

文章编号: 1671-4229(2024)02-0065-08

# 无人机辅助无线供能通信系统优化算法研究

黄高飞, 叶 炜, 赵 讯

(广州大学 电子与通信工程学院, 广东 广州 510006)

**摘要:** 文章研究了无人机辅助无线供能数据收集系统的资源分配优化方案, 其中无人机发送射频信号能量, 装配能量收集电路的地面节点从无人机发送的射频信号中收集能量, 并使用收集到的能量发送一定量的数据至无人机。针对此系统, 通过联合优化能量传输区间、信息传输区间以及无人机在这两个区间的飞行速度和时间, 在满足无人机数据收集约束条件下, 最小化无人机飞行时间。文章建立的优化问题是难以求解的非凸优化问题, 为求解此问题, 将其分解为与能量传输区间和信息传输区间分别对应的且易于解决的两个子问题, 并结合迭代优化方法, 提出了一种高效的系统优化算法。仿真结果表明, 与已有的基准方案相比, 文章提出的无人机辅助通信系统优化方案可以显著地减少无人机飞行时间。

**关键词:** 无人机通信; 无线供能通信; 凸优化; 能量收集

中图分类号: V279; TN929.5 文献标志码: A

## Research on the optimization algorithm for UAV-aided wireless-powered communication systems

HUANG Gao-fei, YE Wei, ZHAO Xun

(School of Electronics and Communication Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** The resource allocation optimization scheme for a UAV-aided wireless-powered communication system is studied, in which a UAV emits RF signals, and a ground node equipped with an energy harvesting circuit harvests energy from the RF signals and consumes the harvested energy to send a certain amount of data to the UAV. For this system, by jointly optimizing the energy transmission interval, information transmission interval, and the flight speed and time of the UAV in these two intervals, the UAV flight time is minimized under the condition of meeting the constraints of UAV data collection. The established optimization problem is a non-convex optimization problem that is difficult to solve. In order to solve this problem, it is decomposed into two tractable subproblems corresponding to the energy transmission interval and the information transmission interval. By employing the iterative optimization method to solve the two subproblems, an efficient system optimization algorithm is proposed. Simulation results show that as compared with the existing baseline schemes, the proposed scheme can significantly reduce the UAV flight time for the UAV-aided wireless-powered communication system.

**Key words:** UAV-aided communication; wireless-powered communication; convex optimization; energy harvesting

收稿日期: 2022-11-18; 修回日期: 2023-02-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61902098, 61872084); 大学生创新训练资助项目(202111078006)

作者简介: 黄高飞(1978—), 男, 教授, 博士. E-mail: huangaofei@gzhu.edu.cn

引文格式: 黄高飞, 叶炜, 赵讯. 无人机辅助无线供能通信系统优化算法研究[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2024, 23(2): 65-72.

近年来,由于无人机移动的灵活性以及可与地面节点进行视距通信,装配通信收发机的低空无人机可用作空中移动基站或中继,以帮助增强地面无线通信系统的性能,因此,无人机辅助通信技术得到学者们的广泛关注<sup>[1-3]</sup>。同时,射频能量传输是一种可为能量受限的无线通信节点提供稳定能源的低成本供电新技术。基于射频能量传输技术,装配射频能量收集电路的无线通信节点无需使用电池或连接电网,即可从特定射频信号源发送的射频信号中收集能量,并为自身供电进行信息发送。由此,作为一种新的无线通信技术,无线供能通信引起了无线通信学界和业界的极大兴趣<sup>[4-6]</sup>。

结合无人机辅助通信与无线供能通信技术,一种新的无人机辅助通信系统——无人机辅助无线供能通信系统开始为学者们所关注。在这种系统中,无人机安装射频能量发射装置,给具有射频能量收集能力的地面物联网节点进行充电,地面节点再利用收集到的能量发送信息至无人机上的信息接收机,可实现更加方便和灵活的物联网节点部署及数据收集。Zhang 等<sup>[7]</sup>基于非线性射频能量收集模型,研究了无人机辅助无线供能通信系统的设计与优化,以最大化系统的吞吐量。Naser 等<sup>[8]</sup>以最大化无人机辅助通信资源的利用率为目标,提出了一种联合优化无人机的飞行轨迹和资源分配的系统优化算法。谢礼峰<sup>[9]</sup>基于一种新型的无线供能通信网络架构,以提高系统频谱效率为目标,提出了一种无人机飞行轨迹和资源分配联合优化方案。Jian 等<sup>[10]</sup>针对多无人机辅助无线供能通信系统,提出了一种发射功率和无线能量传输时间的联合优化算法,提升了系统的吞吐量性能。考虑到与地面节点信息传输的公平性,郭慧等<sup>[11]</sup>利用连续凸规划优化技术,对无人机飞行轨迹进行优化,提出了一种具有公平性约束的系统优化算法。为降低地面物联网节点数据收集的平均信息年龄,Liu 等<sup>[12]</sup>联合优化了无人机轨迹和地面传感器充电或者信息传输的调度,提出了一种基于深度学习的系统优化算法。考虑充电时间和收集数据时间二者之间的权衡,Xu 等<sup>[13-14]</sup>通过联合优化无人机飞行轨迹和充电时

间与收集数据调度策略,提出了相应的系统优化方案。

对于无人机辅助通信系统,为了降低无人机能耗,可减少无人机的飞行时间。因此,如何在完成数据通信任务的同时,减少无人机的飞行时间,是无人机辅助通信系统优化时需要考虑的一个重要问题。Gong 等<sup>[15]</sup>提出了无人机的最小飞行时间优化方案,在满足传输数据量要求的同时,最小化无人机执行任务的时间,但其中没有考虑无线供能技术。为此,本文针对无人机辅助无线供能通信系统,在给定地面节点数据收集约束的条件下,以最小化无人机飞行时间为目标,研究相应的系统优化方案,从而可以得到无人机的飞行轨迹。本文的研究结果可以应用于精准农业、环境监测、物联网等领域。

## 1 系统模型

为简化分析,本文采用如图 1 所示的系统模型。在地面上存在多个传感器,传感器自身没有任何能量,将安装的专用射频能量收集装置作为唯一的能量来源。无人机在飞行过程中将对地面传感器进行数据收集,在此过程中,无人机首先通过射频无线能量传输在下行链路中为传感器充电,然后传感器使用所收集到的射频能量在上行链路中向无人机发送信息。

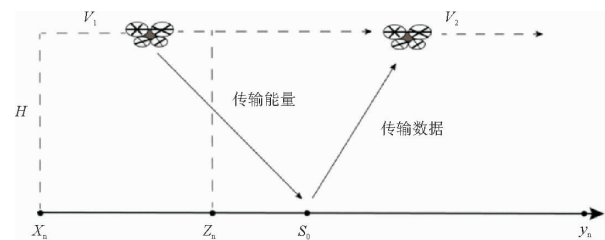


图 1 系统模型

Fig. 1 System model

图 2 为传感器分布等效模型示意图。

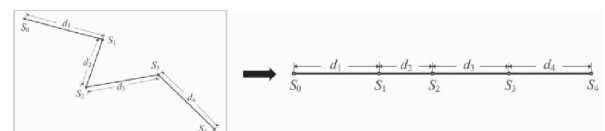


图 2 传感器分布等效模型示意图

Fig. 2 Equivalent model of the distribution of sensors

如图2所示,将传感器分布看作二维空间一条线上具有固定访问顺序的等效模型,编号为 $S_1, S_2 \cdots S_n$ ,无人机飞行高度 $H$ ,信道模型采用视距传输(Line of Sight, LoS)地空信道模型, $W$ 是带宽。无人机对第 $n$ 个传感器 $S_n$ 进行数据收集的工作区间是 $[x_n, y_n]$ ,区间可分为无人机能量传输区间和无人机数据收集区间。在无人机能量传输区间 $[x_n, z_n]$ 内, $t_n^{(1)}$ 是无人机在能量传输区间中的飞行时间,无人机通过专用无线射频能量发射装置给地面传感器充电,并假设在此期间,无人机以固定速度 $v_n^{(1)}$ 飞行或者无人机悬停在某个点给传感器充电。当传感器电量达到所需电量后,无人机以最大速度 $v_{\max}$ 飞走。在无人机数据收集区间 $[z_n, y_n]$ 内, $t_n^{(2)}$ 是无人机在数据收集区间中的飞行时间,传感器使用收集的能量将数据传给无人机,并假设在此期间,无人机以固定速度 $v_n^{(2)}$ 飞行或者无人机悬停在某个点收集地面传感器数据。待无人机收集完成所需传输数据后,无人机再以最大速度 $v_{\max}$ 飞走。本文通过优化无人机分别在能量收集阶段的速度 $v_n^{(1)}$ 、数据收集阶段的速度 $v_n^{(2)}$ 、无人机传输能量区间 $[x_n, z_n]$ 和收集数据区间 $[z_n, y_n]$ 、无人机传输能量所花费的时间 $t_n^{(1)}$ 和无人机收集数据所花费的时间 $t_n^{(2)}$ 等参数,从而最小化无人机的飞行时间。

## 2 问题简化求解

基于图1的系统模型,首先对无线能量传输与两个区间之间的优化问题进行建模。在能量传输区间 $[x_n, z_n]$ 中,假设无人机发射功率 $P^{(1)}$ 恒定,则地面传感器 $S_n$ 充电的功率 $Q_n(t_n^{(1)})$ 为

$$Q_n(t_n^{(1)}) = \eta h_n(t_n^{(1)}) P^{(1)} = \frac{\eta \beta_0 P^{(1)}}{(x_n + v_n^{(1)} t_n^{(1)} - S_n)^2 + H^2}, \quad (1)$$

其中, $\beta_0$ 是距离1 m时的参考信道增益, $\eta$ 是一个常数,描述了能量获取效率,且有 $0 < \eta < 1$ ,从而可得传感器 $S_n$ 所获得的总能量为

$$E_n^{(1)} = \int_0^{t_n^{(1)}} Q_n(t) dt. \quad (2)$$

在该过程中,无人机可以在飞行时或者悬停

时传输能量。如果无人机采用悬停方案,则能量传输悬停所消耗的时间 $t_{nh}^{(1)}$ 为

$$t_{nh}^{(1)} = \frac{E_n^{(2)}}{\left( \frac{\beta_1 P^{(1)}}{(S_n - x_n)^2 + H^2} \right)}, \quad (3)$$

其中, $\beta_1$ 为参考信道增益。

在数据收集区间 $[z_n, y_n]$ ,所消耗的时间为 $t_n^{(2)}$ ,速度为 $v_n^{(2)}$ ,假定传感器 $S_n$ 的发射功率固定为 $P^{(2)}$ ,那么传感器上传数据的速率 $R_n$ 为

$$R_n = \frac{1}{2} W \log_2 \left( 1 + \frac{P^{(2)} \beta_0}{[(z_n + v_n^{(2)} t_n^{(2)} - S_n)^2 + H^2]^{\frac{\alpha}{2}}} \right), \quad (4)$$

其中, $\alpha$ 为路径损耗指数(本文取值为 $\alpha = 2$ )。

在无人机收集数据的过程中,有以下约束条件:

(1)在 $[z_n, y_n]$ 区间,传感器 $S_n$ 必须上传超过 $B_n$ 比特的数据:

$$\int_0^{t_n^{(2)}} R_n dt \geq B_n; \quad (5)$$

(2)每个传感器发射功率所消耗的能量不能超过其在第一阶段中所收集的能量 $E_n^{(1)}$ :

$$P^{(2)} t_n^{(2)} \leq E_n^{(1)}. \quad (6)$$

在此过程中,无人机可以在飞行时或者悬停时收集数据。如果无人机采用悬停方案,则接收数据悬停所消耗的时间 $t_{nh}^{(2)}$ 为

$$t_{nh}^{(2)} = \frac{WB_n}{2} \log_2 \left( 1 + \frac{P^{(2)} \beta_0}{(S_n - z_n)^2 + H^2} \right). \quad (7)$$

### 2.1 提出问题1

根据上述分析,无人机辅助通信系统中的无人机飞行时间最小化问题可以描述为如下问题1:

$$\min_{v_n^{(1)}, v_n^{(2)}, x_n, y_n, z_n, t_n^{(1)}, t_n^{(2)}} \text{kk} \frac{(S_N - S_0) - \sum_{n=1}^N (y_n - x_n)}{v_{\max}} + t_n^{(1)} + t_n^{(2)}, \quad (8)$$

$$\text{s. t. (1), (2), (3), (4), (5), (6), (7), (9)} \quad (9)$$

$$0 \leq v_n^{(1)} \leq v_{\max}, \quad (10)$$

$$v_{\min} \leq v_n^{(1)} \leq v_{\max}, \quad (11)$$

$$t_n^{(1)} = \frac{z_n - x_n}{v_n^{(1)}} I_{z_n \neq x_n} + t_{nh}^{(1)} I_{z_n = x_n}, \quad (12)$$

$$t_n^{(2)} = \frac{y_n - z_n}{v_n^{(2)}} I_{y_n \neq z_n} + t_{nh}^{(2)} I_{y_n = z_n}. \quad (13)$$

显然,因为问题1耦合了无线能量传输和两个区间的约束条件,所以该问题是复杂的非凸问题。为简化问题分析与求解,本文假设地面上传感器之间的距离较远,从而无人机在相邻两个传感器的工作区间无交集。在此情况下,多个传感器无人机数据收集优化问题可以分解为多个独立的单个传感器的无人机数据收集优化问题进行处理。 $[S_0, S_2]$ 表示该传感器 $S_1$ 的无人机工作区间, $S_1$ 表示传感器的位置。

## 2.2 提出问题2

基于问题1,可以得到关于单个传感器的优化问题2:

$$\min_{v^{(1)}, v^{(2)}, t^{(1)}, t^{(2)}, x, y, z} \frac{(S_2 - S_0) - (y - x)}{v_{\max}} + t^{(1)} + t^{(2)}, \quad (14)$$

$$\text{s. t. (1), (2), (3), (4), (5), (6), (7), (15)} \quad (15)$$

$$0 \leq v^{(1)} \leq v_{\max}, \quad (16)$$

$$v_{\min} \leq v_n^{(2)} \leq v_{\max}, \quad (17)$$

$$t^{(1)} = \frac{z - x}{v^{(1)}} I_{z \neq x} + t_h^{(1)} I_{z = x}, \quad (18)$$

$$t^{(2)} = \frac{y - z}{v^{(2)}} I_{z \neq y} + t_h^{(2)} I_{z = y}. \quad (19)$$

问题2仍然难以直接求解。由此,本文将通过问题3进行求解。

## 2.3 提出问题3

为了解决问题2,需要给定一个能满足约束条件 $S_0 \leq x \leq z \leq y \leq S_2$ 的无人机工作区间 $[x, y]$ 。此时,问题2将变为优化问题3:

$$\min_{v^{(1)}, v^{(2)}, t^{(1)}, t^{(2)}, z} \frac{(S_2 - S_0) - (y - x)}{v_{\max}} + t^{(1)} + t^{(2)}, \quad (20)$$

$$\text{s. t. (1), (2), (3), (4), (5), (6), (7), (16), (17), (18), (19)}. \quad (21)$$

如求解问题3,则需将问题3分为能量传输区间和数据采集区间对应的子问题进行迭代求解:第一步,给定 $v^{(2)}, t^{(2)}$ ,求解 $v^{(1)}, z, t^{(1)}$ ;第二步,基于第一步得到的 $v^{(1)}, z, t^{(1)}$ ,求解 $v^{(2)}, t^{(2)}$ 。

## 2.4 提出问题4

在给定 $v^{(2)}, t^{(2)}$ 的情况下,第一步能量传输区间的优化问题4如下式:

$$\min_{v^{(1)}, t^{(1)}, z} \frac{(S_2 - S_0) - (y - x)}{v_{\max}} + t^{(1)} + t^{(2)}, \quad (22)$$

$$\text{s. t. (1), (2), (3), (6), (15), (16), (18)}. \quad (23)$$

接下来,对问题4进行求解。具体求解步骤如下:

(1)通过式(1)、式(2)和式(6)可以得到, $E^{(1)}$ 是传感器在能量传输阶段收集到的能量,那么传感器转发数据所消耗的能量约束为

$$P^{(2)} t^{(2)} \leq E^{(1)}; \quad (24)$$

(2)若要实现无人机飞行时间最小化,在能量传输阶段中,只要传输能满足数据转发所要求的能量即可。因此,直接取等号即可计算出 $t^{(1)}$ 所需要花费的最少时间,即

$$P^{(2)} t^{(2)} = \int_0^{t^{(1)}} \frac{\eta \beta_1 P^{(1)}}{(x + v^{(1)} t)^2 + H^2} dt; \quad (25)$$

(3)通过无人机飞行速度积分变换 $dt = \frac{1}{v^{(1)}} ds$ ,

$E^{(2)}$ 为第二阶段发送数据所需要的能量,并假设 $E^{(2)} = P^{(2)} t^{(2)}$ 代入该公式,可以得到:

$$E^{(2)} = \frac{\eta \beta_0 P^{(1)}}{v^{(1)}} \int_x^z \frac{1}{s^2 + H^2} ds; \quad (26)$$

(4)将式(6)代入式(25)中,即可得到:

$$E^{(1)} = \frac{\eta \beta_1 P^{(1)}}{H v^{(1)}} \arctan \frac{s}{H} \Big|_x^z. \quad (27)$$

## 2.5 提出问题5

通过上述公式(24)~(27),代入到问题4中,可以得到如下优化问题5:

$$\min_{v^{(1)}, t^{(1)}, z} \frac{(S_2 - S_0) - (y - x)}{v_{\max}} + t^{(1)} + t^{(2)}, \quad (28)$$

$$\text{s. t. (16), (18), (24), (25), (26), (27)}. \quad (29)$$

为求解问题5,首先用二分法找到能满足能量要求式(27)的 $z$ 值并定义为 $z_{\max}$ ,然后在 $[x, z_{\max}]$ 给定 $z$ ,判断是否能满足速度的约束条件(15),若是能满足,则直接求解 $v^{(1)}, t^{(1)}$ ,若是不能满足,那么在 $[x, z]$ 中继续用二分法找到能满足约束条件且时间最小的 $z$ 值,直到能满足速度的约束条件为止。

通过上述步骤求出 $v^{(1)}, t^{(1)}$ 后,接着将悬停状

态花费的时间  $t_h^{(1)}$  与非悬停状态时间  $t^{(1)}$  进行对比, 花费时间短的为  $t^{(1)}$ , 那么可以得到最终的  $t^{(1)}$  为

$$t^{(1)} = \min(t^{(1)}, t_h^{(1)}). \quad (30)$$

## 2.6 提出问题6

至此, 从第一步中求出了  $v^{(1)}$ 、 $z$ 、 $t^{(1)}$ , 从而代入到第二步中迭代求解。在第二步, 可以得到如下优化问题6:

$$\min_{v^{(2)}, t^{(2)}} \frac{(S_2 - S_0) - (y - z)}{v_{\max}} + t^{(1)} + t^{(2)}, \quad (31)$$

$$\text{s. t. (4), (5), (6), (7), (17), (19)}. \quad (32)$$

利用第一步求出的  $v^{(1)}$ 、 $z$ 、 $t^{(1)}$ , 通过式(27)可以将能量传输阶段能提供的能量  $E^{(1)}$  计算出来。通过传感器能量约束条件(24), 可以得到式(33):

$$v^{(2)} \geq P^{(2)} \cdot \frac{y - z}{E^{(1)}}. \quad (33)$$

通过式(33)可以知道,  $v^{(2)}$  的最小速度  $v_{\min}^{(2)}$  为

$$v_{\min}^{(2)} = P^{(2)} \cdot \frac{y - z}{E^{(1)}}. \quad (34)$$

## 2.7 提出问题7

通过上述公式(34), 可把上述问题6转换为以下优化问题7:

$$\min_{v^{(2)}, t^{(2)}} \frac{(S_2 - S_0) - (y - z)}{v_{\max}} + t^{(1)} + t^{(2)}, \quad (35)$$

$$\text{s. t. (4), (5), (6), (17), (19), (34)}. \quad (36)$$

为求解问题7, 首先需要计算出最大可传输数据量  $B_{\max}$ :

$$\begin{aligned} B_{\max}(v^{(2)}) &= \frac{W}{2v^{(2)}} \int_z^y \log_2 \left( 1 + \frac{P^{(2)}\beta_0}{s^2 + H^2} \right) ds = \\ &= \frac{W}{2v} \left[ \text{slog}_2 \left( \frac{s^2 + H^2 + P^{(2)}\beta_0}{s^2 + H^2} \right) - \frac{2H}{\ln 2} \arctan \frac{s}{H} + \right. \\ &\quad \left. \sqrt{H^2 + P^{(2)}\beta_0} \frac{2}{\ln 2} \arctan \frac{s}{\sqrt{H^2 + P^{(2)}\beta_0}} \right] \Big|_z^y. \end{aligned} \quad (37)$$

由上式可以得知,  $B_{\max}(v^{(2)})$  与  $v^{(2)}$  成反比。换言之, 只要  $B_{\max}(v^{(2)}) \geq B$  满足条件, 就可以求出  $v_{\min}^{(2)}$ 。那么, 只要满足数据转发条件, 就直接用  $B_{\max}(v) = B$  来计算。由此, 就可以得到最大的  $v^{(2)}$ , 即数据转发阶段无人机飞行模式最短的时间  $t^{(2)}$ 。

如果计算出来的  $v^{(2)} \leq v_{\min}^{(2)}$  才能满足数据转发的条件, 那么此时将采用悬停方案。无人机悬停

在  $z$  (或者  $S_1$ , 如果  $z < 0$ ), 即  $t_h^{(2)}$  表示数据转发阶段无人机悬停时所花费的时间, 可以通过如下公式计算:

$$t_h^{(2)} = \frac{WB_0}{2} \log_2 \left( 1 + \frac{P^{(2)}\beta_0}{(S_1 - z)^2 + H^2} \right). \quad (38)$$

接着, 将无人机悬停状态收集数据花费的时间  $t_h^{(2)}$  与飞行状态收集数据花费的时间  $t^{(2)}$  进行对比, 时间短的为  $t^{(2)}$ , 即  $t^{(2)} = \min(t^{(2)}, t_h^{(2)})$ , 并将  $t^{(2)}$  作为数据收集阶段所花费的时间  $t^{(2)}$ 。若是  $P^{(2)}t_h^{(2)} \geq E_1$ , 那么说明第一阶段能提供的能量不足, 需要将能满足数据转发阶段能量约束的条件重新代入到能量传输阶段进行求解。计算出  $t^{(2)}$  后, 就可以根据式(24)求出能量传输阶段中传感器需要充电的能量值。将  $t^{(2)}$  以及  $t^{(2)}$  所对应的  $v^{(2)}$ 、 $E^{(2)}$  值代入到第一步中迭代求解。迭代求解收敛的判断条件是, 迭代过程后  $v^{(2)}$ 、 $t^{(2)}$  不变, 或者上一次迭代计算中给定的  $v^{(2)}$ 、 $t^{(2)}$  与本次迭代计算所得  $v^{(2)}$ 、 $t^{(2)}$  差值小于一个误差  $e$ , 即可认为得到一组固定  $[x, y]$  的解。只要用列举法列举出多组  $[x, y]$ , 即可得到问题2的最优解。

## 3 仿真结果

为验证算法的可行性, 本文利用计算机仿真完成仿真结果。假设传感器工作区间  $S_0 = -50$  m,  $S_2 = 50$  m, 其中, 传感器的位置是在  $S_1 = 0$  m。传输距离1 m的参考信噪比是  $\beta_0 = 50$  dB, 噪声功率为  $\sigma^2 = -20$  dBm, 并且信道带宽  $W = 1$  MHz。无人机发射功率为  $P^{(1)} = 1$  W, 地面传感器发射功率为  $P^{(2)} = 0.1$  W, 充电效率  $\eta = 0.5$ 。根据无人机行业一般情况, 无人机最大速度设置为  $v_{\max} = 26$  m/s。在所有仿真中, 除非另有说明, 都按照上述值设定, 上述未出现的值会在对应的仿真图中说明。

本文提出的方案将基于3个方案来进行比较, 分别是悬停方案、仅优化起点方案和仅优化终点方案。

图3展示了传输数据量变化时, 不同方案实现的无人机飞行时间最小化对比。设无人机飞行高度为  $H = 0.5$  m。

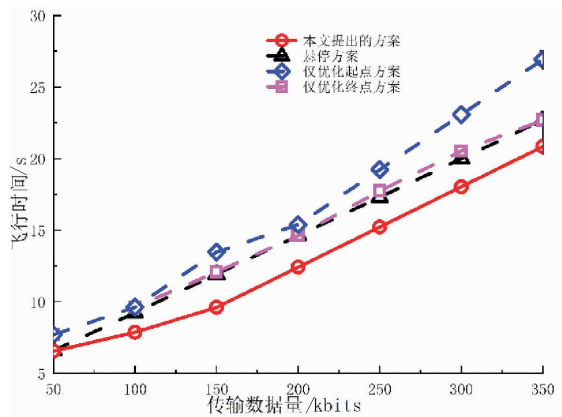


图 3 不同传输数据量 4 种方案无人机飞行时间对比

Fig. 3 Comparison of flight time of UAV under various transmitted data sizes

从图 3 可以观察到,当传输数据量比较小时,优化算法会略好于仅优化终点方案和悬停方案;随着传输数据量逐渐增大时,本文提出的方案和悬停方案的时间差距会先增大,然后逐渐减小。

图 4 展示了当无人机传输数据量增加时,无人机分别在能量传输和数据收集区间的速度对比。

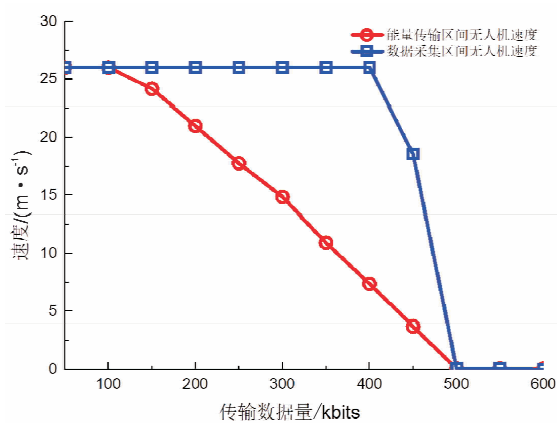


图 4 不同传输数据量无人机飞行速度

Fig. 4 The speed of UAV under various transmitted data sizes

如图 4 所示,可以观察到:①当传输数据量  $B_0 \leq 100$  kbits 时,无人机在能量传输区间和数据收集区间都将以最大飞行速度飞行;②当  $100$  kbits  $< B_0 \leq 400$  kbits 时,无人机在能量传输区间将以低速度飞行,而在数据收集区间都将以最大飞行速度飞行;③当  $400$  kbits  $< B_0 \leq 500$  kbits 时,无人机在能量传输区间将以较小的速度飞行甚至采用悬停方案,而无人机在数据收集区间的飞行速度将会逐渐减小;④当  $B_0 > 500$  kbits 时,无人机在能量传

输区间和数据收集区间都会采用悬停方案;⑤为了完成数据的传输,当传输数据量增大时,无人机在两个区间内的速度都会降低,甚至最后悬停,从而导致无人机的飞行时间的增加。

图 5 展示了当无人机飞行高度  $H$  增加时,不同方案实现的无人机飞行时间最小化对比。设传输数据量为  $B = 250$  kbits。

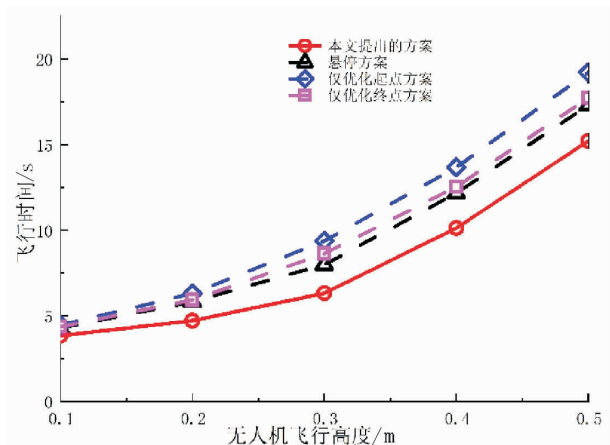


图 5 不同飞行高度 4 种方案无人机飞行时间对比

Fig. 5 Comparison of UAV flight time for four schemes under various UAV flight altitudes

如图 5 所示,当无人机飞行高度较低时,仅优化终点方案和悬停方案都会接近优化算法。随着无人机飞行高度逐渐增加,本文提出的方案和悬停方案的时间差距会先增大,然后逐渐减小。

图 6 展示了当无人机飞行高度  $H$  增加时,无人机分别在能量传输和数据收集区间的速度对比。

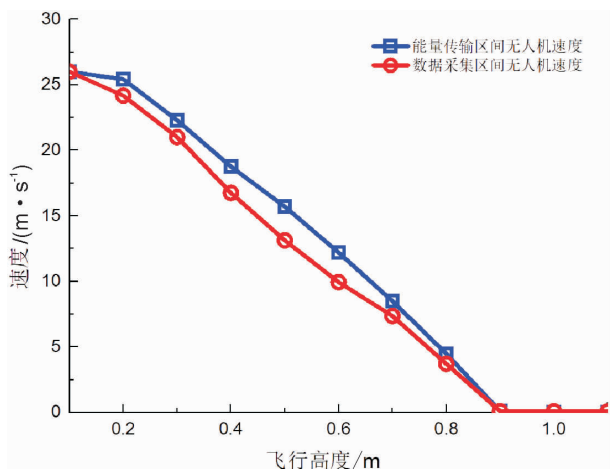


图 6 不同飞行高度无人机飞行速度

Fig. 6 The speeds of UAV under various UAV flight altitudes

如图6所示,可以观察到:①当无人机飞行高度 $H \leq 0.1$  m时,无人机在能量传输区间和数据收集区间几乎都将以最大飞行速度飞行;②当无人机飞行高度 $0.2 < H \leq 0.9$  m时,无人机在能量传输区间和数据收集区间的飞行速度都会随着无人机飞行高度增加而降低;③当无人机飞行高度 $H > 0.9$  m时,无人机在能量传输区间和数据收集区间都将以较小的速度飞行甚至采用悬停方案;④无人机飞行高度的增加,使得无人机与传感器之间的信道增益下降,那么无人机不得不减速执行任务,甚至悬停,从而导致无人机飞行时间的增加。

图7展示了传输数据量不同时,本方案计算飞行时间的迭代算法收敛图。设无人机飞行高度为 $H = 0.5$  m。如图7所示,传输数据量不同时,本方案计算飞行时间的迭代算法均能收敛。此外,在进行初次迭代计算的时候,随着传输数据量的增大,初次迭代计算的时间也会变大。在进行第二次迭代计算的时候,飞行时间就能大幅趋近于最优解。传输数据量增大并不会影响迭代计算的收敛性,在不同的传输数据量情况下,本方案均能快速收敛。

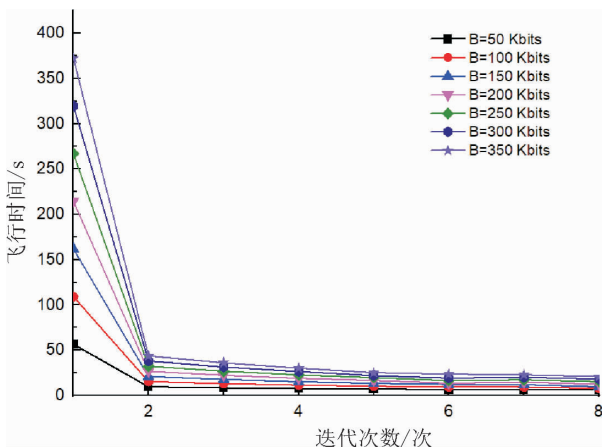


图7 不同传输数据量计算迭代收敛图

Fig. 7 Illustration of computing iteration convergence under various transmitted data sizes

图8展示了无人机飞行高度不同时,本方案

计算飞行时间的迭代收敛图。设传输数据量 $B = 250$  kbits。

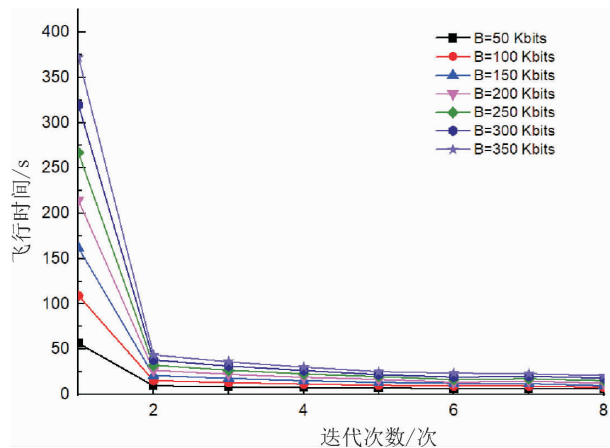


图8 不同飞行高度计算迭代收敛图

Fig. 8 Illustration of computing iteration convergence under various UAV flight altitudes

如图8所示,当无人机的飞行高度不同时,所提出方案计算飞行时间的迭代算法均能收敛。此外,还可观察到,在进行初次迭代计算的时候,随着无人机飞行高度的增大,初次迭代计算的时间也会略微变大。在进行第二次迭代计算的时候,飞行时间就能趋近于最优解。无人机飞行高度的增加并不会影响迭代计算的收敛性,在不同无人机飞行高度的情况下,本方案均能快速收敛。

## 4 结束语

本文研究了无人机辅助无线供能通信系统数据采集飞行时间的最小化。在满足无人机数据采集的前提下,为了实现飞行时间最小化,本文提出一种迭代算法。用该求解办法即可求解整个区间中无人机飞行时间,从而得到最优解。仿真结果表明,本文提出的无人机辅助无线供能通信系统数据采集飞行时间最小化策略能够实现通信性能要求和无人机飞行时间的最小化,验证了该算法的有效性。

## 参考文献:

- [1] Mozaffari M, Saad W, Bennis M. A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(3): 2334-2360.

- [2] Wu Q, Liu L, Zhang R. Fundamental trade-offs in communication and trajectory design for UAV-enabled wireless network [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2019, 26(1): 36-44.
- [3] Wang H, Ding G, Gao F. Power control in UAV-supported ultra dense networks: Communications, caching, and energy transfer[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2018, 56(6): 28-34.
- [4] Alsaba Y, Rahim S K A, Leow C Y. Beamforming in wireless energy harvesting communications systems: A survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(2): 1329-1360.
- [5] Ponnimbaduge T D, Jayakody D N K, Sharma S K. Simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT): Recent advances and future challenges[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20, (1): 264-302.
- [6] Clerckx B, Zhang R, Schober R. Fundamentals of wireless information and power transfer: From RF energy harvester models to signal and system designs[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2019, 37(1): 4-33.
- [7] Zhang Q, Wang Z, Zhang P. *IEEE Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference*, May 14-16, 2020[C]. Piscataway: IEEE, 2020.
- [8] Naser M, Hossein G, Motlagh F. Low-altitude unmanned aerial vehicles-based internet of things services: Comprehensive survey and future perspectives[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2016, 3(6): 899-922.
- [9] 谢礼峰. 无人机辅助无线供能通信网络的资源分配和轨迹优化研究[D]. 广州:广东工业大学,2021.
- [10] Jian S, Miao P, Wang Q. Throughput maximization for multi-UAV enabled millimeter wave WPCN: Joint time and power allocation[J]. *China Communications*, 2020, 17(10):15.
- [11] 郭慧,杨少川,张松炜,等. 基于无人机辅助的无线通信系统关键技术研究[J]. *信息通信*,2019(10):188-189.
- [12] Liu L, Xiong K, Cao J. Average AoI minimization in UAV-assisted data collection with RF wireless power transfer: A deep reinforcement learning scheme[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(7): 5216-5228.
- [13] Xu J, Zeng Y, Zhang R. UAV-enabled wireless power transfer: Trajectory design and energy optimization[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(8): 5092-5106.
- [14] Xu J, Zeng Y, Zhang R. *IEEE Global Communications Conference*, June 08-10, 2017[C]. Piscataway: IEEE, 2017.
- [15] Gong J, Chang T H, Chao S. Flight time minimization of UAV for data collection over wireless sensor networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2018, 9(4):1942-1954.

【责任编辑:卓祯雨】