

一种低传输能耗的无人机数据传输设计

樊凌雁¹, 燕武¹, 陈晞涵²

(1. 杭州电子科技大学, 浙江杭州 310018; 2. 浙江大学信息与电子工程学院, 浙江杭州 310000)

摘要: 为了克服无人机在传输数据过程中能量消耗较大的问题, 本文首先根据实际场景建立了无人机的传输能量消耗模型, 其次利用离散线性状态空间近似和线性化技术对该模型进行近似处理, 最后提出了基于凹凸过程 (ConCave-Convex Procedure, CCCP) 的迭代算法. 数值仿真结果表明, 提出的算法收敛迅速并能达到较好的效果.

关键词: 无人机; 传输能量消耗最小; 离散线性状态空间近似; 线性化; 凹凸过程

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2021)03-0573-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.12263/DZXB.20180895

The Data Transmission Design for UAV with Low Transmission Energy Consumption

FAN Ling-yan¹, YAN Wu¹, CHEN Xi-han²

(1. Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China;

2. College of ISEE, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310000, China)

Abstract: In order to overcome the large consumption problem of unmanned aerial vehicle (UAV) in the process of data transmission, we first establish the model of transmission energy consumption of UAV, and the model is treated approximately by applying the technology of discrete linear state-space approximation and linearization. Finally, we proposed a CCCP (ConCave-Convex Procedure) based algorithm. The numerical simulation results show that the proposed algorithm can quickly converge and can achieve excellent results.

Key words: UAV; transmission energy consumption; discrete linear state-space approximation; linearization; CCCP (ConCave-Convex Procedure)

1 引言

在过去的十年里, 无人机技术有了长足的发展. 相应的, 研究人员开始着手把无人机应用在无线通信领域^[1]. 经过数年探索, 将无人机应用于无线通信领域有着无与伦比的优势, 即相对于传统的无线通信系统其有着高移动性、低消耗、易部署的特点. 根据这些特点, 研究人员把无人机在无线通信领域的应用主要分为了三种^[1]. 第一类应用为无人机辅助无线通信^[2,3], 即为了提升地面终端的通信服务质量, 研究人员利用无人机在服务区内进行无缝、全方位的无线覆盖. 文献[2]在整个无线通信系统中通过建模、优化无人机的覆盖率函数, 并在确定了无人机位置的基础上使得无线覆盖面积最大化. 文献[3]为了使得无人机能提供最大的

覆盖率, 在实际环境中建模并优化了无人机的实际飞行高度. 无人机的第二类应用主要是通信中继^[4,5], 即在两个或多个角色的远距离通信中承担辅助通信中继的责任. 文献[4]通过建模并优化移动中继系统中无人机的发射功率和飞行轨迹, 解决了系统吞吐量最大化问题. 文献[5]在移动中继系统中提出了一种通过控制无人机航向角来优化中继链路性能算法. 文献[6]和文献[7]提出了面向非完整约束多地面移动中继的协同任务规划方法与基于无人机的移动物联网网间距离通信节能策略. 无人机的第三类应用主要是协助数据的传输与收集, 即主要应用于部分受限时间内进行远程数据传输的任务. 文献[8,9]首先建模整个无线通信系统, 进而优化无人机的飞行轨迹, 分别解决了能效最大化和降低功耗的难题. 文献[10]研究了无人机“蜂

群”的蜂涌行为,分析了干扰强度与时机对抑制“蜂群”蜂拥行为的影响。

本文所研究的无人机无线通信系统如图 1 所示,即无人机被用于在受限时间内对地面接收端集群进行数据传输.本文着重于优化无人机执行任务期间的传输能耗,即通过优化飞行轨迹、数据传输功率等参数使得任务期间无人机的传输能耗最小.本文在第二节首先详细阐述了整个系统的信道模型,其次给出了包含实际受限条件的系统的数学模型.在第三节,本文首先把该模型进行离散化,其次对该模型进行了线性化处理,使其能顺利地由常规的凸优化方法求解,进而提出了一种基于 CCCP(ConCave-Convex Procedure)的迭代算法求解该问题。

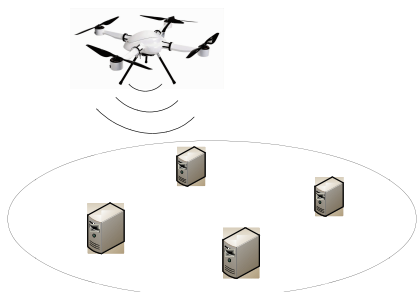


图1 无人机传输数据示意图

2 传输能量消耗模型

2.1 信道模型

考虑到实际情况,本文假设模型处于 3 维笛卡尔坐标系中并且无人机的飞行高度为 H . 无人机在飞行过程中的路径记为 $\mathbf{q}(t) = [x(t)y(t)]^T, 0 < t < T$, 其中 T 代表无人机的飞行受限时间. 由于地面接收端的坐标是常量,因此可以记为 $\boldsymbol{\omega}_k = [x, y]^T$. 相应地,不难得出无人机到第 k 个地面接收端的时变欧几里得距离为

$$d_k(t) = \sqrt{(H^2 + \|\mathbf{q}(t) - \boldsymbol{\omega}_k\|_2^2)}, 0 \leq t \leq T \quad (1)$$

为了方便后续问题的分析,本文采用简单的 LOS (Line-Of-Sight) 信道为数据的传输信道. 因此,数据传输的时变信道可以形式化为

$$h_k(t) = \beta_0 d_k^{-2}(t) = \frac{\beta_0}{H^2 + \|\mathbf{q}(t) - \boldsymbol{\omega}_k\|_2^2}, 0 \leq t \leq T \quad (2)$$

式(2)中的 β_0 表示 LOS 信道在参考距离 $d_0 = 1\text{m}$ 时的信道增益. 本文把无人机对地面接收端传输数据时的最大功率记为 P_{\max} , $\beta_k(t)$ 记为无人机对第 k 个地面接收端传输数据时的时变功率分配系数. 显然,可以得出时变信道速率为

$$R(t) = W \log_2 \left(1 + \frac{\beta_0 \beta_k(t) P_{\max}}{(H^2 + \|\mathbf{q}(t) - \boldsymbol{\omega}_k\|_2^2) \sigma_k^2} \right) \quad (3)$$

其中 W 代表信道带宽, σ_k^2 是第 k 个地面接收端接收无人机所传数据时的高斯白噪声功率. 综上所述,无人机在飞行受限时间 T 内对第 k 个地面接收端传输的数据总量为

$$\bar{L}_k = \int_0^T W \log_2 \left(1 + \frac{\beta_0 \beta_k(t) P_{\max}}{(H^2 + \|\mathbf{q}(t) - \boldsymbol{\omega}_k\|_2^2) \sigma_k^2} \right) dt \quad (4)$$

2.2 能量消耗模型

本文把无人机需要传输的数据总量记为 L , 且把无人机对第 k 个地面接收端的数据传输分配系数记为 α_k . 结合 2.1 节中的信道模型,能耗优化问题即可形式化为

$$\min_{\{\alpha_k, \beta_k(t), \mathbf{q}(t)\}} \sum_{k=1}^K \int_0^T \beta_k(t) P_{\max} dt \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^K \alpha_k = 1; \alpha_k \geq 0; k = 1, 2, \dots, K \quad (5a)$$

$$\sum_{k=1}^K \beta_{k,t} \leq 1; \beta_{k,t} \geq 0; \forall t \quad (5b)$$

$$\|\hat{\mathbf{q}}(t)\|_2 \leq V_{\max}; \forall t \quad (5c)$$

$$\alpha_k L \leq \bar{L}_k \quad (5d)$$

$$\mathbf{q}(0) = \mathbf{q}_0, \mathbf{q}(T) = \mathbf{q}_F \quad (5e)$$

其中式(5)为目标函数;式(5a)为数据分配系数约束;式(5b)为功率分配系数约束;式(5c)为无人机的最大飞行速度约束, V_{\max} 代表无人机的最大飞行速度. 值得注意的是,式(5c)中的 $\hat{\mathbf{q}}(t)$ 代表 $\mathbf{q}(t)$ 关于时间变量 t 的一阶微分,这意味着 $\hat{\mathbf{q}}(t)$ 是无人机在 t 时刻时的飞行速度矢量,即无人机 t 时刻的速度标量值为它的 2-范数;式(5d)代表数据的实际传输量不应大于数据分配量;式(5e)为初始点和终点约束,即 $\mathbf{q}_0, \mathbf{q}_F$ 分别代表无人机飞行轨迹的起点和终点。

目标函数(5)以及对应的约束,以常规手段是非常难以解决的,主要有以下两个因素:第一,从目标函数(5)和约束(5c)不难看出,要求解该模型,则必须求解无穷多个优化变量 $\mathbf{q}(t)$, 这是极难办到的;第二,约束(5d)无法判断凹凸性,很难用常规手段解决. 为了方便地解决这两个问题,在下一节中,本文巧妙地对该模型做了近似处理,进而提出了基于 CCCP 的迭代算法求解此问题。

3 模型求解

为了解决此问题,本文首先通过离散化技术把问题离散化,并对非凸约束进行线性化,最后提出了基于 CCCP 的迭代算法。

3.1 问题离散化

本文把时间范围 T 离散化为 $N+1$ 份相等的时间间隔 δ , 即 $t = n\delta, (n = 0, 1, \dots, N+1)$. 因此,无人机的轨迹 $\mathbf{q}(t)$ 被离散化为^[1]

$$\mathbf{q}(n\delta_i) \stackrel{\text{def}}{=} \mathbf{q}[n], n = 0, 1, \dots, N+1 \quad (6)$$

对于约束(5c),其中的 $\hat{\mathbf{q}}(t)$ 代表 $\mathbf{q}(t)$ 的一阶微分,

因此,该式离散化后可以形式化为

$$\| \mathbf{q}[n+1] - \mathbf{q}[n] \|_2 \leq V_{\max} \delta_t, n=0,1,\dots,N \quad (7)$$

其中 $V_{\max} \delta_t$ 为 δ_t 时间内无人机的飞行最大位移。

类似地,对其余部分进行离散化处理,原始问题(5)最终可以形式化为

$$\min_{\{\alpha_k, \beta_k[n], \mathbf{q}[n]\}} \sum_{k=1}^K \sum_{n=0}^{N+1} \beta_k[n] P_{\max} \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^K \alpha_k = 1, \alpha_k \geq 0, k=1,2,\dots,K \quad (8a)$$

$$\sum_{k=1}^K \beta_k[n] \leq 1, \beta_k[n] \geq 0, n=0,1,\dots,N+1 \quad (8b)$$

$$\| \mathbf{q}[n+1] - \mathbf{q}[n] \|_2 \leq V_{\max} \delta_t, n=0,1,\dots,N \quad (8c)$$

$$\alpha_k L \leq \sum_{n=0}^{N+1} W \log_2 \left(1 + \frac{\beta_0 \beta_k[n] P_{\max}}{(H^2 + \| \mathbf{q}[n] - \boldsymbol{\omega}_k \|^2) \sigma_k^2} \right), \quad k=1,2,\dots,K \quad (8d)$$

$$\mathbf{q}[0] = \mathbf{q}_0, \mathbf{q}[T] = \mathbf{q}_F \quad (8e)$$

3.2 线性化以及提出的基于 CCCP 的算法

如第 2 节末尾所述,离散化后的约束(5d),即约束(8d),无法判断凹凸性,极难用常规手段解决.因此,本文利用线性化方法避免此问题.

(1)把式(8d)带入到式(8a)中(此时约束变量 α_k 被消除,可以当式(8d)取等号时计算得到),并利用对数运算法则可得:

$$\begin{aligned} & \frac{L}{W} + \sum_{k=1}^K \sum_{n=0}^{N+1} \log_2 [(H^2 + \| \mathbf{q}[n] - \boldsymbol{\omega}_k \|^2) \sigma_k^2] \\ & \leq \sum_{k=1}^K \sum_{n=0}^{N+1} \log_2 [(H^2 + \| \mathbf{q}[n] - \boldsymbol{\omega}_k \|^2) \sigma_k^2 + \beta_0 \beta_k[n] P_{\max}] \end{aligned} \quad (9)$$

(2)通过观察式(9)可知不等式右边是关于变量 $\{\mathbf{q}[n], \beta_k[n]\}$ 的凹函数.因此,通过引入冗余变量 $\varphi_k[n]$ 可得到不等式右边项的一个下界,描述如下:

$$\begin{aligned} & \frac{L}{W} + \sum_{k=1}^K \sum_{n=0}^{N+1} \log_2 [(H^2 + \| \mathbf{q}[n] - \boldsymbol{\omega}_k \|^2) \sigma_k^2] \\ & \leq \sum_{k=1}^K \sum_{n=0}^{N+1} \log_2 \left(\frac{1}{\varphi_k[n]} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^K \sum_{n=0}^{N+1} \log_2 \left(\frac{1}{\varphi_k[n]} \right) \\ & \leq \sum_{k=1}^K \sum_{n=0}^{N+1} \log_2 [(H^2 + \| \mathbf{q}[n] - \boldsymbol{\omega}_k \|^2) \sigma_k^2 + \beta_0 \beta_k[n] P_{\max}] \end{aligned} \quad (11)$$

进一步地,式(11)可以重写为

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\varphi_k[n]} - H^2 \sigma_k^2 - \| \mathbf{q}[n] - \boldsymbol{\omega}_k \|^2 \sigma_k^2 - \beta_0 \beta_k[n] P_{\max} \leq 0; \\ & n=0,1,\dots,N+1; k=1,2,\dots,K \end{aligned} \quad (11a)$$

(3)由凸优化理论可知,式(11a)左边的第三项 $\| \mathbf{q}[n] - \boldsymbol{\omega}_k \|^2 \sigma_k^2$ 是关于 $\mathbf{q}[n]$ 的凸函数,但是前面的系数却为负,所以不能判断该约束的凹凸性,下面将利用线性化方法解决这个问题.因为 $\| \mathbf{q}[n] - \boldsymbol{\omega}_k \|^2 \sigma_k^2$ 本身是可微且凸的,所以对于在第 j 次迭代后获得的任意局部解 $\{\mathbf{q}_j[n]\}$,都有:

$$\begin{aligned} & \| \mathbf{q}[n] - \boldsymbol{\omega}_k \|^2 \sigma_k^2 \\ & \geq (\| \mathbf{q}_j[n] - \boldsymbol{\omega}_k \|^2 + 2 \mathbf{q}_j^T[n] (\mathbf{q}[n] - \mathbf{q}_j[n])) \sigma_k^2 \\ & \stackrel{\text{def}}{=} \psi_{lb}(\mathbf{q}[n]), \forall \mathbf{q}[n] \end{aligned} \quad (12)$$

其中当且仅当 $\mathbf{q}[n] = \mathbf{q}_j[n]$ 时,上式等号成立.值得注意的是,式(12)是关于 $\mathbf{q}[n]$ 的一阶泰勒展开,即该式是关于 $\mathbf{q}[n]$ 的线性函数.因此,式(12)最终可以转成凸约束,现重写如下:

$$\frac{1}{\varphi_k[n]} - H^2 \sigma_k^2 - \psi_{lb}(\mathbf{q}[n]) - \beta_0 \beta_k[n] P_{\max} \leq 0 \quad (13)$$

相似地,对式(10)同样利用线性化方法,最终该式可写为

$$\frac{L}{W} + A_j(\mathbf{q}[n]) - B_j(\varphi_k[n]) \leq 0 \quad (14)$$

其中:

$$A_j(\mathbf{q}[n]) = \sum_{k=1}^K \sum_{n=0}^{N+1} \left\{ \log_2 [(H^2 + \| \mathbf{q}_j[n] - \boldsymbol{\omega}_k \|^2) \sigma_k^2] - \frac{2 (\mathbf{q}_j[n] - \boldsymbol{\omega}_k)^T (\mathbf{q}[n] - \mathbf{q}_j[n])}{(H^2 + \| \mathbf{q}_j[n] - \boldsymbol{\omega}_k \|^2) \ln 2} \right\}$$

$$B_j(\varphi_k[n]) = \sum_{k=1}^K \sum_{n=0}^{N+1} \left\{ \log_2 \left(\frac{1}{\varphi_k[n]} \right) - \frac{(\varphi_k[n] - \varphi_{j,k}[n])}{\varphi_{j,k}[n] \ln 2} \right\}$$

综上所述,问题(8)最终可以写为

$$\min_{\{\beta_k[n], \mathbf{q}[n], \varphi_k[n]\}} \sum_{k=1}^K \sum_{n=0}^{N+1} \beta_k[n] P_{\max} \quad (15)$$

$$\sum_{k=1}^K \beta_k[n] \leq 1, \beta_k[n] \geq 0, n=0,1,\dots,N+1 \quad (15a)$$

$$\| \mathbf{q}[n+1] - \mathbf{q}[n] \|_2 \leq V_{\max} \delta_t, n=0,1,\dots,N \quad (15b)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\varphi_k[n]} - H^2 \sigma_k^2 - \psi_{lb}(\mathbf{q}[n]) - \beta_0 \beta_k[n] P_{\max} \leq 0 \\ & n=0,1,\dots,N+1; k=1,2,\dots,K \end{aligned} \quad (15c)$$

$$\frac{L}{W} + A_j(\mathbf{q}[n]) - B_j(\varphi_k[n]) \leq 0 \quad (15d)$$

$$\mathbf{q}[0] = \mathbf{q}_0, \mathbf{q}[T] = \mathbf{q}_F \quad (15e)$$

从以上讨论可以看出,原始问题(5)最终近似成了问题(15).值得注意的是,问题(15)已经可以很方便的求解,这是因为其目标函数及所有约束都已经是凸函数.因此,本文最终提出了一种基于 CCCP 的算法,如算法 1 所示.该算法在每次迭代时都需要通过内点法解决一次凸优化问题,而这个问题可以很容易地通过 CVX 工具箱解决^[11,12],在最坏的情况下,该算法有着多项式时间的复杂度.

算法 1 基于 CCCP 的迭代算法

1: 初始化 $\{q_j[n], \varphi_j[n]\}$, 令 $j=0$
 2: For $j=0, \dots, J_{\max}$ do
 3: 通过初始解 $\{q_j[n], \varphi_{j,k}[n]\}$ 得到问题 (15) 的最优解, 并记为 $\{q_j^*[n], \varphi_{j,k}^*[n]\}$
 4: 更新, $q_j[n] = q_j^*[n], \varphi_{j,k}[n] = \varphi_{j,k}^*[n]$
 5: $j=j+1$
 6: End for
 7: Return $\{q_j^*[n], \varphi_{j,k}^*[n]\}$

4 数值仿真与分析

在本节, 为了证明所提算法的有效性本文进行了数值仿真实验. 不失一般性, 本文在数值仿真实验中设无人机的飞行高度为 $H=100\text{m}$, 除非特别指定, 地面接收端的噪声功率和信道增益以及信道带宽分别记为 $\sigma^2 = -110\text{dBm}$, $\beta_0 = -60\text{dB}$, $W=1\text{kHz}$, 并且无人机的最大传输功率为 $P_{\max} = 0.1\text{W}$. 进一步地, 假设无人机的初始起飞位置为 $q_0 = [0, 0]$, 飞行终点为 $q_F =$

$[1000, 0]$, 最大飞行速度为 $V_{\max} = 20\text{m/s}$, 需要传输的数据总量为 $L = 10^6\text{bits}$, 任务完成时间 $T = 100\text{s}$. 为方便起见, 考虑地面接收端的个数 $K=4$ 的情况, 其位置 ω_k 在 100m 范围内随机产生.

图 2 给出了本文所提算法的收敛图, 可以看到该算法在迭代到第 7 次时就已经收敛, 可见该算法非常有效. 图 3 给出了无人机的轨迹图, 值得引起注意的是, 无人机在 A 点悬停了 50s, 这主要是因为 A 点相对于其它位置有着最好的信道, 方便无人机对地面接收端进行数据的传输. 图 4 给出了无人机对 k 个地面接收端的时变功率分配系数图. 不难发现, 该系数在前 50s 时是恒定的, 但在 51s 到 80s 时递减, 81s 后全部趋于零. 考虑到功率的实时变化很难做到, 故给出平均分配功率的定义, 即

$$P_{k, \text{average}} = \frac{\sum_{n=0}^{N+1} \beta_k[n] P_{\max}}{N+2} \quad (16)$$

表 1 给出了 K 个地面接收端的具体坐标、数据分配系数、平均分配功率.

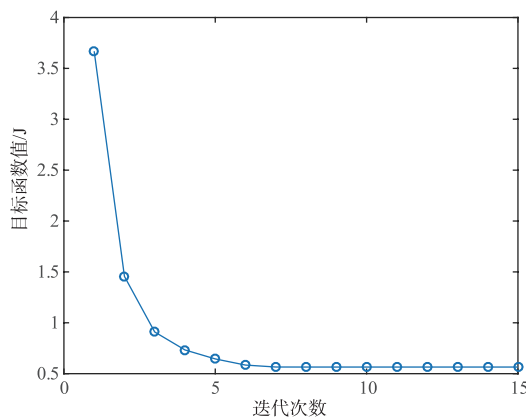


图2 算法收敛图

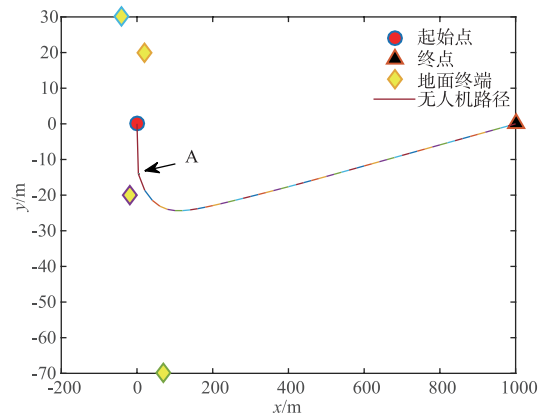


图3 无人机路径图

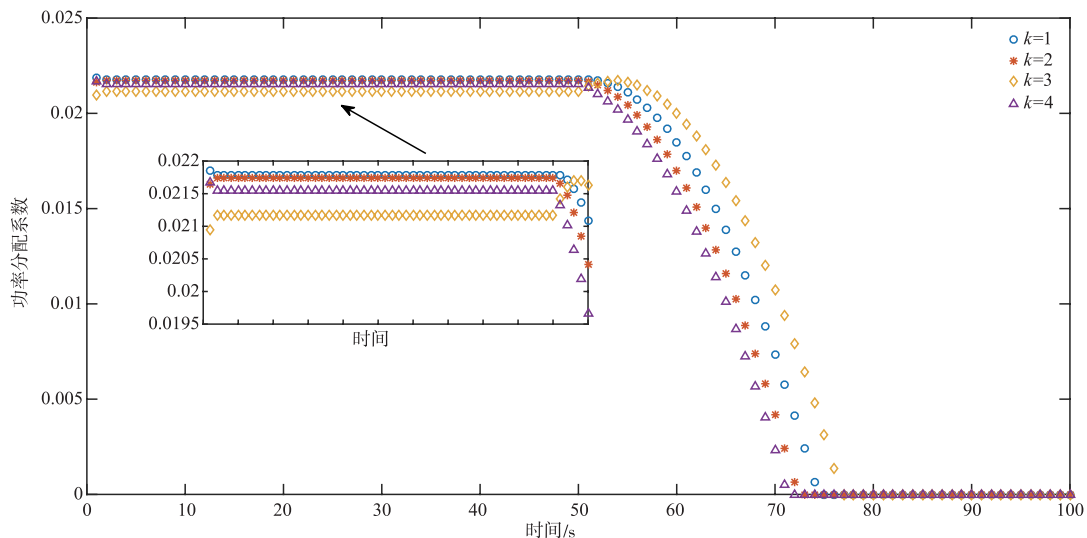


图4 功率分配系数图

表 1 地面接收端的具体坐标、数据分配系数、平均分配功率

	坐标	数据分配系数 α	平均分配功率/W
$k=1$	(20, 20)	0.2684	0.0144
$k=2$	(-20, -50)	0.2541	0.0139
$k=3$	(70, -70)	0.2433	0.0146
$k=4$	(-40, 30)	0.2378	0.0136

5 结束语

本文根据实际环境以及无人机的实际参数建立了数学模型,通过离散线性状态空间近似和线性化技术对模型进行处理,使得问题更易求解,最后提出了基于CCCP的迭代算法。通过求解该模型,我们可以在低传输消耗的情况下得到任务期间无人机的飞行路径以及功率分配系数。仿真结果显示该算法收敛迅速并能得到很好的结果。

参考文献

- [1] Zeng Y, Zhang R, Lim T J. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(5): 36-42.
- [2] Mozaffari M, Saad W, Bennis M, et al. Efficient deployment of multiple unmanned aerial vehicles for optimal wireless coverage[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(8): 1647-1650.
- [3] Al-Hourani A, Kandeepan S, Lardner S. Optimal LAP altitude for maximum coverage[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2014, 3(6): 569-572.
- [4] Zeng Y, Zhang R, Lim T J. Throughput maximization for UAV-enabled mobile relaying systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2016, 64(12): 4983-4996.
- [5] Zhan P, Yu K, Swindlehurst A L. Wireless relay communications with unmanned aerial vehicles: Performance and optimization[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2011, 47(3): 2068-2085.
- [6] 王巍, 彭力, 赵继军, 常存喜, 黄晓丹, 田立勤. 移动物联网非完整约束中继的协同任务规划[J]. 电子学报, 2019, 47(6): 1251-1259.
- WANG Wei, PENG Li, ZHAO Ji-jun, CHANG Cun-xi, HUANG Xiao-dan, TIAN Li-qin. Cooperative task planning of ground relay with nonholonomic constraints in mobile internet of things based on UAVs[J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(6): 1251-1259. (in Chinese)
- [7] 王巍, 赵继军, 彭力, 黄晓丹, 李林茂, 魏丁丁. 基于 UAV 的移动物联网远距离通信节能策略研究[J]. 电子学报, 2018, 46(12): 2914-2922.

WANG Wei, ZHAO Ji-jun, PENG Li, HUANG Xiao-dan, LI Lin-mao, WEI Ding-ding. Research on the energy saving strategy for long distance communication of mobile internet of things based on UAVs[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(12): 2914-2922. (in Chinese)

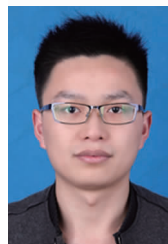
- [8] Zeng Y, Zhang R. Energy-efficient UAV communication with trajectory optimization[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(6): 3747-3760.
- [9] Ben Pearre, Timothy X Brown. Model-free trajectory optimization for wireless data ferries among multiple sources[A]. Globecom Workshops[C]. USA: IEEE, 2010. DOI: 10.1109/GLOCOMW.2010.5700250.
- [10] 柳强, 何明, 刘锦涛, 牛彦杰, 黄倩. 无人机“蜂群”的蜂拥涌现行为识别与抑制机理[J]. 电子学报, 2019, 47(2): 374-381.
- LIU Qiang, HE Ming, LIU Jin-tao, NIU Yan-jie, HUANG Qian. A mechanism for identifying and suppressing the emergent flocking behaviors of UAV swarms[J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(2): 374-381. (in Chinese)
- [11] Grant M, Boyd S. CVX: Matlab Software for Disciplined Convex Programming, Version 2.0 Beta[OL]. <http://cvxr.com/cvx>. 2013-09.
- [12] Boyd S, Vandenberghe L. Convex Optimization[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004.

作者简介



樊凌雁 女, 1979年1月出生, 甘肃人, 研究员, 硕士生导师。主要从事数据存储、智能信号处理等方面的研究工作。

E-mail: fanlingyan@hdu.edu.cn



燕武 男, 1994年1月出生, 安徽亳州人。2016年获得杭州电子科技大学学士学位, 2019年获得杭州电子科技大学硕士学位。研究方向为移动边缘计算和凸优化。目前就职于中国移动杭州研发中心。

E-mail: yanwu@cmhi.chinamobile.com



陈晞涵 男, 1993年7月出生, 浙江杭州人。2015年获得北京邮电大学学士学位, 2020年获得浙江大学博士学位。主要从事大规模阵列天线、智能边缘、随机优化等方面的研究工作。

E-mail: chenxihan@zju.edu.cn