

doi:10.19665/j.issn1001-2400.2021.06.014

面向多无人机携能网络的轨迹与资源规划算法

田霖¹, 苏智杰², 冯婉媚², 陈真², 唐杰², 周恩丞³

(1. 中国南方电网有限责任公司 超高压输电公司广州局, 广东 广州 510405;

2. 华南理工大学 电子与信息学院, 广东 广州 510641;

3. 中国科学院大学 经济与管理学院, 北京 100190)

摘要: 无人机无线携能通信技术可以实现无线信息与能量同时传输, 为能量及频谱资源匮乏地区中的节点提供持续的能量来源, 以解决物联网节点能量受限问题。而多无人机协同工作更能提高整体工作效率以及传输性能, 因此, 针对无人机无线携能通信网络, 构建了一种多无人机的飞行轨迹规划, 能量和信号发射功率分配以及用户调度的联合优化方案。该方案在满足用户最低能量采集约束下最大化最小用户可达速率。由于优化变量间的耦合性以及约束条件的非凸性, 所建立的优化问题难以直接求解。因此, 提出了一种基于块坐标下降法和连续凸优化技术的优化算法, 通过不断迭代求解的方式依次优化无人机的轨迹、功率分配及用户调度, 以获得高效的次优解。此外, 对于无人机轨迹规划及功率分配中的非凸约束条件, 采用连续凸优化算法, 并通过一阶泰勒展开作为优化问题及约束的上界或下界, 将原有的非凸问题转化为凸问题以进行求解。仿真结果表明, 提出的算法收敛性良好, 多无人机分布均匀, 并可有效提高用户的可达速率。

关键词: 无线携能通信; 无人机通信; 轨迹规划; 资源分配

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2400(2021)06-0115-08

Trajectory and resource allocation for multi-UAV enabled swipt systems

TIAN Lin¹, SU Zhijie², FENG Wanmei², CHEN Zhen², TANG Jie², ZHOU Encheng³

(1. Guangzhou Bureau, CSG EHV Power Transmission Company, Guangzhou 510405, China;

2. School of Electronics and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

3. School of Economics and Management, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: This paper considers a multi-unmanned aerial vehicles (UAVs) enabled simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT) system, where a UAV acts as a flying base station (BS) and delivers information and energy to users located in rural and geographically constrained areas. We aim to maximize the minimum achievable rate of users by optimizing the user association, UAV trajectory and power allocation subject to the minimum energy storage capacity requirement. However, this problem is a mixed-integer non-convex optimization problem, and cannot be solved directly. To tackle this problem, we propose an iterative algorithm based on the block coordinate descent, where the user association, UAV

收稿日期: 2020-07-31

网络出版时间: 2021-10-14

基金项目: 国家自然科学基金(61971194)

作者简介: 田霖(1986—), 男, 高级工程师, E-mail: tlss2000@139.com

苏智杰(1997—), 男, 华南理工大学硕士研究生, E-mail: 201921011697@mail.scut.edu.cn

冯婉媚(1992—), 女, 华南理工大学博士研究生, E-mail: eewmfeng@mail.scut.edu.cn

陈真(1985—), 男, 博士, E-mail: chenzt@scut.edu.cn

唐杰(1986—), 男, 教授, E-mail: eejtang@scut.edu.cn

周恩丞(1989—), 男, 博士, E-mail: zhoucheng@ucas.ac.cn

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1076.tn.20211012.1847.006.html>

trajectory and transmit power are alternately optimized. Especially, the successive convex approximation (SCA) technique is applied to transform the non-convex constraints into convex functions. Simulation results are provided to demonstrate the convergence behavior and the great performance of the proposed algorithm in terms of the minimum achievable rate of all users in multi-UAV enabled SWIPT networks.

Key Words: simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT); unmanned aerial vehicle (UAV); trajectory design; resource allocation

大规模机器类通信(massive Machine-Type Communications, mMTC)是第五代移动通信中的重要场景之一,其特点是承载大规模物联网节点连接。然而,大量物联网节点的数据发送会造成整个网络能量消耗过快的问题。由于节点的能量受限,巨量的能量消耗将大大缩短网络的生命周期。无线携能通信(Simultaneous Wireless Information and Power Transfer, SWIPT)作为一种新型的无线通信类型^[1],可以实现无线信息与能量的同时传输,即在与无线设备进行信息交互的同时,为无线设备提供能量,极好地解决了节点能量受限问题。

然而在很多偏远地区或是灾区,传统的地面基站通常面临着无法及时与用户建立通信,并给无线设备提供能量问题。与地面蜂窝通信网络相比,无人机具有机动性能好、覆盖范围广以及灵活性高等优势,可以快速有效地部署在地理位置复杂的地区,以满足应急通信需求。因此,将无人机作为空中基站为地面用户提供高效、低时延的信息交互以及能量传输的服务是近年来学术界和工业界的研究热点。

文献[2]考虑单无人机作为空中基站与地面用户进行通信的场景,提出了一种无人机高度优化算法,实现了最大化无人机覆盖用户数量。文献[3]考虑多无人机场景,对无人机的高度、水平位置进行联合优化,以使用最少的无人机对特定的区域完全覆盖的同时满足通信需求。然而,文献[2-3]考虑的场景均是无人机作为静止的空中基站对用户进行服务,没有考虑到无人机的动态部署问题,忽略了无人机动态服务在提高用户覆盖范围与系统吞吐量方面的巨大优势。文献[4]针对用户通过上行链路给无人机传输信息的场景,提出了一种无人机最优轨迹规划方法,以最大化用户传输速率。后续,文献[5]针对无人机下行能量传输场景提出了一种速度受限的无人机最优轨迹规划算法,对无人机的悬停位置、悬停时间以及轨迹设计进行优化,实现了设备接收能量最大化的优化目标。文献[6]则更进一步考虑到功率分配问题,在无人机下行信息传输的场景中,联合优化功率分配和无人机飞行轨迹,以实现吞吐量的最大化。但文献[4-6]均只考虑了单无人机的应用场景,而在实际的通信或者无线能量传输场景中,多无人机联合可为用户提供更高效的接入服务^[7-9]。文献[7]考虑多无人机下行信息传输场景,提出了一种迭代算法,对无人机轨迹、功率分配进行分步优化,以实现网络吞吐量最大化。但文献[7-9]都没有考虑无人机下行传输能量的场景,无法保证能量受限用户的通信质量。

以上文献均没有涉及到多无人机下行能量传输场景,且无人机的速度约束、能量约束以及相互干扰的限制也未充分探索。因此,笔者将深入研究如何对无人机资源配置进行优化,提高能量传输效率和信息传输效率,以推动基于无人机的无线携能通信网络的发展。在文中,讨论一个无人机通信系统的下行信息与能量传输场景,通过对无人机的轨迹规划、功率分配以及用户调度的优化,以实现最大化最小用户可达速率。然而,该优化问题为非凸问题,难以直接求解。为了解决上述非凸的优化问题,笔者提出了一种基于块坐标下降法的迭代算法,将优化问题拆分成 3 个子问题,在每次迭代中,对用户调度、无人机轨迹规划以及功率分配依次进行优化。对于其中的非凸约束条件,采用连续凸优化技术^[10-11]将优化问题转换为近似凸问题,并使用凸优化工具进行求解。

1 系统模型与问题阐述

1.1 多无人机无线携能通信系统

考虑一个如图 1 所示的三维无线通信系统场景。 U 架无人机为 M 个地面用户提供信息传输和无线电能量输送服务。在给定的飞行周期内,无人机采用时分多址(Time-Division Multiple Access, TDMA)方式与地面用户进行信息传输。假设所有无人机在一个飞行周期内都使用相同的通信频段,无人机采用单天线向

用户传输信息。

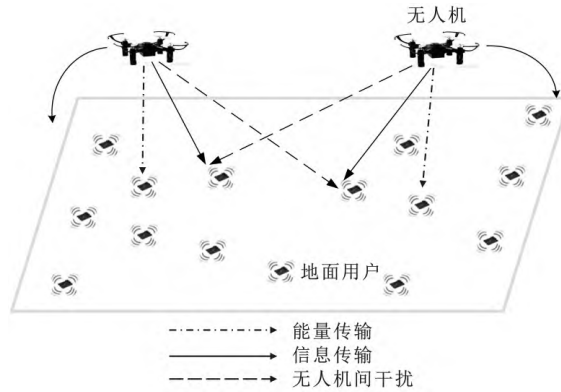


图1 基于多无人机的无线携能通信场景

根据上述布置的场景,假设地面用户的水平坐标 $e_m = [x_m, y_m]^T$,无人机的飞行高度 H 恒定,水平位置随时间不断变化。考虑到飞行周期长短的选择会对系统性能起到比较大的影响:通常太短的周期会导致无人机不能为用户提供有效的服务,而太长的周期则会导致每个用户等待的时间大大提高,因此选择合适的飞行周期十分重要。为了解决该问题,将无人机飞行周期 T 均分为 N 个相等间隔的时隙,记为 $n = \{1, 2, \dots, N\}$ 。每个时隙的长度为 T/N ,并且这个时隙的选择应该足够小,以至于可以认为在两个相邻时隙中无人机的位置基本不会发生变化。在时隙 n 中,第 $u = \{1, 2, \dots, U\}$ 架无人机的水平位置可表示为

$$w_u[n] = [x_u[n], y_u[n]]^T。$$

由于无人机基站具有移动灵活性的优势,将无人机与用户之间的通信形式视为视距通信,其信道质量取决于无人机与用户之间的距离,同时假定由于无人机移动造成的多普勒效应能在接收端得到很好的补偿。因此,在时隙 n 中,用户 m 从第 u 架无人机获取的信道功率遵从自由空间路径损耗模型,可表示为

$$g_{m,u}[n] = \beta_0 d_{m,u}^{-2}[n] \quad (1)$$

其中, $d_{m,u}[n] = (\|w_u[n] - e_m\|^2 + H^2)^{1/2}$,为用户 m 与第 u 架无人机之间的距离; β_0 是距离为 1 m 时的参考信道功率。由于用户在接收信号时也会受到其他无人机的信号干扰,在用户 m 处的信干噪比可表示为

$$\gamma_{m,u}[n] = \frac{p_u[n]g_{m,u}[n]}{\sum_{i=1, i \neq u}^U p_i[n]g_{m,i}[n] + \sigma^2} \quad (2)$$

其中, $p_u[n]$ 为第 u 架无人机在 n 时隙内的发射功率, σ^2 为接收端处的加性高斯白噪声的方差 (Additive White Gaussian Noise, AWGN)。用户选择方案 $a_{m,u}[n]$ 设置为一个二元变量,当 $a_{m,u}[n]$ 为 1 时,表示在时隙 n 中无人机 u 正在与用户 m 进行信号传输;否则, $a_{m,u}[n]$ 为 0。在时隙 n 中,用户 m 的可达发送速率可表示为

$$R_m[n] = \sum_{u=1}^U a_{m,u}[n] \log(1 + \gamma_{m,u}[n]) \quad (3)$$

1.2 问题阐述

设定 $A = \{a_{m,u}[n]\}_{m,u,n}$, $P = \{p_u[n]\}_{u,n}$, $W = \{w_u[n]\}_{u,n}$,分别表示用户调度、无人机的信息发射功率以及无人机的飞行轨迹。为了提升用户服务的公平性,以最大化最小用户可达速率作为优化目标,即 $\eta(A, P, W) = \min_{m \in M} R_m$,对无人机轨迹规划、功率分配以及用户调度进行优化。整体的优化问题可以描述为

$$\max_{\eta, A, P, W} \eta \quad (4a)$$

$$\text{s. t. } \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{u=1}^U a_{m,u}[n] \log(1 + \gamma_{m,u}[n]) \geq \eta, \forall m \quad (4b)$$

$$\sum_{m=1}^M a_{m,u}[n] \leq 1, \forall u, n \quad (4c)$$

$$\sum_{u=1}^U a_{m,u}[n] \leq 1, \forall m, n \quad (4d)$$

$$a_{m,u}[n] \in [0,1], \forall m,u,n, \quad (4e)$$

$$w_u[1] = w_u[N], \quad \forall u, \quad (4f)$$

$$\|w_u[n+1] - w_u[n]\|^2 \leq S_{\max}^2, \quad n = 1, 2, \dots, N-1, \quad (4g)$$

$$\|w_u[n] - w_i[n]\|^2 \geq d_{\min}^2, \quad \forall u, n, \forall i \neq u, \quad (4h)$$

$$\sum_{n=1}^N \sum_{u=1}^U \frac{\beta_0 p_e}{H^2 + \|w_u[n] - e_m\|^2} \geq E_{\min}, \quad \forall m, \quad (4i)$$

$$0 \leq p_u[n] \leq P_{\max}, \quad \forall u, n, \quad (4j)$$

其中,式(4a)和式(4b)表示优化目标为最大化最小用户可达速率,式(4c)~(4e)是关于用户调度的约束条件。本文假设无人机是采用时分复用的方式进行信号传输的,式(4c)和式(4d)表示在一个时隙内,一个用户只能接收一架无人机的信息,一架无人机也只能为一个用户提供服务。式(4f)~(4h)是关于无人机飞行轨迹的约束条件。式(4f)表示无人机在飞行周期最后应飞回初始位置,以保证可以周期性地为用户提供服务。考虑到实际情况,各无人机应有最大飞行速度约束 V_{\max} 以及各为了防止碰撞的最小安全距离约束 d_{\min} 。 S_{\max} 定义为一个时隙内无人机所能走的最大距离,即最大速度与时隙长度的乘积 $V_{\max}T/N$ 。式(4i)和式(4j)是关于无人机信息发射功率 p_u 以及能量传输功率 p_e 的约束。对于需要收集能量的用户,无人机需要满足用户的最低能量需求 E_{\min} ;对于要进行信息交互的用户,无人机对于信号的发射功率不能超过设定的最大值 P_{\max} 。

由于无人机轨迹变量和无人机发射功率变量的耦合,以及约束条件式(4b)、式(4h)和式(4i)的非凸性,导致整体优化问题非凸,难以直接求解。接下来,提出一种基于块坐标下降法和连续凸优化技术的算法求解该问题。

2 算法分析

为了求解上述非凸的优化问题,提出了一种基于块坐标下降法的迭代算法。首先将优化问题拆分成 3 个子问题:① 给定无人机轨迹及功率分配,对用户调度 A 进行优化;② 给定的用户调度及功率分配,对无人机轨迹 W 进行优化;③ 给定无人机轨迹及用户调度,对功率分配 P 进行优化。对于其中的非凸约束问题,采用连续凸优化方法^[10-11]将问题转换为近似凸优化问题,并使用凸优化工具进行求解。

2.1 用户调度

首先在给定无人机轨迹以及功率分配下对用户调度进行优化。为利于问题的求解,将条件式(4e)中的二元变量松弛为连续变量,可以将问题表示为

$$\max_{\eta, A} \eta, \quad (5a)$$

$$\text{s. t. } \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{u=1}^U a_{m,u}[n] \ln(1 + \gamma_{m,u}[n]) \geq \eta, \quad \forall m, \quad (5b)$$

$$\sum_{m=1}^M a_{m,u}[n] \leq 1, \quad \forall u, n, \quad (5c)$$

$$\sum_{u=1}^U a_{m,u}[n] \leq 1, \quad \forall m, n, \quad (5d)$$

$$0 \leq a_{m,u}[n] \leq 1, \quad \forall m, u, n. \quad (5e)$$

该问题是一个标准的线性规划问题,可以用凸优化工具进行求解。当通过求解问题得到用户分配及无人机调度方案后,对应的式(5c)和式(5d)两个不等式约束都可以取等号,即在一个时隙内,一架无人机仅为一个用户提供服务,一个用户仅接受一架无人机的服务。

2.2 无人机轨迹规划

对于给定的用户调度以及功率分配,无人机轨迹的规划问题可以表示为

$$\begin{cases} \max_{\eta, W} \eta, \\ \text{s. t. 式(4b), 式(4f), 式(4g), 式(4h), 式(4i)} \end{cases}. \quad (6)$$

<http://journal.xidian.edu.cn/xdxb>

由于约束条件非凸,不能直接对优化问题进行求解,因此考虑使用连续凸优化技术对问题进行转化。首先引入松弛变量 $V = \{V_{m,i}[n] = \|w_i[n] - e_m\|^2, \forall i \neq u\}$, 并将 $R_m[n]$ 进行改写:

$$R_m[n] = R'_m[n] - \text{lb}\left(\sum_{i=1, i \neq u}^U p_i[n]g_{m,i}[n] + \sigma^2\right), \quad (7a)$$

$$V_{m,i}[n] \leq \|w_i[n] - e_m\|^2, \forall i \neq u, n, m, \quad (7b)$$

其中,

$$R'_m[n] = \text{lb}\left(\sum_{i=1}^U p_i[n]g_{m,i}[n] + \sigma^2\right). \quad (8)$$

定义 $W^r = \{w_u^r[n]\}$ 为算法第 r 次迭代所得的无人机轨迹。由于 $R'_m[n]$ 对于 $\|w_u[n] - e_m\|$ 是凸的,而对于凸函数,其在任意点的一阶泰勒展开总能为它的下界^[12]。因此,对于已知的 w_i^r 点,可以得出 $R'_m[n]$ 的下界:

$$R'_m[n] \geq \sum_{i=1}^U -S_{m,i}^r[n](\|w_i[n] - e_m\|^2 - \|w_i^r[n] - e_m\|^2) + Z_{m,i}^r[n] \stackrel{\text{def}}{=} R_{m,u}^{\text{low}}[n], \quad (9)$$

其中,

$$S_{m,i}^r[n] = \frac{g_{m,i}[n]p_i[n]\text{lb}_e}{\sum_{j=1}^U p_j[n]g_{m,j}^r[n] + \sigma^2}, \quad (10)$$

$$Z_{m,i}^r[n] = \text{lb}\left(\sum_{i=1}^U p_i[n]g_{m,i}^r[n] + \sigma^2\right). \quad (11)$$

对于约束条件式(7b), $\|w_i[n] - e_m\|^2$ 是关于 $w_i[n]$ 的凸函数。因此,对其在 w_i^r 进行一阶泰勒展开:

$$\|w_i[n] - e_m\|^2 \geq \|w_i^r[n] - e_m\|^2 + 2(w_i^r[n] - e_m)^T(w_i[n] - w_i^r[n]), \forall i \neq u, n, m. \quad (12)$$

对于式(4h)和式(4i),进行相同的处理:

$$\|w_u[n] - w_i[n]\|^2 \geq \|w_u^r[n] - w_i^r[n]\|^2 + 2(w_u^r[n] - w_i^r[n])^T(w_u[n] - w_i[n]), \forall n, \quad (13)$$

$$\frac{\rho_0 p_e}{H^2 + \|w_i[n] - e_m\|^2} \geq \frac{2\rho_0 p_e}{H^2 + \|w_i^r[n] - e_m\|^2} - \frac{\rho_0 p_e(H^2 + \|w_i[n] - e_m\|^2)}{(H^2 + \|w_i^r[n] - e_m\|^2)^2}, \forall i \neq u, m. \quad (14)$$

通过对约束条件的变换,问题式(6)转化为

$$\begin{cases} \max_{\eta, W, S} \eta, \\ \text{s. t. } \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{u=1}^U a_{m,u}[n] \left(R_{m,u}^{\text{low}}[n] - \text{lb}\left(\sum_{i=1, i \neq u}^U \frac{\beta_0 p_i[n]}{H^2 + V_{m,i}[n]} + \sigma^2\right) \right) \geq \eta, \forall m, \\ V_{m,i}[n] \leq \|w_i^r[n] - e_m\|^2 + 2(w_i^r[n] - e_m)^T(w_i[n] - w_i^r[n]), \forall i \neq u, n, m, \\ w_u[1] = w_u[N], \forall u, \\ \sum_{n=1}^N \sum_{u=1}^U \left(\frac{2\rho_0 p_e}{H^2 + \|w_u^r[n] - e_m\|^2} - \frac{\rho_0 p_e(H^2 + \|w_i[n] - e_m\|^2)}{(\|w_i^r[n] - e_m\|^2 + H^2)^2} \right) \geq E_{\min}, \forall m, \\ \|w_u[n+1] - w_u[n]\|^2 \leq S_{\max}^2, n = 1, 2, \dots, N-1, \\ d_{\min}^2 \leq \|w_u^r[n] - w_i^r[n]\|^2 + 2(w_u^r[n] - w_i^r[n])^T(w_u[n] - w_i[n]), \forall i \neq u, n. \end{cases} \quad (15)$$

至此,问题已经转化为一个关于 w_i^r 和 $V_{m,i}$ 的凸优化问题,可使用凸优化工具进行求解。

2.3 功率分配

对于给定的用户调度以及无人机轨迹,功率分配的优化问题可以表示为

$$\begin{cases} \max_{\eta, P} \eta, \\ \text{s. t. 式(4b), 式(4j)} \end{cases}. \quad (16)$$

定义 $P^r\{p_u^r[n], \forall u, n\}$ 为算法第 r 次迭代所得的功率分配方案。 $R_m[n]$ 可改写为

$$R_m[n] = \text{lb}\left(\sum_{i=1}^U p_i[n]g_{m,i}[n] + \sigma^2\right) - R'_m[n], \quad (17)$$

其中,

<http://journal.xidian.edu.cn/xdxb>

$$R'_m[n] = \text{lb}\left(\sum_{i=1, i \neq u}^U p_i[n]g_{m,i}[n] + \sigma^2\right) \quad (18)$$

对于凹函数,其在任意点的一阶泰勒展开总能作为它的上界^[12]。对于已知的 $p_i^r[n]$ 点,可得出 $R'_m[n]$ 的上界:

$$R'_m[n] \leq \sum_{i=1, i \neq u}^U J_{m,i}[n](w_i[n] - w_i^r[n]) + \text{lb}\left(\sum_{i=1, i \neq u}^U p_i^r[n]g_{m,i}[n] + \sigma^2\right) \stackrel{\text{def}}{=} R_{m,u}^{up}[n] \quad (19)$$

其中,

$$J_{m,i}[n] = \frac{g_{m,i}[n]\text{lb}(e)}{\sum_{j=1, j \neq u}^U p_j^r[n]g_{m,j}[n] + \sigma^2}, \forall m, i, n \quad (20)$$

通过对约束条件的变换,问题式(16)转化为

$$\begin{cases} \max_{\eta, P} \eta, \\ \text{s. t. } \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{u=1}^U a_{m,u}[n] \left(\text{lb}\left(\sum_{i=1}^U p_i[n]g_{m,i}[n] + \sigma^2\right) - R_{m,u}^{up}[n] \right) \geq \eta, \forall m, \\ 0 \leq p_u[n] \leq P_{\max}, \quad \forall u, n. \end{cases} \quad (21)$$

至此,问题已经转化为一个关于 p_i^r 的凸优化问题,可使用标准的凸优化工具例如 CXV^[13] 进行求解。

2.4 整体算法设计

基于以上对原始问题的分解与转化,结合以交替优化为核心的块坐标下降法^[14],文中提出一种多无人机资源配置迭代算法。该算法通过对以上转化过后得到的 3 个子问题依次进行求解,并采用交替迭代方法使所得系统性能达到次优。具体算法流程如算法 1 所示。

算法 1 多无人机资源配置算法。

- ① 对 W^0 和 P^0 进行初始化,设置算法收敛阈值 θ ,迭代次数 $t=0$ 。
- ② 重复上步。
- ③ 对于给定的 $\{A^t, W^t, P^t\}$,对优化问题式(5)进行求解,并得到用户分配方案 A^{t+1} 。
- ④ 对于给定的 $\{A^{t+1}, W^t, P^t\}$,对优化问题式(15)进行求解,并得到无人机轨迹规划 W^{t+1} 。
- ⑤ 更新 $t=t+1$ 。
- ⑥ 直到 $|\eta(A^{t+1}, W^{t+1}, P^{t+1}) - \eta(A^t, W^t, P^t)| \leq \theta$ 。

3 仿真分析

本节对算法的仿真结果进行展示。考虑一个大小为 $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$ 的二维区域,其中 9 个用户随机分布在区域内且位置已知,而所有的 3 架无人机均飞行在恒定的高度上,高度 $H=30 \text{ m}$ 。接收端处的加性高斯白噪声设置为 $\sigma^2 = -110 \text{ dBm}$,在距离为 1 m 处的参考信道增益 $\beta_0 = -60 \text{ dB}$ 。对于无人机的工作条件,设定其最大飞行速度 $V_{\max} = 30 \text{ m/s}$,其最大信号发射功率 $P_{\max} = 0.2 \text{ W}$,其能量发射功率 $P_e = 20 \text{ W}$,用户最小能量需求 $E_o = 0.1 \text{ mW}$ 。对于无人机之间的最小距离设定 $d_{\min} = 20 \text{ m}$,飞行周期设定 $T = 90 \text{ s}$,每 10 s 对无人机位置进行一次采样并标注。

图 2 展现了文中算法的收敛性。随着算法迭代次数的增加,最小可达速率快速增加,并在约 40 次迭代时达到收敛。证明了笔者提出的多无人机资源配置算法的收敛性。

图 3 展示了飞行周期为 0,即无人机处于静止状态时的位置部署情况。此时,无人机与用户均配置单天线。为实现最大化最小用户可达速率的目标,3 架无人机分别部署于其匹配用户的中心,同时与其他无人机相互远离,以减少无人机间的通信干扰,达到更高的传输速率。

图 4 展示了用户最小可达速率随无人机飞行周期的变化曲线。随着无人机飞行周期的提高,用户最小可达速率不断提高,并在周期较高时趋于平缓。飞行周期较短时,无人机不能充分地给用户提供信息传输服务,用户可达速率较低;飞行周期较长时,虽然用户可达速率仍会小幅提高,但是用户等待接入时间会大大增

加。因此,飞行周期的合理选择至关重要。

图5展示了优化后的多无人机飞行轨迹。从图5可以看出,在一个飞行周期内,3架无人机可以很好地覆盖到所有的地面用户。这验证了所提多无人机资源配置算法可以很好地解决用户调度问题。另外,在飞行周期为90 s的情况下,无人机可以遍历所有地面用户以实现用户公平性,并且会在接近用户的位置飞行较长时间,给予用户短距离的视距通信,大大提升了通信质量。最后,图中无人机2的轨迹有内凹趋势,说明当无人机之间距离较近时,通过轨迹规划可以在满足约束的前提下增大无人机间距离以减少无人机间的干扰,进一步提升通信质量,提高用户可达速率。

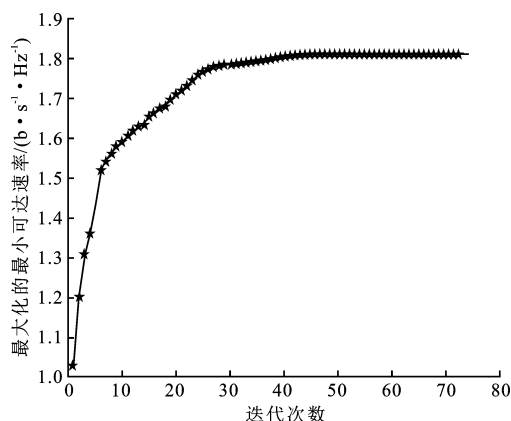


图2 多无人机资源配置算法的收敛性

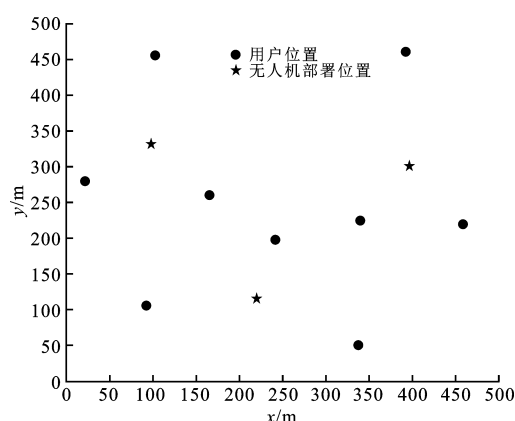


图3 多无人机位置部署

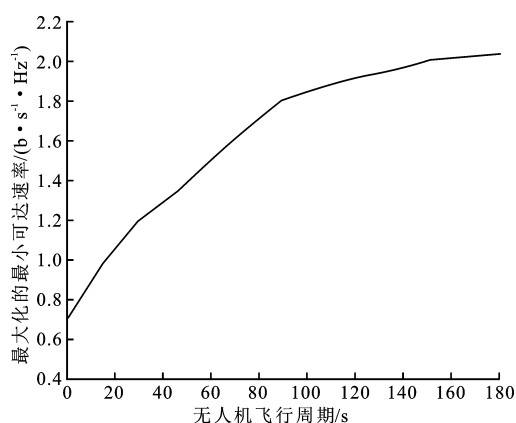


图4 不同无人机飞行周期下用户最小可达速率变化

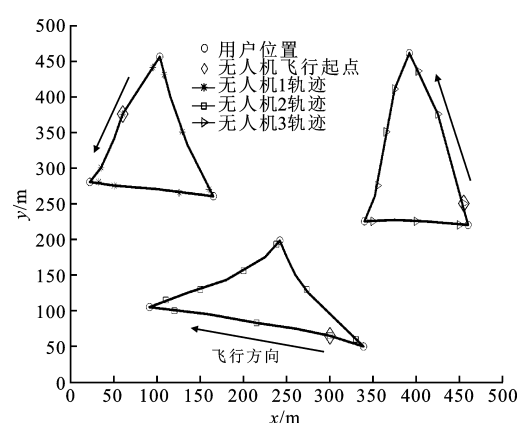


图5 优化后多无人机飞行轨迹

4 结束语

以提升无线信息与能量同传效率、解决节点能量受限问题为目标,笔者研究了基于多无人机无线携能通信网络的轨迹规划与资源分配联合优化问题。为解决非凸的优化问题,提出了一种基于块坐标下降法和连续凸优化技术的算法。通过对无人机的轨迹、功率分配以及用户选择方案交替优化,以实现最大化最小用户传输速率的优化目标。

下一步工作将考虑无人机机载天线阵列向用户传输信息的场景,利用波束成形技术实现信号的定向传输,以减少无人机之间的通信干扰,并结合非正交多址技术,进一步提高系统的性能。

参考文献:

- [1] VARSHNEY L R. Transporting Information and Energy Simultaneously[C]// IEEE International Symposium on Information Theory. Piscataway: IEEE, 2008: 1612-1616.
- [2] AL-HOURANI A, KANDEEPAN S, LARDNER S. Optimal Lap Altitude for Maximum Coverage[J]. IEEE Wireless

- Communications Letters, 2014, 3(6):569-572.
- [3] LYU J, ZENG Y, ZHANG R, et al. Placement Optimization of UAV-Mounted Mobile Base Stations [J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(3):604-607.
- [4] JIANG F, SWINDLEHURST A L. Optimization of UAV Heading for the Ground-To-Air Uplink [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(5):993-1005.
- [5] XU J, ZENG Y, ZHANG R. UAV-Enabled Wireless Power Transfer: Trajectory Design and Energy Optimization [J]. IEEE Transaction on Wireless Communications, 2018, 17(8):5092-5106.
- [6] WANG H, REN G, CHEN J, et al. Unmanned Aerial Vehicle-Aided Communications: Joint Transmit Power and Trajectory Optimization [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2018, 7(4):522-525.
- [7] WU Q, ZENG Y, ZHANG R. Joint Trajectory and Communication Design for Multi-UAV Enabled Wireless Networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(3):2109-2121.
- [8] XU Y, YANG D, WU Q, et al. Throughput Maximization in Multi-UAV Enabled Communication Systems with Difference Consideration [J]. IEEE Access, 2018, 6:55291-55301.
- [9] MOZAFFARI M, SAAD W, BENNIS M, et al. Mobile Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for Energy-Efficient Internet of Things Communications [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(11):7571-7589.
- [10] ZENG Y, ZHANG R, LIM T J. Throughput Maximization for Uav-Enabled Mobile Relaying Systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(12):4983-4996.
- [11] ZENG Y, ZHANG R. Energy-Efficient UAV Communication with Trajectory Optimization [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(6):3747-3760.
- [12] BOYD S, VANDENBERGHE L. Convex Optimization [M]. U. K: Cambridge University, 2004:35-75.
- [13] GRANT M, BOYD S. CVX: MATLAB Software for Disciplined Convex Programming [EB/OL]. [2020-05-25]. <http://cvxr.com/cvx>.
- [14] BERTSEKAS D. Nonlinear Programming [J]. Journal of the Operational Research Society, 1997, 48(3):332-334.

(编辑: 齐淑娟)

(上接第 22 页)

- [14] 左灿, 刘晓洁. 一种改进的 Kubernetes 动态资源调度方法 [J]. 数据通信, 2019, 189(2):50-54.
ZUO Can, LIU Xiaojie. An Improved Kubernetes Dynamic Resource Scheduling Method [J]. Data Communication, 2019, 189(2):50-54.
- [15] 平凡, 陈莉君. 基于 Kubernetes 的动态负载均衡机制研究与设计 [J]. 计算机与数字工程, 2020, 48(1):141-146.
PING Fan, CHEN Lijun. Research and Design of Dynamic Load Balancing Mechanism Based on Kubernetes [J]. Computer & Digital Engineering, 2020, 48(1):141-146.
- [16] NGUYEN N D, KIM T. Balanced Leader Distribution Algorithm in Kubernetes Clusters [J]. Sensors, 2021, 21(3):869.
- [17] 龚正, 吴治辉, 闫健勇. Kubernetes 权威指南 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2021:346-349.
- [18] CAO K, LI L, CUI Y, et al. Exploring Placement of Heterogeneous Edge Servers for Response Time Minimization in Mobile Edge-Cloud Computing [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(1):494-503.
- [19] 王汝言, 吴和, 崔亚平, 等. 超密集网络中多基站博弈边缘卸载策略 [J]. 西安电子科技大学学报, 2021, 48(4):1-10.
WANG Ruyan, WU He, CUI Yaping, et al. Edge Offloading Strategy for the Multi-Base Station Game in Ultra-Dense Networks [J]. Journal of Xidian University, 2021, 48(4):1-10.
- [20] LIU L, ZHOU Y, GARCIA V, et al. Load Aware Joint CoMP Clustering and Inter-Cell Resource Scheduling in Heterogeneous Ultra Dense Cellular Networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(3):2741-2755.
- [21] 赖成喆, 陈瑶, 郭奇立, 等. 车联网中基于博弈论的合作下载激励方案 [J]. 西安电子科技大学学报, 2021, 48(3):9-20.
LAI Chengzhe, CHEN Yao, GUO Qili, et al. Game Theory Based Incentive Scheme for Cooperative Downloading in the Internet of Vehicles [J]. Journal of Xidian University, 2021, 48(3):9-20.
- [22] NASH J. The Bargaining Problem [J]. Econometrica, 1950, 18(2):155-162.

(编辑: 齐淑娟)

<http://journal.xidian.edu.cn/xdxb>