等^[7]利用无人机(UAV, unmanned aerial vehicle)作为射频源, 为一组传输大量信息的 D2D 设备提供能量, 该 D2D 设备具有射频能量收集功能, 在满足 D2D 设备能耗的情况下, 最大化一个周期内的平均吞吐量. Yang 等^[8]在城市通信环境中, 针对具有能量收集功能的 UAV 中继系统, 研究 UAV 和地面接收端之间的信道衰落, 并对不同城市环境参数下的中断概率进行分析. Xie 等^[9]在无线能量通信网络中, 将 UAV 作为无线接入点, 使用射频能量传输为用户充电, 用户使用收集到的能量独立向 UAV 发送信息, UAV 飞行速度受到最大飞行速度的约束, 用户上行无线信息传输消耗的能量小于用户从 UAV 下行能量传输收集到的能量, 以最大化所有地面用户的上行吞吐量为目标. Pan 等^[10]在 UAV 作为次级用户的认知无线网络中, 次级用户需要通过频谱感知来确定是否传输数据, 对感知时间和次级传输功率进行了联合优化, 提高了认知无线电系统的能量效率. Hua 等^[11]针对

终端设备数据量大的问题, 引入 UAV 作为飞行基站处理终端设备迁移来的任务, 通过对 UAV 的功率、飞行轨迹以及终端的功率等进行联合优化, 以减少终端的能量消耗. Zhu 等^[12]在同步无线信息和功率传输系统中, 针对不完全的信道状态信息, 提出鲁棒的安全波束成形方案, 在受到用户保密率中断概率和能量收集器收集能量中断概率的约束下, 最小化发射功率. Chu 等^[13]研究多输入单输出保密信道的同步无线信息和功率传输, 设计出无人工噪声波束成形传输策略, 受到发射功率和能量收集的限制, 最大化传输保密率. Chu 等^[14]研究了一种全双工自能量回收的安全无线供电综合服务系统, 通过联合考虑能量波束成形、组播服务、保密单播服务和人造噪声, 设计最优输入协方差矩阵, 使保密组播速率区域(SMRR, secrecy-multicast rate region)在传输功率约束下达到最大化. 受 Lohani 等^[6]热点小区中的微微基站的动态激活的启发, 如果在热点区域部署一些毫微微基站(FBS, femto base station), 它们拥有类似动态激活的功能, 让其在繁忙时间工作, 空闲时间停止通信. 相比让这些 FBSs 一直持续工作, 能够显著减少能量消耗. 然而, FBSs 在闲时仍然具有少量用户. 如何保证在 FBSs 停止通信时仍能够为这些少量用户提供服务, 是亟待解决的问题. 传统的解决方法是将 FBSs 用户转移到宏基站(MBS, macro base station), 但 MBS 的通信资源通常比较紧张, 并且 FBSs 用户距离 MBS 相对较远, 会导致被转移的 FBSs 用户吞吐量下降. 受 UAV 参与组网的启发, 如果让 UAV 携带微微基站, 在 FBSs 停止通信时, 由 UAV 携带的微微基站(PBS-UAV, pico base station carried by UAV)接替 FBS, 就可以为部分 FBS 用户提供可靠的服务.

针对 FBSs 忙时用户数量较多和闲时用户数量较少的特点, 提出一种 UAV 协助的分时段最大化下行总信息量的功率分配策略. 通过引入一个具有能量收集功能的 PBS-UAV, 在用户数量较多的情况下, 多个 FBSs 工作. 在闲时用户数量较少的情况下, 由一个 PBS-UAV 接替多个 FBSs 工作. 相比让多个 FBSs 在闲时一直持续工作, 由一个 PBS-UAV 接替多个 FBSs 工作能够显著减少能量消耗. 在 FB-

Ss 忙时, FBSs 和 PBS-UAV 都从 MBS 收集能量, 并且 FBSs 与用户进行下行通信. 在 FBS 闲时, FBSs 停止与用户通信, 由 PBS-UAV 为多个 FBSs 用户提供通信服务. 此时, PBS-UAV 距离 FBSs 较近, 从 FBSs 收集能量, 可以充分利用 FBSs 的剩余能量. 同时, PBS-UAV 距离 MBS 相对较远 (不同于 FBSs 忙时的情况, PBS-UAV 可以飞行到距离 MBS 较近的位置, 进行能量收集), 没有考虑从 MBS 收集能量. 将功率分配问题建立成一个最优化问题, 以最大化下行总信息量为目标, 同时满足 PBS-UAV 和 FBS 的能量消耗和发射功率的约束条件. 该最优化问题为一个凸优化问题, 通过采用增广拉格朗日乘子法获得最优解. 最后, 通过仿真对提出的功率分配策略进行性能评估.

1 系统模型

1.1 网络结构

分时段网络结构 (见图 1) 分为忙时 T_1 和闲时 T_2 两个阶段, 假设有 1 个 MBS、1 个 PBS-UAV 和 N 个 FBSs. 在忙时 T_1 时间段内, FBSs 和 PBS-UAV 同时从 MBS 收集能量, FBS 工作并向用户发送下行数据, PBS-UAV 仅仅收集储存能量. 在闲时 T_2 时间段内, PBS-UAV 以自身覆盖范围更大的优势接替 FB-

Ss, 并向用户发送下行数据. 同时, FBSs 将 T_1 阶段的剩余能量以一定的转化率转移给 PBS-UAV, 用于完成 T_2 阶段的通信任务.

需要注意, 通信过程包括下行和上行 2 个阶段. 在下行通信阶段, FBSs 和 PBS-UAV 向用户发送信号, 会消耗一定的能量. 在上行通信阶段, FBSs 和 PBS-UAV 接收用户的信号, 也会消耗一定的能量. 由于笔者考虑的是下行总信息量最大化, 在网络结构图中只画出了 FBS 和 PBS-UAV 的下行通信链路, 但能量消耗也包括上行通信的能量消耗.

1.2 基站能量收集和消耗模型

假设一个完整的工作周期为 T , 分为忙时 T_1 和闲时 T_2 两个阶段, 忙时 T_1 阶段用户数量多, 闲时 T_2 阶段用户数量少. T_1 阶段多个 FBSs 和 PBS-UAV 分别从 MBS 收集能量, MBS 的发射功率为 P_{M1} .

考虑 1 个 FBS 在 T_1 时间段内从 MBS 收集到的能量为^[1]

$$E_{F1} = T_1 \eta P_{M1} |G_{MF}|^2 \quad (1)$$

其中: η 为 FBS 从 MBS 接收能量时的能量转换效率, G_{MF} 为 MBS 到 FBS 的信道增益.

在 T_1 时间段内, PBS-UAV 飞行到适宜区域进行能量收集, 收集到的能量减去飞行所消耗的能量, 剩余存储的能量为

$$E_{P1} = E_{U0} + \zeta \gamma T_1 P_{M1} |G_{MP}|^2 - (1 - \gamma) T_1 P_{UF} - \gamma T_1 P_{UH} \quad (2)$$

其中: E_{U0} 为 PBS-UAV 的初始能量, ζ 为 PBS-UAV 携带的能量收集器从 MBS 收集能量的能量转化效率, γ 为 PBS-UAV 收集能量的时间比例, G_{MP} 为 MBS 到 PBS-UAV 的信道增益, $1 - \gamma$ 为 PBS-UAV 飞行的时间比例, P_{UF} 为 PBS-UAV 飞行过程中消耗的功率, P_{UH} 为 PBS-UAV 悬停过程中消耗的功率, 悬停时间等于收集能量的时间.

此外, FBS 收集能量的同时向用户发送信息. 考虑 FBS 的电路、发射信号和接收信号的能量消耗, 得到 1 个 FBS 的能量消耗为

$$E_F = \sum_{i=1}^I P_i^{FT} \mu T_1 + P_{FR} (1 - \mu) T_1 + P_{CF} T_1 \quad (3)$$

其中: I 为 1 个 FBS 覆盖范围下的用户数量, P_i^{FT} 为 FBS 到第 i ($i = 1, 2, \dots, I$) 个用户的发射功率, μ 为 FBS 在 T_1 内下行发送信号的时间比例, $1 - \mu$ 为 FBS 在 T_1 内接收信号的时间比例, P_{FR} 是 FBS 接收信号的功率消耗, P_{CF} 为 FBS 电路的功率消耗.

对于 PBS-UAV, 在 T_2 时间段内开始向用户发

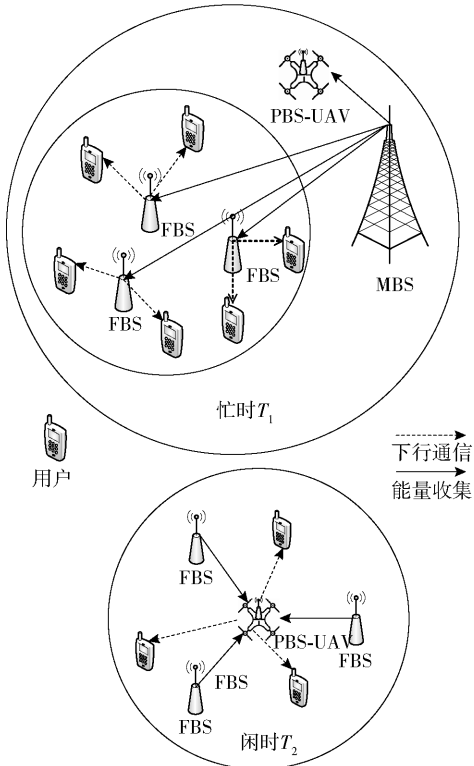


图1 分时段网络结构

送下行数据,考虑 PBS-UAV 的电路、发射信号和接收信号的能量消耗,得到 1 个 PBS-UAV 的能量消耗为

$$E_p = \sum_{j=1}^J P_j^{\text{PT}} \xi T_2 + P_{\text{PR}} (1 - \xi) T_2 + P_{\text{CP}} T_2 \quad (4)$$

其中: J 为 PBS-UAV 覆盖范围下的用户数量, P_j^{PT} 为 PBS-UAV 到第 $j(j=1,2,\dots,J)$ 个用户的发射功率, ξ 为 T_2 时间段内 PBS-UAV 下行发送信号的时间比例, $1-\xi$ 为 T_2 时间段内 PBS-UAV 接收信号的时间比例, P_{PR} 为 PBS-UAV 接收信号的功率消耗, P_{CP} 为 PBS-UAV 电路的功率消耗。

2 问题建模和求解

2.1 问题建模

针对第 1 节的系统模型,提出一种下行总信息量最大化的功率分配策略。假设 N 个 FBSs 覆盖范围内的用户数量、 N 个 FBSs 与 MBS 的距离都一致,从而简化下行吞吐量公式的复杂度。在 FBSs 数量、位置以及用户数量位置不一致的情况下,位置的改变会导致 FBS 到用户的信道增益和噪声功率产生变化,该变化最终会对最后的求解结果造成影响,但对问题本身的建模不会造成影响。仅在理想的情况,考虑其中一个 FBS 即可。可以得到在 T_1 时间段内 1 个 FBS 的下行总吞吐量为

$$R_F = \sum_{i=1}^I B_i \lg \left(1 + \frac{P_i^{\text{FT}} |G_i^{\text{FU}}|^2}{N_0} \right) \quad (5)$$

其中: B_i 为信道带宽, G_i^{FU} 为 FBS 到第 $i(i=1,2,\dots,I)$ 个用户的信道增益, N_0 为噪声功率。

在 T_2 阶段,PBS-UAV 接替 FBS 工作。该阶段用户数量较少,PBS-UAV 覆盖 N 个 FBSs 的工作区域,完成和用户间的通信。在 T_2 阶段,PBS-UAV 到用户的下行总吞吐量为

$$R_p = \sum_{j=1}^J B_j \lg \left(1 + \frac{P_j^{\text{PT}} |G_j^{\text{PU}}|^2}{N_1} \right) \quad (6)$$

其中: B_j 为带宽, G_j^{PU} 为 PBS-UAV 到第 $j(j=1,2,\dots,J)$ 个用户的信道增益, N_1 为噪声功率。

需要注意,在 T_1 时间段内,由 FBS 向用户发送信号,噪声功率为 N_0 。在 T_2 时间段内,由 PBS-UAV 向用户发送信号,噪声功率为 N_1 。由于 T_1 和 T_2 时间段内,基站所处的位置和用户数量都发生了改变,所以噪声功率不相等。

功率分配策略的目标是最大化 T_1 和 T_2 总时间段内的下行信息量,同时受到一些约束条件的限制。

该问题是一个最优化问题,可以建模为

$$\text{maximize } H = \mu N T_1 R_F + \xi T_2 R_p \quad (7a)$$

$$\text{s. t. } E_F \leq \tau E_{F1} \quad (7b)$$

$$E_p \leq E_{p1} + (1 - \tau) N \theta E_{F1} \quad (7c)$$

$$0 < P_i^{\text{FT}} \leq P_{\text{max}}^F \quad (7d)$$

$$0 < P_j^{\text{PT}} \leq P_{\text{max}}^P \quad (7e)$$

其中: τ 表示在 T_1 时间段内 FBS 消耗能量的比例, θ 为 FBS 的剩余能量转移给 PBS-UAV 的能量转化效率。约束条件式 (7b) 和式 (7c) 保证 FBS 和 PBS-UAV 消耗的总能量不超过剩余总能量上限,约束条件式 (7d) 和式 (7e) 表示 FBS 和 PBS-UAV 的发射功率不超过最高功率上限 P_{max}^F 和 P_{max}^P ,且大于 0。

对于上述问题,可以转化为求最小值问题,即

$$\text{minimize } -H = -\mu N T_1 R_F - \xi T_2 R_p \quad (8a)$$

$$\text{s. t. } E_F \leq \tau E_{F1} \quad (8b)$$

$$E_p \leq E_{p1} + (1 - \tau) N \theta E_{F1} \quad (8c)$$

$$0 < P_i^{\text{FT}} \leq P_{\text{max}}^F \quad (8d)$$

$$0 < P_j^{\text{PT}} \leq P_{\text{max}}^P \quad (8e)$$

2.2 最优解

式(8)的目标函数由 2 个对数函数及常量的乘积做加法,这 2 个对数函数为凸函数。由于若干个凸函数相加或相减仍然是凸函数,同时凸函数与常数相乘不改变凸性质,所以式(8)的目标函数是凸函数。此外,式(8)的约束条件也是关于自变量的凸函数。因此,式(8)为凸优化^[15]问题。可以采用增广拉格朗日乘子法求解。为了表示方便,令

$$A = P_{\text{FR}} (1 - \mu) T_1 + P_{\text{CF}} T_1 \quad (9a)$$

$$B = P_{\text{PR}} (1 - \xi) T_2 + P_{\text{CP}} T_2 \quad (9b)$$

将式(9a)和式(9b)代入式(8a)和式(8b),并进行化简,可以得到

$$\begin{aligned} \text{minimize}_{P_i^{\text{FT}}, P_j^{\text{PT}}} & -\mu N T_1 B_1 \sum_{i=1}^I \lg \left(1 + \frac{P_i^{\text{FT}} |G_i^{\text{FU}}|^2}{N_0} \right) - \\ & \xi T_2 B_2 \sum_{j=1}^J \lg \left(1 + \frac{P_j^{\text{PT}} |G_j^{\text{PU}}|^2}{N_1} \right) \end{aligned} \quad (10a)$$

$$\text{s. t. } \tau E_{F1} - \sum_{i=1}^I P_i^{\text{FT}} \mu T_1 - A \geq 0 \quad (10b)$$

$$E_{p1} + (1 - \tau) N \theta E_{F1} - B - \sum_{j=1}^J P_j^{\text{PT}} \xi T_2 \geq 0 \quad (10c)$$

$$P_{\text{max}}^F - P_i^{\text{FT}} \geq 0 \quad (10d)$$

$$P_{\text{max}}^P - P_j^{\text{PT}} \geq 0 \quad (10e)$$

此外, $\mathbf{P}_{\text{FT}} = [P_1^{\text{FT}}, P_2^{\text{FT}}, \dots, P_I^{\text{FT}}]$ 和 $\mathbf{P}_{\text{PT}} = [P_1^{\text{PT}}, P_2^{\text{PT}}, \dots,$

P_j^{PT}] 为 2 个向量, 并假设

$$f_0(\mathbf{P}_{\text{FT}}, \mathbf{P}_{\text{PT}}) = -\mu N T_1 B_1 \sum_{i=1}^I \text{lb} \left(1 + \frac{P_i^{\text{FT}} |G_i^{\text{FU}}|^2}{N_0} \right) - \xi T_2 B_2 \sum_{j=1}^J \text{lb} \left(1 + \frac{P_j^{\text{PT}} |G_j^{\text{PU}}|^2}{N_1} \right) \quad (11a)$$

$$f_1(\mathbf{P}_{\text{FT}}) = \tau E_{\text{F1}} - \sum_{i=1}^I P_i^{\text{FT}} \mu T_1 - A \quad (11b)$$

$$f_2(\mathbf{P}_{\text{PT}}) = E_{\text{P1}} + (1 - \tau) N \theta E_{\text{F1}} - B - \sum_{j=1}^J P_j^{\text{PT}} \xi T_2 \quad (11c)$$

$$f_{3,i}(P_i^{\text{FT}}) = P_{\text{max}}^{\text{F}} - P_i^{\text{FT}} \quad (11d)$$

$$f_{4,j}(P_j^{\text{PT}}) = P_{\text{max}}^{\text{P}} - P_j^{\text{PT}} \quad (11e)$$

式(11d)中, $i=1, 2, \dots, I$. 式(11e)中, $j=1, 2, \dots, J$. 可以把问题(10)转化为

$$\text{minimize}_{\mathbf{P}_{\text{FT}}, \mathbf{P}_{\text{PT}}} f_0(\mathbf{P}_{\text{FT}}, \mathbf{P}_{\text{PT}}) \quad (12a)$$

$$\text{s. t. } f_1(\mathbf{P}_{\text{FT}}) \geq 0 \quad (12b)$$

$$f_2(\mathbf{P}_{\text{PT}}) \geq 0 \quad (12c)$$

$$f_{3,i}(P_i^{\text{FT}}) \geq 0 \quad (12d)$$

$$f_{4,j}(P_j^{\text{PT}}) \geq 0 \quad (12e)$$

对于上述凸优化问题, 可以得到关于式(12)的增广拉格朗日函数为^[16]

$$\varphi(\mathbf{P}_{\text{FT}}, \mathbf{P}_{\text{PT}}, \boldsymbol{\omega}, \lambda) = f_0(\mathbf{P}_{\text{FT}}, \mathbf{P}_{\text{PT}}) +$$

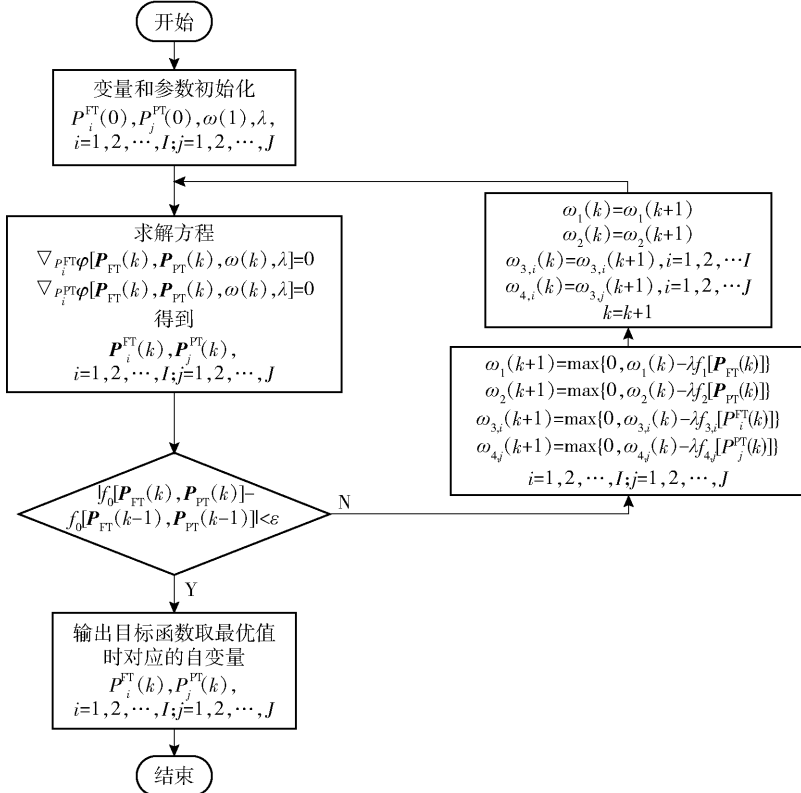


图 2 增广拉格朗日乘子法流程

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2\lambda} \sum_{i=1}^I (\{\max[0, \omega_1 - \lambda f_1(\mathbf{P}_{\text{FT}})]\}^2 - \omega_1^2) + \\ & \frac{1}{2\lambda} \sum_{j=1}^J (\{\max[0, \omega_2 - \lambda f_2(\mathbf{P}_{\text{PT}})]\}^2 - \omega_2^2) + \\ & \frac{1}{2\lambda} \sum_{i=1}^I (\{\max[0, \omega_{3,i} - \lambda f_{3,i}(P_i^{\text{FT}})]\}^2 - \omega_{3,i}^2) + \\ & \frac{1}{2\lambda} \sum_{j=1}^J (\{\max[0, \omega_{4,j} - \lambda f_{4,j}(P_j^{\text{PT}})]\}^2 - \omega_{4,j}^2) \end{aligned} \quad (13)$$

其中: $\boldsymbol{\omega} = [\omega_1, \omega_2, \omega_{3,1}, \omega_{3,2}, \dots, \omega_{3,I}, \omega_{4,1}, \omega_{4,2}, \dots, \omega_{4,J}]$ 为一个向量, λ 为惩罚因子, $\omega_1, \omega_2, \omega_{3,i}$ 和 $\omega_{4,j}$ 对应于 $f_1(\mathbf{P}_{\text{FT}}), f_2(\mathbf{P}_{\text{PT}}), f_{3,i}(P_i^{\text{FT}})$ 和 $f_{4,j}(P_j^{\text{PT}})$ 的乘子. 通过增广拉格朗日乘子法将式(12)中的不等式约束的凸优化问题转化成求解无约束问题:

$$\text{minimize}_{\mathbf{P}_{\text{FT}}, \mathbf{P}_{\text{PT}}} \varphi(\mathbf{P}_{\text{FT}}, \mathbf{P}_{\text{PT}}, \boldsymbol{\omega}, \lambda) \quad (14)$$

求解问题(14)的算法流程如图 2 所示. 在图 2 中, $\mathbf{P}_{\text{FT}}(k), \mathbf{P}_{\text{PT}}(k)$ 和 $\boldsymbol{\omega}(k)$ 为第 k 次迭代运算时对应的取值, ε 为算法迭代停止时目标函数下降精度.

通过图 2 所示的算法流程, 最终可以得到问题(14)的最优解, 从而确定 FBS 和 PBS-UAV 到用户的发射功率, 使得 FBS 和 PBS-UAV 在 T_1 和 T_2 总时间内到用户的下行信息量达到最大.

3 性能评估

通过仿真对前文所提出的功率分配策略进行性能评估。在仿真中,假设忙时 T_1 阶段每个 FBS 服务 $I=2$ 个用户,闲时 T_2 阶段有 $J=5$ 个用户,即 PBS-UAV 同时对 5 个用户进行服务。在仿真中,使用服从均匀分布的随机数产生下行信道增益。其他相关参数设置为 $T_1 = 100$ s, $T_2 = 100$ s, $N = 5$, $P_{M1} = 43$ dBm^[17], $G_{MF} = 0.7$, $\gamma = 0.7$, $\zeta = 0.7$, $G_{MP} = 0.8$, $E_{U0} = 380$ J, $P_{UF} = 5$ W, $P_{UH} = 1$ W, $\mu = 0.87$, $\xi = 0.92$, $P_{FR} = P_{PR} = 5 \times 10^{-7}$ W, $P_{CF} = P_{CP} = 5 \times 10^{-7}$ W, $B_1 = B_2 = 15$ kHz, $N_0 = -40$ dBm, $N_1 = -30$ dBm, $P_{\max}^F = 2$ W, $P_{\max}^P = 5$ W, $\tau = 0.5$ 和 $\theta = 0.67$ 。

在仿真中,对提出方法和其他方法性能进行对比。其他方法包括:有 PBS-UAV 的等功率方法(EP-PU, equal power method with PBS-UAV);有 PBS-UAV 的忙时固定功率方法(BFP-PU, busy time fixed power method with PBS-UAV);有 PBS-UAV 的闲时固定功率方法(SFP-PU, spare time fixed power method with PBS-UAV)。EP-PU 是指在 PBS-UAV 参与的情况下, FBS 和 PBS-UAV 分别在忙时 T_1 和闲时 T_2 阶段将可用的发射功率进行平均分配; BFP-PU 指的是在 PBS-UAV 参与的情况下,在繁忙时间段 T_1 , FBS 采用固定功率方式发送数据,固定功率值设定为 0.844 8 W,它取自提出方法在 $\eta = 0.3$ 时 FBS 的发射功率。在闲时 T_2 阶段,使用增广拉格朗日乘法进行求解; SFP-PU 指的是在 PBS-UAV 参与的情况下,在空闲时间段 T_2 , PBS-UAV 采用固定功率方式发送数据,固定功率值设定为 1.877 9 W,它取自提出方法在 $\eta = 0.3$ 时 PBS-UAV 的发射功率。在忙时 T_1 阶段,使用增广拉格朗日乘法进行求解。

图 3 所示为不同方法时下行总信息量和 FBS 能量收集效率 η 之间的关系。从图中可以看出,随着 η 的提高,5 种方法得到的下行总信息量都有所提高。其中,从 $\eta = 0.42$ 时开始,提出方法优于 EP-PU 方法,这是因为受到 FBS 发射功率上限的影响,在忙时 T_1 阶段存在一部分未被使用的剩余能量,笔者提出的方法可以将这部分剩余能量更有效地利用起来,从而提高下行总信息量。此外,笔者提出的方法始终优于 BFP-PU 和 SFP-PU。这是因为,相较于部分功率固定的方式,笔者提出的方法能够充分使用可用功率,从而使总的下行信息量得以提升。同时, SFP-PU 优于 BFP-PU。这是因为,虽然两种方法

都采用了固定功率的方式,但固定功率的时间段却不同,从 2 种方法在图中对应的曲线可以看出,忙时 T_1 固定 FBS 的发射功率比闲时 T_2 固定 PBS-UAV 的发射功率对总的下行信息量影响更为显著。

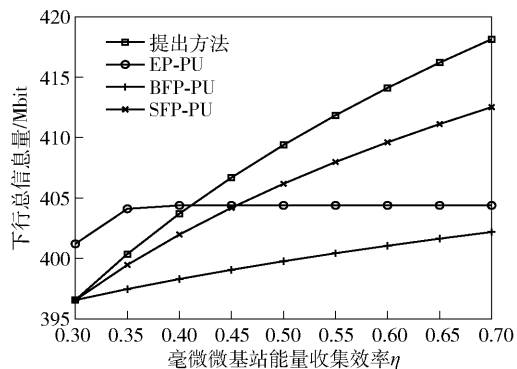


图3 不同方法时下行总信息量和 η 的关系

图 4 所示为所提出的方法在不同 PBS-UAV 能量收集效率 ζ 的情况下, T_1 和 T_2 阶段下行总信息量和 FBS 能量收集效率 η 之间的关系。可以看出,对于相同的 η ,当 ζ 的取值越大,下行总信息量越大。原因在于,在 FBS 能量收集效率一定的情况下, ζ 取值越大,提供给 PBS-UAV 在 T_2 阶段所能使用的功率越大,下行总信息量相应增加。

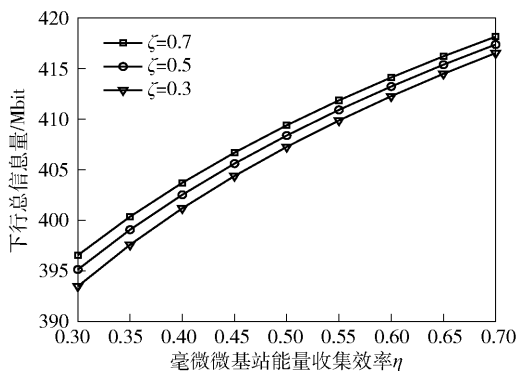


图4 不同 ζ 时下行总信息量和 η 的关系

图 5 所示为所提出的方法在不同 PBS-UAV 能量收集效率 ζ 的情况下, T_1 和 T_2 阶段下行总信息量和 FBS 数量之间的关系。从图中可以看出,在 ζ 一定的情况下,随着 FBS 的数量从 3 个增加到 5 个, T_1 和 T_2 阶段下行总信息量略微提升。原因分析如下:从仿真参数设置来看,在忙时 T_1 时间段,3 个 FBSs 共有 6 个用户(每个 FBS 有 2 个用户),5 个 FBSs 共有 10 个用户。在闲时 T_2 时间段,无论是 3 个 FBSs,还是 5 个 FBSs,总用户数量都是 5 个。因此,3 个 FBSs 和 5 个 FBSs 情况下整个忙时和闲时的用户数

量差异不大,导致总信息量略微增加. 如果 FBSs 数量更多,总信息量差异会更明显. 此外,在 FBS 数量一定的情况下,改变 ζ ,对 T_1 和 T_2 阶段下行总信息量有显著影响. 这是因为,当 FBS 数量一定时, ζ 增大,会增加 PBS-UAV 收集到的能量,使下行总信息量增大.

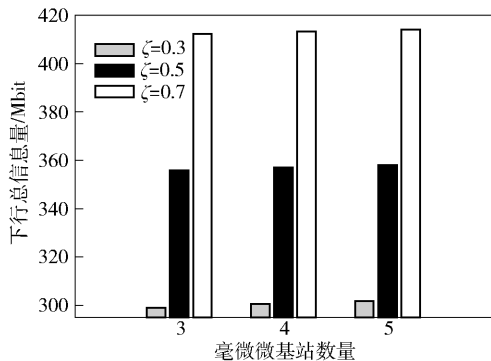


图 5 不同 ζ 时下行总信息量和 FBS 数量的关系

图 6 所示为所提出的方法在不同的 PBS-UAV 能量收集效率 ζ 的情况下,下行总信息量和 FBS 剩余能量转移给 PBS-UAV 的能量转化效率 θ 之间的关系. 当 ζ 取值一定时,随着 θ 取值增大,PBS-UAV 可用的能量增加,PBS-UAV 的功率随之增大,下行总信息量增大. 然而,在 θ 取值增大的同时,不同 ζ 取值之间的下行总信息量之间的差值在逐渐缩小. 这是因为当 θ 取值和 ζ 取值同时增大时, θ 相较于 ζ 会对总的下行信息量产生更大的影响.

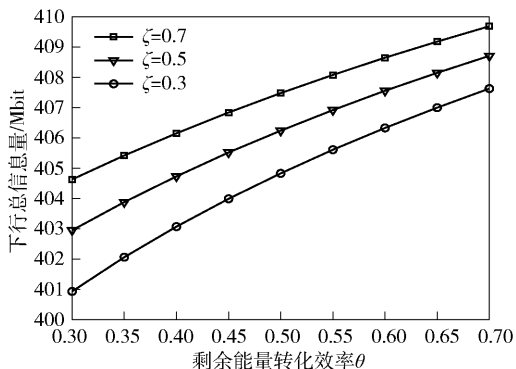


图 6 不同 ζ 时下行总信息量和 θ 的关系

4 结束语

针对 FBS 在忙时和闲时存在用户数量的差异,提出了一种 UAV 协助的分时段最大化下行总信息量的功率分配策略. 通过部署一个具有能量收集功能的 PBS-UAV,与多个 FBSs 闲时的用户进行通信.

当 FBS 忙时,FBS 和 PBS-UAV 同时从 MBS 收集能量,并且 FBS 向用户发送数据. 当 FBS 闲时,PBS-UAV 接替 FBS 的工作,与用户进行下行通信. 在保证 PBS-UAV 和 FBS 的能量消耗和发射功率的前提下,以最大化下行总信息量为目标,通过增广拉格朗日乘法获得最优解. 仿真结果显示,与 PBS-UAV 参与的等功率及部分功率固定的方法相比,提出的方法在下行总信息量方面有不同程度的增加. 由于假设每个 FBS 具有相同的用户数量,并且数量较少,未来将考虑更多的用户以及不同的 FBSs 用户数量的差异,充分调动 PBS-UAV 可移动性的优势,从提高能量效率的角度来进行进一步研究.

参考文献:

- [1] Lu Xiao, Wang Ping, Niyato D, et al. Wireless networks with RF energy harvesting: a contemporary survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(2): 757-789.
- [2] Ku M L, Li Wei, Chen Yan, et al. Advances in energy harvesting communications: past, present, and future challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(2): 1384-1412.
- [3] Zhao Yisheng, Leung V C M, Sun Xinghua, et al. Energy-efficient resource allocation in cellular network with ambient RF energy harvesting[C] //2017 Wireless Communications & Networking Conference (WCNC). San Francisco: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [4] Guo Songtao, Shi Yawei, Yang Yuanyuan, et al. Energy efficiency maximization in mobile wireless energy harvesting sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2018, 17(7): 1524-1537.
- [5] Luo Ying, Hong Peilin, Su Ruolin, et al. Resource allocation for energy harvesting-powered D2D communication underlaying cellular networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(11): 10486-10498.
- [6] Lohani S, Hossain 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.
- [7] Wang Haichao, Wang Jinlong, Ding Guoru, et al. Resource allocation for energy harvesting-powered D2D communication underlaying UAV-assisted networks[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2018, 2(1): 14-24.
- [8] Yang Liang, Chen Jianchao, Hasna M O, et al. Outage performance of UAV-assisted relaying systems with RF

- energy harvesting [J]. IEEE Communications Letters, 2018, 22(12): 2471-2474.
- [9] Xie Lifeng, Xu Jie, Zhang Rui. Throughput maximization for UAV-enabled wireless powered communication networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(2): 1690-1703.
- [10] Pan Yu, Da Xinyu, Hu Hang, et al. Energy-efficiency optimization of UAV-based cognitive radio system[J]. IEEE Access, 2019, 7: 155381-155391.
- [11] Hua Meng, Wang Yi, Li Chunguo, et al. UAV-aided mobile edge computing systems with one by one access scheme[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2019, 3(3): 664-678.
- [12] Zhu Zhengyu, Chu Zheng, Wang Zhongyong, et al. Outage constrained robust beamforming for secure broadcasting systems with energy harvesting[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(11): 7610-7620.
- [13] Chu Zheng, Zhu Zhengyu, Johnston M, et al. Simultaneous wireless information power transfer for MISO secrecy channel [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(9): 6913-6925.
- [14] Chu Zheng, Zhou Fuhui, Xiao Pei, et al. Resource allocation for secure wireless powered integrated multicast and unicast services with full duplex self-energy recycling[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(1): 620-636.
- [15] Boyd S, Vandenberghe L. Convex optimization [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- [16] 陈宝林. 最优化理论与算法[M]. 第2版. 北京: 清华大学出版社, 1989: 405-413.
- [17] Zhao Yisheng, Leung V C M, Zhu Chunsheng, et al. Energy-efficient sub-carrier and power allocation in cloud-based cellular network with ambient RF energy harvesting[J]. IEEE Access, 2017, 5: 1340-1352.

(上接第18页)

- [7] Zhou Yilin, Chen Yanyu, Xie Qi, et al. Modeling research of electrochemical migration failure on printed circuit board[C]//Prognostics and System Health Management Conference. Chongqing: [s. n.], 2018: 26-28.
- [8] Tremblay G, Legendre P, Jean François Doyon, et al. The use of polynomial regression analysis with indicator variables for interpretation of mercury in fish data[J]. Biogeochemistry, 1998, 40(2/3): 189-201.
- [9] Zhou Sanyu. An exact method for the multiple comparison of several polynomial regression models with applications in dose-response study [J]. Advances in Statistical Analysis, 2018, 102(3): 413-429.
- [10] 谢琪. 尘土中可溶性盐导致高密度电路板电化学迁移失效的建模研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2018.
- [11] Wu Dazhong, Connor Jennings, Janis Terpeny, et al. A comparative study on machine learning algorithms for smart manufacturing: tool wear prediction using random forests[J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 2017, 139(7): 071018-1 - 071018-9.
- [12] Wang Jidong, Li Peng, Ran Ran, et al. A short-term photovoltaic power prediction model based on the gradient boost decision tree[J]. Applied Sciences, 2018, 8(5): 689-702.
- [13] IPC. Electrochemical migration resistance test: IPC TM-650 2.6.14.1-2000[S]. [S.l.]: US-IPC, 2000.
- [14] Zhao Yanchang. R语言与数据挖掘最佳实践和经典案例[M]. 陈健, 黄琰, 译. 北京: 机械工业出版社, 2014: 267-289.
- [15] 李航. 统计学习方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012: 151-152.
- [16] 谢晓龙. 航空发动机性能评价与衰退预测方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.