无人机交替中继通信及其轨迹优化和功率分配研究

张广驰[①] 陈 娇[①] 崔 苗*[①] 陈 伟[②] 张 景[③]

[①](广东工业大学信息工程学院 广州 510006)

[②](广东省环境地质勘查院 广州 510080)

[③](中国电子科学研究院 北京 100043)

摘 要：为了提高无人机中继通信系统的频谱利用率，该文提出一种交替中继方法，通过两个无人机中继交替工作，轮流将信息从源端转发到目的端。研究联合优化无人机中继的飞行轨迹和各发射端的发射功率，协调两条中继链路的相互干扰，实现端到端的吞吐量最大化。涉及的优化问题受限于无人机的高度约束、机动约束、防碰撞约束以及各发射端的平均与峰值发射功率约束，是难以求得最优解的非凸优化问题。该文提出一种基于交替最大化和连续凸优化技术的高效迭代算法求解次优解，并用计算机仿真验证了所提算法的有效性。

关键词：无人机通信；交替中继；功率分配；轨迹优化

中图分类号：TN915 **文献标识码**：A **文章编号**：1009-5896(2021)12-3554-09

DOI: 10.11999/JEIT200684

Trajectory Optimization and Power Allocation for UAV Alternate Relay Communications

ZHANG Guangchi[①] CHEN Jiao[①] CUI Miao[①] CHEN Wei[②] ZHANG Jing[③]

[①](*School of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou* 510006, *China*)

[②](*Institute of Environmental Geology Exploration of Guangdong Province, Guangzhou* 510080, *China*)

[③](*China Academic of Electronics and Information Technology, Beijing* 100043, *China*)

Abstract: To improve the spectrum efficiency of the Unmanned Aerial Vehicle (UAV) relaying communication systems, a UAV alternate relay scheme is proposed, where two UAV relays alternately forward information from the source to the destination. To coordinate the interference among the two relaying data links, UAV trajectory and transmit power are investigated to maximize the end-to-end throughput of the UAV alternate relay system. The considered optimization problem is subject to the height, maneuver and collision avoidance constraints of the UAVs and the average and peak transmit power constraints of the source and UAV relays, which is non-convex and difficult to obtain the optimal solution. Nevertheless, an efficient iterative algorithm based on the alternating maximization and successive convex optimization techniques is proposed to obtain a suboptimal solution. Simulation results verify the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: Unmanned Aerial Vehicle (UAV) communication; Alternate relay; Power allocation; Trajectory optimization

---

收稿日期：2020-08-05；改回日期：2021-04-05；网络出版：2021-06-10

*通信作者： 崔苗 cuimiao@gdut.edu.cn

基金项目：广东省科技计划(2017B090909006, 2018A050506015, 2019B010119001, 2020A050515010, 2020A0505100012)，广东特支计划项目(2019TQ05X409)

Foundation Items: The Science and Technology Plan Project of Guangdong Province (2017B090909006, 2018A050506015, 2019B010119001, 2020A050515010, 2020A0505100012), The Special Support Plan for High-Level Talents of Guangdong Province (2019TQ05X409)

1　引言

近年来，无人机由于具有灵活部署、成本低廉、轻便小巧、适应性强等优点，应用日益广泛[1–11]。无人机通信有着广阔的前景，目前的研究主要集中在以下几个方面。一是无人机可以作为空中基站，作为现有地面蜂窝无线网络补充，在服务区域内实现更好的无线网络覆盖，比如为热点区域提供分流服务或在突发应急救灾场景中进行通信恢复[4,5]。二是无人机可以作为一个飞行的无线接入点，用于物联网和无线传感网络的数据收集与分发[7]。三是无人机可以作为空中中继，为远距离用户提供可靠的无线连接[8,9]。

本文主要考虑无人机中继通信。这方面初期研究工作集中在固定无人机中继的情况[10–13]，主要研究无人机的部署位置优化问题。文献[12]提出通过优化无人机的水平位置来搜寻视距链路从而最大化端到端的吞吐量。文献[13]提出一种分析方法来优化无人机的飞行高度实现通信可靠性最大化。充分地利用无人机的高机动性来辅助通信[9,14–17]，文献[9]研究了解码转发无人机中继，提出一种联合优化无人机轨迹和发射功率分配的方法。文献[17]考虑了放大转发无人机中继，研究最小化系统的中断概率。

目前，已有文献主要研究单无人机中继[9,15–17]，但单无人机的覆盖范围有限，随着源端和目的端距离的增加或通信环境的恶化，并不能提供可靠的中继通信服务。为了更好地解决这一问题，可以引入多个无人机来辅助通信，通过提供更多的自由度方式来优化无人机通信性能[14,18]。文献[14]考虑了多无人机通信系统，通过优化多用户通信调度和联合优化无人机轨迹与功率控制，在下行链路通信中最大化所有地面用户的最小吞吐量。文献[18]考虑了多跳无人机中继通信系统，其中源节点将信息通过多个无人机中继以多跳的方式转发到目标节点，通过联合无人机轨迹和发射功率优化实现端到端的吞吐量最大化。

上述关于无人机中继的研究假设采用的通信方式是全双工通信，然而，在实际应用中，受到物理尺寸小、信息处理能力有限等因素的制约，难以在无人机中继上实现全双工通信。因此本文考虑半双工无人机中继通信。由于半双工的限制，无人机中继通信面临频谱利用率较低的问题，为了提高频谱效率，提出基于双无人机交替中继策略[19]。同时为了协调交替传输过程中造成的链路干扰，本文通过联合优化无人机中继的飞行轨迹和各发射端的功率分配，最大化该无人机交替中继通信系统的端到端的吞吐量。涉及的优化问题是非凸的，难以求出全局最优解。本文提出了一种基于交替最大化技术和连续凸优化技术的高效迭代算法求次优解。仿真结果表明，通过对无人机交替中继系统的功率分配以及无人机飞行轨迹的联合优化设计，能有效减小链路干扰，提高系统的吞吐量。

2　系统模型

如图1所示，本文考虑一个双无人机交替中继通信系统，该系统包括一个源端(用S表示)，一个目的端(用D表示)，以及两个无人机中继(分别用$\mathrm{R_1}$和$\mathrm{R_2}$表示)。S和D都位于地面且位置已知，S发出的信息通过$\mathrm{R_1}$和$\mathrm{R_2}$轮流转发到D。设S和D的位置分别为$\boldsymbol{w}_\mathrm{s}=[x_\mathrm{s},y_\mathrm{s},h_\mathrm{s}]^\mathrm{T}$和$\boldsymbol{w}_\mathrm{d}=[x_\mathrm{d},y_\mathrm{d},h_\mathrm{d}]^\mathrm{T}$。设$\mathrm{R_1}$和$\mathrm{R_2}$的飞行时间为$T$。在时刻$t$，$\mathrm{R_1}$和$\mathrm{R_2}$的3维坐标分别为$\boldsymbol{q}_1(t)=[x_1(t),y_1(t),h_1(t)]^\mathrm{T}$和$\boldsymbol{q}_2(t)=[x_2(t),y_2(t),h_2(t)]^\mathrm{T}$。为了便于优化无人机的飞行轨迹，应用离散近似方法，将无人机持续飞行时间T划分为长度为d_t的N个等长时隙，从而有$T=N\cdot d_t$，此处N为奇数且设置d_t足够小从而在每个时隙内无人机和地面节点之间的距离可视为近似不变，因此无人机的轨迹可以近似地表示为$\boldsymbol{q}_1(n)=[x_1[n],y_1[n],h_1[n]]^\mathrm{T}$和$\boldsymbol{q}_2(n)=[x_2[n],y_2[n],h_2[n]]^\mathrm{T}$，$n\in\{1,2,\cdots,N\}$。

如图2所示，$\mathrm{R_1}$和$\mathrm{R_2}$采用交替中继的通信方式协助S向D传输信息。具体而言，在时隙1，S向$\mathrm{R_1}$传输信息；在时隙2，$\mathrm{R_1}$向D传输信息同时S向$\mathrm{R_2}$传输信息；在时隙3，$\mathrm{R_2}$向D传输信息同时S向$\mathrm{R_1}$传输信息，这样依次交替转发下去，在时隙N–1，$\mathrm{R_1}$向D传输信息同时S向$\mathrm{R_2}$传输信息；在时隙N，$\mathrm{R_2}$向D传输信息。假设上下行链路采用同频

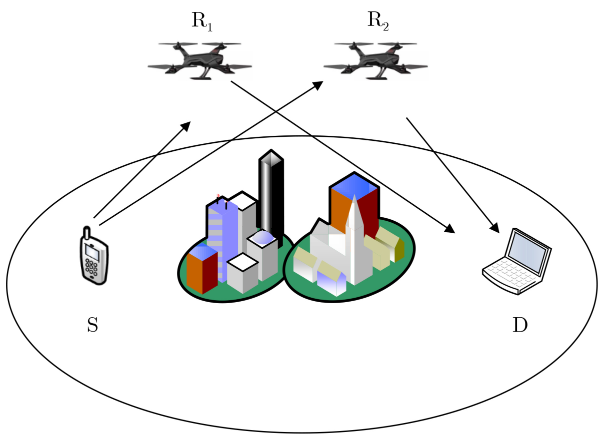

图 1 无人机交替中继通信系统

时隙1	时隙2	时隙3	…	时隙N–1	时隙N
S→$\mathrm{R_1}$	S→$\mathrm{R_2}$ $\mathrm{R_1}$→D	$\mathrm{R_2}$→D S→$\mathrm{R_1}$	…	$\mathrm{R_1}$→D S→$\mathrm{R_2}$	$\mathrm{R_2}$→D

图 2 信息传输时隙图

复用的方式进行信息传输，因此不同链路之间存在干扰。具体而言，当$n \ge 2$时，S向R_2传输信息会受到R_1转发信息到D的干扰。同理，当S向R_1传输信息也会受到R_2转发信息到D的干扰。

R_1和R_2受限于最小飞行高度$h_{\min}$和最大飞行高度$h_{\max}$，则飞行高度约束可以表示为

$$h_{\min} \le h_j[n] \le h_{\max}, \quad \forall n, \quad i=1,2 \tag{1}$$

设R_j的起始位置和终点位置分别为$\boldsymbol{q}_{j,0}=[x_{j,0}, y_{j,0}, h_{j,0}]^{\mathrm{T}}$和$\boldsymbol{q}_{j,\mathrm{F}}=[x_{j,\mathrm{F}}, y_{j,\mathrm{F}}, h_{j,\mathrm{F}}]^{\mathrm{T}}$，其中$j=1,2$。令$V_{\max}$表示无人机的最大速度，在单个时隙内无人机飞行的最大距离为$V=V_{\max}\cdot d_t$，因此无人机的运动约束和防碰撞约束可以表示为

$$\|\boldsymbol{q}_j[1]-\boldsymbol{q}_{j,0}\| \le V, \quad \|\boldsymbol{q}_{j,\mathrm{F}}-\boldsymbol{q}_j[N]\| \le V, \quad j=1,2 \tag{2a}$$

$$\|\boldsymbol{q}_j[n+1]-\boldsymbol{q}_j[n]\| \le V, \ j=1,2, \ n=1,2,\cdots,N-1 \tag{2b}$$

$$\|\boldsymbol{q}_1[n]-\boldsymbol{q}_2[n]\|^2 \ge d_{\min}^2, \quad \forall n \tag{2c}$$

其中，$\|\cdot\|$表示欧几里得范数，$d_{\min}$表示无人机之间的最小安全飞行距离。

对于S到R_1和R_2以及它们到D的信道，实测数据表明它可被近似为视距链路(Light-of-Sight, LoS)[14–16]，因此，在时隙n，S到R_1和S到R_2的信道功率增益$h_{\mathrm{s},1}[n]$和$h_{\mathrm{s},2}[n]$遵循自由空间路径损耗模型，可以表示为

$$h_{\mathrm{s},j}[n]=\beta_0\cdot d_{\mathrm{s},j}^{-2}[n]=\frac{\beta_0}{\|\boldsymbol{q}_j[n]-\boldsymbol{w}_{\mathrm{s}}\|^2}, \quad j=1,2 \tag{3a}$$

其中，β_0表示在参考距离$d_0=1\ \mathrm{m}$时的无线信道功率增益，$d_{\mathrm{s},j}[n]=\sqrt{\|\boldsymbol{q}_j[n]-\boldsymbol{w}_{\mathrm{s}}\|^2}$表示在时隙$n$时S和$R_j$的距离[1)]。同理，$R_1$至$R_2$的信道功率增益可以表示为$h_{1,2}[n]$，$R_1$和$R_2$分别到D的信道功率增益可以表示为$h_{1,\mathrm{d}}[n]$和$h_{2,\mathrm{d}}[n]$

$$h_{1,2}[n]=\beta_0\cdot d_{1,2}^{-2}[n]=\frac{\beta_0}{\|\boldsymbol{q}_1[n]-\boldsymbol{q}_2[n]\|^2} \tag{3b}$$

$$h_{j,\mathrm{d}}[n]=\beta_0\cdot d_{j,\mathrm{d}}^{-2}[n]=\frac{\beta_0}{\|\boldsymbol{q}_j[n]-\boldsymbol{w}_{\mathrm{d}}\|^2}, j=1,2 \tag{3c}$$

令$P_{\mathrm{s},1}[n]$表示时隙n的S向R_1的发射功率，$P_{\mathrm{s},2}[n]$表示时隙n的S向R_2的发射功率，$P_1[n]$和$P_2[n]$分别表示R_1和R_2的发射功率，它们都受平均功率和最大功率的约束

$$\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} P_{\mathrm{s},j}[n] \le \overline{P_{\mathrm{s}}}, \quad \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} P_j[n] \le \overline{P_j}, \quad j=1,2 \tag{4a}$$

$$0 \le P_{\mathrm{s},j}[n] \le P_{\mathrm{s},\max}, \quad 0 \le P_j[n] \le P_{j,\max}, \quad j=1,2 \tag{4b}$$

此处$\overline{P_{\mathrm{s}}}$, $\overline{P_1}$和$\overline{P_2}$分别表示S, R_1和R_2的平均功率，$P_{\mathrm{s,max}}$, $P_{1,\max}$和$P_{2,\max}$分别表示S, R_1和R_2的峰值功率。如图2所示，根据信息的交替传输特性，因此，对S, R_1和R_2的额外功率约束为

$$P_{\mathrm{s},2}[1]=0, \quad P_1[1]=0, \quad P_2[1]=0 \tag{5a}$$

$$P_{\mathrm{s},1}[n]=0, \quad P_2[n]=0, \quad n=2,4,\cdots,N-1 \tag{5b}$$

$$P_{\mathrm{s},2}[n]=0, \ P_1[n]=0, \ n=3,5,\cdots,N-2 \tag{5c}$$

$$P_{\mathrm{s},1}[N]=0, \quad P_{\mathrm{s},2}[N]=0, \quad P_1[N]=0 \tag{5d}$$

因此，时隙n的S到R_1的可达速率$R_{\mathrm{s},1}[n]$，S到R_2的可达速率$R_{\mathrm{s},2}[n]$可以表示为

$$\begin{aligned} R_{\mathrm{s},j}[n] &= \log_2\left(1+\frac{P_{\mathrm{s},j}[n]\cdot h_{\mathrm{s},j}[n]}{P_k[n]\cdot h_{1,2}[n]+\sigma^2}\right) \\ &= \log_2\left(1+\frac{P_{\mathrm{s},j}[n]\cdot\frac{\gamma_0}{\|\boldsymbol{q}_j[n]-\boldsymbol{w}_{\mathrm{s}}\|^2}}{P_k[n]\cdot\frac{\gamma_0}{\|\boldsymbol{q}_1[n]-\boldsymbol{q}_2[n]\|^2}+1}\right), \\ & j=1,2, \ k=1,2, \ k\ne j \end{aligned} \tag{6}$$

其中，σ^2表示在接收端的加性高斯白噪声功率，$\gamma_0=\dfrac{\beta_0}{\sigma^2}$为参考信噪比。同理，$R_1$到D的可达速率为$R_{1,\mathrm{d}}[n]$，$R_2$到D的可达速率为$R_{2,\mathrm{d}}[n]$可以表示为

$$\begin{aligned} R_{j,\mathrm{d}}[n] &= \log_2\left(1+\frac{P_j[n]\cdot h_{j,\mathrm{d}}[n]}{\sigma^2}\right) \\ &= \log_2\left(1+\frac{P_j[n]\cdot\gamma_0}{\|\boldsymbol{q}_j[n]-\boldsymbol{w}_{\mathrm{d}}\|^2}\right), \quad j=1,2 \end{aligned} \tag{7}$$

假设中继转发策略为解码转发[5]，得到S经过R_1和R_2到D这两条链路的吞吐量表达式

$$R_{\mathrm{s1d}}[n]=\frac{1}{2}\min\left(R_{\mathrm{s},1}[n-1], R_{1,\mathrm{d}}[n]\right), \quad n=2,4,\cdots,N-1 \tag{8}$$

$$R_{\mathrm{s2d}}[n]=\frac{1}{2}\min\left(R_{\mathrm{s},2}[n-1], R_{2,\mathrm{d}}[n]\right), \ n=3,5,\cdots,N \tag{9}$$

为了协调两条中继链路之间的干扰并提高系统吞吐量，本文研究优化无人机中继的轨迹和发射功率分配最大化系统端到端吞吐量。该问题受限于无人机运动约束与防碰撞约束式(1)—式(2)以及发射功率约束式(4)—式(5)，优化变量包括发射功率$\boldsymbol{P}\triangleq\{P_{\mathrm{s},1}[n], P_{\mathrm{s},2}[n], P_1[n], P_2[n], \forall n\}$、无人机的轨迹$\boldsymbol{Q}\triangleq\{\boldsymbol{q}_1[n], \boldsymbol{q}_2[n], \forall n\}$。问题的数学描述为

1)本文主要考虑通过调整无人机的飞行轨迹改变信道的功率增益，最大化飞行全程的平均吞吐量性能。由于小尺度衰落主要刻画无人机在微小范围内移动(厘米级，由载波频率决定)造成的信道增益变化，无人机飞行全程的系统平均吞吐量并不主要由信道的小尺度衰落决定，而是主要由大尺度衰落决定。因此，为简单起见，这里没有考虑小尺度衰落，而仅考虑大尺度衰落。

$$\text{(P1)}\quad \max_{\boldsymbol{P},\boldsymbol{Q}} \frac{1}{N}\left[\sum_{n=1}^{\frac{N-1}{2}} \frac{1}{2}\min\left(R_{\mathrm{s},1}[2n-1], R_{1,\mathrm{d}}[2n]\right) + \sum_{n=1}^{\frac{N-1}{2}} \frac{1}{2}\min\left(R_{\mathrm{s},2}[2n], R_{2,\mathrm{d}}[2n+1]\right)\right]$$
$$\text{s.t.}\quad 式(1)-式(5) \tag{10}$$

由于其目标函数是非凹的，因此问题(P1)是一个非凸优化问题，很难求得最优解。在下一部分，本文提出一种交替最大化方法来求解此问题。

3　无人机中继飞行轨迹和发射功率的联合优化算法设计

首先，把整个问题(P1)的优化变量根据功率和轨迹划分为两块，也就是发射功率分配变量$\boldsymbol{P}$以及轨迹变量$\boldsymbol{Q}$。然后，在每次迭代中，保持一块变量固定，优化另一块变量。具体而言，以迭代的方式解下面两个子问题：子问题1在约束式(4)和式(5)的条件下，给定R_1和R_2的轨迹$\boldsymbol{Q}$去优化变量$\boldsymbol{P}$；子问题2在约束式(1)和式(2)的条件下，给定发射功率$\boldsymbol{P}$去优化变量$\boldsymbol{Q}$；算法交替迭代求解这两个子问题直到收敛。

3.1　发射功率优化

为了方便求解，首先进行以下定义：已知$\gamma_0=\dfrac{\beta_0}{\sigma^2}$，则令$\gamma_{\mathrm{s},j}[n]\triangleq\dfrac{\gamma_0}{\|\boldsymbol{q}_j[n]-\boldsymbol{w}_\mathrm{s}\|^2}$，$\gamma_{1,2}[n]\triangleq\dfrac{\gamma_0}{\|\boldsymbol{q}_1[n]-\boldsymbol{q}_2[n]\|^2}$，$\gamma_{j,\mathrm{d}}[n]\triangleq\dfrac{\gamma_0}{\|\boldsymbol{q}_j[n]-\boldsymbol{w}_\mathrm{d}\|^2}$，其中$j=1,2$。子问题1可以表示为

$$\text{(P2)}\quad \max_{\boldsymbol{P}} \frac{1}{N}\left[\sum_{n=1}^{\frac{N-1}{2}} \frac{1}{2}\min\left(R_{\mathrm{s},1}[2n-1], R_{1,\mathrm{d}}[2n]\right) + \sum_{n=1}^{\frac{N-1}{2}} \frac{1}{2}\min\left(R_{\mathrm{s},2}[2n], R_{2,\mathrm{d}}[2n+1]\right)\right]$$
$$\text{s.t.}\quad 式(4)、式(5) \tag{11}$$

由于目标函数不是凹的，因此问题(P2)不是凸优化问题。为了求解该非凸问题，引入松弛变量$\boldsymbol{\tau_1}\triangleq\left[\tau_1[1],\tau_1[2],\cdots,\tau_1\left[\dfrac{N-1}{2}\right]\right]^{\mathrm{T}}$和$\boldsymbol{\tau_2}\triangleq\left[\tau_2[1],\tau_2[2],\cdots,\tau_2\left[\dfrac{N-1}{2}\right]\right]^{\mathrm{T}}$，上述问题可以转化成

$$\text{(P3)}\quad \max_{\boldsymbol{P},\boldsymbol{\tau}_1,\boldsymbol{\tau}_2} \frac{1}{N}\left[\sum_{n=1}^{\frac{N-1}{2}}\tau_1[n]+\sum_{n=1}^{\frac{N-1}{2}}\tau_2[n]\right] \tag{12a}$$

$$\text{s.t.}\quad \tau_1[n]\le\log_2\left(1+P_{\mathrm{s},1}[n]\gamma_{\mathrm{s},1}[n]\right),\quad n=1 \tag{12b}$$

$$\tau_1[n]\le\log_2\left(1+\frac{P_{\mathrm{s},1}[n]\cdot\gamma_{\mathrm{s},1}[n]}{P_2[n]\cdot\gamma_{1,2}[n]+1}\right),\quad n=3,5,\cdots,N-2 \tag{12c}$$

$$\tau_1[n]\le\log_2\left(1+P_1[n]\gamma_{1,\mathrm{d}}[n]\right),\quad n=2,4,\cdots,N-1 \tag{12d}$$

$$\tau_2[n]\le\log_2\left(1+\frac{P_{\mathrm{s},2}[n]\cdot\gamma_{\mathrm{s},2}[n]}{P_1[n]\cdot\gamma_{1,2}[n]+1}\right),\quad n=2,4,\cdots,N-1 \tag{12e}$$

$$\tau_2[n]\le\log_2\left(1+P_2[n]\gamma_{2,\mathrm{d}}[n]\right),\ n=3,5,\cdots,N\quad 式(4)、式(5) \tag{12f}$$

其中，约束式(12b)—式(12f)是通过对问题(P2)引入松弛变量转化而来的，从而问题(P3)和(P2)等价。对于问题(P3)总存在一个最优解使得式(12b)—式(12f)等式成立。因为约束式(12b)、式(12d)、式(12f)分别相对于$P_{\mathrm{s},1}[n]$, $P_1[n]$, $P_2[n]$是凸的，而式(12c)和式(12e)是非凸约束，所以以上问题是一个非凸问题。下面采用连续凸优化的方法迭代求解(P3)。不等式约束式(12c)和式(12e)的右边可以写成$R_{\mathrm{s},1}[n]$和$R_{\mathrm{s},2}[n]$表达为

$$\begin{aligned}R_{\mathrm{s},j}[n]&=\log_2\left(1+\frac{P_{\mathrm{s},j}[n]\cdot\gamma_{\mathrm{s},j}[n]}{P_k[n]\cdot\gamma_{1,2}[n]+1}\right)\\&=\log_2(1+P_{\mathrm{s},j}[n]\cdot\gamma_{\mathrm{s},j}[n]+P_k[n]\cdot\gamma_{1,2}[n])\\&\quad-\log_2(1+P_k[n]\cdot\gamma_{1,2}[n]),\\&\quad j=1,2,\ k=1,2,\ k\neq j\end{aligned} \tag{13}$$

其中，令$R^l_{\mathrm{s},j}[n]=\log_2(1+P_k[n]\cdot\gamma_{1,2}[n])$。

令$P^r_k[n]$表示$P_k[n]$的第r次迭代，通过利用凹函数的1阶泰勒展开式是其全局上界的属性，在$P^r_k[n]$点进行1阶泰勒展开，得到$R^l_{\mathrm{s},j}[n]$的上界并表示为$R^{\mathrm{lbr}}_{\mathrm{s},j}[n]$

$$\begin{aligned}R^l_{\mathrm{s},j}[n]&=\log_2(1+P_k[n]\cdot\gamma_{1,2}[n])\le R^{\mathrm{lbr}}_{\mathrm{s},j}[n]\\&\triangleq\log_2(1+P^r_k[n]\cdot\gamma_{1,2}[n])+\frac{(\log_2\mathrm{e})\cdot\gamma_{1,2}[n]}{1+P^r_k[n]\cdot\gamma_{1,2}[n]}\\&\quad\cdot(P_k[n]-P^r_k[n])\end{aligned} \tag{14}$$

于是得出不等式约束式(12c)和式(12e)右边的下界。因此描述(P3)的近似问题为

$$\text{(P4)}\quad \max_{\boldsymbol{P},\boldsymbol{\tau}_1,\boldsymbol{\tau}_2} \frac{1}{N}\left[\sum_{n=1}^{\frac{N-1}{2}}\tau_1[n]+\sum_{n=1}^{\frac{N-1}{2}}\tau_2[n]\right] \tag{15a}$$

$$\text{s.t.}\quad \tau_1[n]\le\log_2\left(1+P_{\mathrm{s},1}[n]\gamma_{\mathrm{s},1}[n]\right),\ n=1 \tag{15b}$$

$$\tau_1[n]\le\log_2(1+P_{\mathrm{s},1}[n]\cdot\gamma_{\mathrm{s},1}[n]+P_2[n]\cdot\gamma_{1,2}[n])-R^{\mathrm{lbr}}_{\mathrm{s},1}[n],\quad n=3,5,\cdots,N-2 \tag{15c}$$

$$\tau_1[n]\le\log_2\left(1+P_1[n]\gamma_{1,\mathrm{d}}[n]\right),\quad n=2,4,\cdots,N-1 \tag{15d}$$

$$\tau_2[n] \le \log_2(1+P_{\mathrm{s},2}[n]\gamma_{\mathrm{s},2}[n]+P_1[n]\gamma_{1,2}[n]) - R_{\mathrm{s},2}^{\mathrm{lbr}}[n],\ n=2,4,\cdots,N-1 \tag{15e}$$

$$\tau_2[n] \le \log_2(1+P_2[n]\gamma_{2,\mathrm{d}}[n]),\ n=3,5,\cdots,N \quad 式(4)、式(5) \tag{15f}$$

在(P4)中，目标函数是线性的，约束式(15b)—式(15f)的不等式右边部分相对于$\boldsymbol{P}$是凹的，因此问题(P4)是一个凸优化问题，可以用内点法[20]求解。问题(P4)中的约束式(15c)和式(15e)分别隐含问题(P3)中的约束式(12c)和式(12e)，因此通过求问题(P4)得到的解可以保证是(P3)的可行解。

3.2 轨迹优化

在给定$P_{\mathrm{s},1}[n]$, $P_{\mathrm{s},2}[n]$, $P_1[n]$和$P_2[n]$的情况下，子问题2可以表示为

$$\begin{aligned}(\mathrm{P5})\quad &\max_{\boldsymbol{Q}} \frac{1}{N}\left[\sum_{n=1}^{\frac{N-1}{2}}\frac{1}{2}\min(R_{\mathrm{s},1}[2n-1],R_{1,\mathrm{d}}[2n]) + \sum_{n=1}^{\frac{N-1}{2}}\frac{1}{2}\min(R_{\mathrm{s},2}[2n],R_{2,\mathrm{d}}[2n+1])\right]\\ &\mathrm{s.t.}\quad 式(1)、式(2)\end{aligned} \tag{16}$$

(P5)的目标函数是一个非凹函数，约束式(2c)也是非凸的。为了解决这一问题，引入了松弛变量$\boldsymbol{\mu}_1 \triangleq \left[\mu_1[1],\mu_1[2],\ldots,\mu_1\left[\frac{N-1}{2}\right]\right]^{\mathrm{T}}$ 和$\boldsymbol{\mu}_2 \triangleq \left[\mu_2[1],\mu_2[2],\ldots,\mu_2\left[\frac{N-1}{2}\right]\right]^{\mathrm{T}}$。为了方便计算，进行以下定义，$\gamma_{01} \triangleq P_{\mathrm{s},1}[n]\cdot\gamma_0$，$\gamma_{02} \triangleq P_{\mathrm{s},2}[n]\cdot\gamma_0$，$\gamma_1 \triangleq P_1[n]\cdot\gamma_0$,$\gamma_2 \triangleq P_2[n]\cdot\gamma_0$，进一步考虑以下问题

$$(\mathrm{P6})\quad \max_{\boldsymbol{Q},\boldsymbol{\mu}_1,\boldsymbol{\mu}_2} \frac{1}{N}\left[\sum_{n=1}^{\frac{N-1}{2}}\mu_1[n]+\sum_{n=1}^{\frac{N-1}{2}}\mu_2[n]\right] \tag{17a}$$

$$\mathrm{s.t}\quad \mu_1[n] \le R_{\mathrm{s},1}[n] \triangleq \log_2\left(1+\frac{\gamma_{01}[n]}{\|\boldsymbol{q}_1[n]-\boldsymbol{w}_\mathrm{s}\|^2}\right),\ n=1 \tag{17b}$$

$$\mu_1[n] \le R_{\mathrm{s},1}[n] \triangleq \log_2\left(1+\frac{\dfrac{\gamma_{01}[n]}{\|\boldsymbol{q}_1[n]-\boldsymbol{w}_\mathrm{s}\|^2}}{\dfrac{\gamma_2[n]}{\|\boldsymbol{q}_1[n]-\boldsymbol{q}_2[n]\|^2}+1}\right),\ n=3,5,\cdots,N-2 \tag{17c}$$

$$\mu_1[n] \le R_{1,\mathrm{d}}[n] \triangleq \log_2\left(1+\frac{\gamma_1}{\|\boldsymbol{q}_1[n]-\boldsymbol{w}_\mathrm{d}\|^2}\right),\ n=2,4,\cdots,N-1 \tag{17d}$$

$$\mu_2[n] \le R_{\mathrm{s},2}[n] \triangleq \log_2\left(1+\frac{\dfrac{\gamma_{02}[n]}{\|\boldsymbol{q}_2[n]-\boldsymbol{w}_\mathrm{s}\|^2}}{\dfrac{\gamma_1[n]}{\|\boldsymbol{q}_1[n]-\boldsymbol{q}_2[n]\|^2}+1}\right),\ n=2,4,\cdots,N-1 \tag{17e}$$

$$\mu_2[n] \le R_{2,\mathrm{d}}[n] \triangleq \log_2\left(1+\frac{\gamma_2}{\|\boldsymbol{q}_2[n]-\boldsymbol{w}_\mathrm{d}\|^2}\right),\ n=3,5,\cdots,N \quad 式(1)、式(2) \tag{17f}$$

因此，问题(P5)就转化为(P6)求解。因为约束式(17b)—式(17f)以及式(2c)是非凸约束，所以问题(P6)是非凸优化问题，很难得到最优解。考虑在它的凸可行域内最大化它的目标函数的凹下界，直至收敛停止迭代。令$\{\boldsymbol{q}_1^r[n]\}$和$\{\boldsymbol{q}_2^r[n]\}$分别表示第$r$次迭代所获得的无人机轨迹变量。在第$r$+1次迭代，首先处理约束式(17b)和式(17d)以及式(17f)中$R_{\mathrm{s},1}[n]$, $R_{1,\mathrm{d}}[n]$, $R_{2,\mathrm{d}}[n]$中的非凹性。可以观察到$R_{\mathrm{s},1}[n]$相对于$\boldsymbol{q}_1[n]$是非凹的，但是相对于$\|\boldsymbol{q}_1[n]-\boldsymbol{w}_\mathrm{s}\|^2$是凸的，根据凸函数的1阶泰勒展开式是其全局下界的性质[17]，通过在$\|\boldsymbol{q}_1^r[n]-\boldsymbol{w}_\mathrm{s}\|^2$点进行1阶泰勒展开，得到$R_{\mathrm{s},1}[n]$的下界并表示为$R_{\mathrm{s},1}^{\mathrm{lb}}[n]$，如式(18)所示

$$\begin{aligned}R_{\mathrm{s},1}[n] &= \log_2\left(1+\frac{\gamma_{01}[n]}{\|\boldsymbol{q}_1[n]-\boldsymbol{w}_\mathrm{s}\|^2}\right) \ge R_{\mathrm{s},1}^{\mathrm{lb}}[n]\\ &\triangleq -\frac{\gamma_{01}[n]\cdot\log_2 \mathrm{e}}{\left(\|\boldsymbol{q}_1^r[n]-\boldsymbol{w}_\mathrm{s}\|^2\right)\cdot\left(\|\boldsymbol{q}_1^r[n]-\boldsymbol{w}_\mathrm{s}\|^2+\gamma_{01}[n]\right)}\\ &\quad\cdot\left(\|\boldsymbol{q}_1[n]-\boldsymbol{w}_\mathrm{s}\|^2-\|\boldsymbol{q}_1^r[n]-\boldsymbol{w}_\mathrm{s}\|^2\right)\\ &\quad+\log_2\left(1+\frac{\gamma_{01}[n]}{\|\boldsymbol{q}_1^r[n]-\boldsymbol{w}_\mathrm{s}\|^2}\right)\end{aligned} \tag{18}$$

其中，$R_{\mathrm{s},1}^{\mathrm{lb}}[n]$相对于$\boldsymbol{q}_1[n]$是凹的。同理，$R_{1,\mathrm{d}}[n]$和$R_{2,\mathrm{d}}[n]$分别相对于$\|\boldsymbol{q}_1[n]-\boldsymbol{w}_\mathrm{d}\|^2$和$\|\boldsymbol{q}_2[n]-\boldsymbol{w}_\mathrm{d}\|^2$是凸的，从而得到$R_{1,\mathrm{d}}[n]$和$R_{2,\mathrm{d}}[n]$的下界$R_{1\mathrm{d}}^{\mathrm{lb}}[n]$和$R_{2\mathrm{d}}^{\mathrm{lb}}[n]$分别为

$$\begin{aligned}R_{j,\mathrm{d}}[n] &= \log_2\left(1+\frac{\gamma_j[n]}{\|\boldsymbol{q}_j[n]-\boldsymbol{w}_\mathrm{d}\|^2}\right) \ge R_{j,\mathrm{d}}^{\mathrm{lb}}[n]\\ &\triangleq -\frac{\gamma_j[n]\cdot\log_2 \mathrm{e}}{\left(\|\boldsymbol{q}_j^r[n]-\boldsymbol{w}_\mathrm{d}\|^2\right)\cdot\left(\|\boldsymbol{q}_j^r[n]-\boldsymbol{w}_\mathrm{d}\|^2+\gamma_j[n]\right)}\\ &\quad\cdot\left(\|\boldsymbol{q}_j[n]-\boldsymbol{w}_\mathrm{d}\|^2-\|\boldsymbol{q}_j^r[n]-\boldsymbol{w}_\mathrm{d}\|^2\right)\\ &\quad+\log_2\left(1+\frac{\gamma_j[n]}{\|\boldsymbol{q}_j^r[n]-\boldsymbol{w}_\mathrm{d}\|^2}\right),\ j=1,2\end{aligned} \tag{19}$$

相对于不等式约束式(17c)和式(17e)中的$R_{\mathrm{s},1}[n]$和$R_{\mathrm{s},2}[n]$，可以进行以下处理

$$\begin{aligned}R_{\mathrm{s},j}[n]=&\log_2\left(1+\frac{\frac{\gamma_{0j}[n]}{\|\boldsymbol{q}_j[n]-\boldsymbol{w}_\mathrm{s}\|^2}}{\frac{\gamma_k[n]}{\|\boldsymbol{q}_1[n]-\boldsymbol{q}_2[n]\|^2}+1}\right)\\=&\log_2\left(1+\frac{\gamma_{0j}[n]}{\|\boldsymbol{q}_j[n]-\boldsymbol{w}_\mathrm{s}\|^2}\right.\\&\left.+\frac{\gamma_k[n]}{\|\boldsymbol{q}_1[n]-\boldsymbol{q}_2[n]\|^2}\right)\\&-\log_2\left(1+\frac{\gamma_k[n]}{\|\boldsymbol{q}_1[n]-\boldsymbol{q}_2[n]\|^2}\right),\\&j=1,2,\ k=1,2,\ k\neq j\end{aligned}\tag{20}$$

此处令

$$\begin{aligned}R_{\mathrm{s},j}^b[n]=&\log_2\left(1+\frac{\gamma_{0j}[n]}{\|\boldsymbol{q}_j[n]-\boldsymbol{w}_\mathrm{s}\|^2}\right.\\&\left.+\frac{\gamma_k[n]}{\|\boldsymbol{q}_1[n]-\boldsymbol{q}_2[n]\|^2}\right)\end{aligned}\tag{21}$$

对于以上非凸约束，引入松弛变量$S_{1,2}=\left\{S_{1,2}[n]=\|\boldsymbol{q}_1[n]-\boldsymbol{q}_2[n]\|^2\right\}$，并对其进行1阶泰勒展开得到下界从而得到式(20)减号右边式子上界，同时$R_{\mathrm{s},1}^b[n]$和$R_{\mathrm{s},2}^b[n]$相对于$\|\boldsymbol{q}_1[n]-\boldsymbol{w}_\mathrm{s}\|^2$和$\|\boldsymbol{q}_1[n]-\boldsymbol{q}_2[n]\|^2$以及$\|\boldsymbol{q}_2[n]-\boldsymbol{w}_\mathrm{s}\|^2$是凸的，因此，根据凸函数的二元1阶泰勒展开式是全局下界这一性质，得到$R_{\mathrm{s},1}^b[n]$和$R_{\mathrm{s},2}^b[n]$的下界$R_{\mathrm{s},1}^{\mathrm{br}}[n]$以及$R_{\mathrm{s},2}^{\mathrm{br}}[n]$：

$$\begin{aligned}R_{\mathrm{s},j}^b[n]=&\log_2\left(1+\frac{\gamma_{0j}[n]}{\|\boldsymbol{q}_j[n]-\boldsymbol{w}_\mathrm{s}\|^2}+\frac{\gamma_k[n]}{\|\boldsymbol{q}_1[n]-\boldsymbol{q}_2[n]\|^2}\right)\\&\geq R_{\mathrm{s},j}^{\mathrm{br}}[n]\triangleq C_{\mathrm{s},j}^l[n]-D_{\mathrm{s},j}^l[n]\\&\cdot\left(\|\boldsymbol{q}_j[n]-\boldsymbol{w}_\mathrm{s}\|^2-\|\boldsymbol{q}_j^r[n]-\boldsymbol{w}_\mathrm{s}\|^2\right)-F_{\mathrm{s},j}^l[n]\\&\cdot\left(\|\boldsymbol{q}_1[n]-\boldsymbol{q}_2[n]\|^2-\|\boldsymbol{q}_1^r[n]-\boldsymbol{q}_2^r[n]\|^2\right)\end{aligned}\tag{22}$$

其中

$$\begin{aligned}C_{\mathrm{s},j}^l[n]=&\log_2\left(1+\frac{\gamma_{0j}[n]}{\|\boldsymbol{q}_j^r[n]-\boldsymbol{w}_\mathrm{s}\|^2}\right.\\&\left.+\frac{\gamma_k[n]}{\|\boldsymbol{q}_1^r[n]-\boldsymbol{q}_2^r[n]\|^2}\right)\end{aligned}\tag{23}$$

$$D_{\mathrm{s},j}^l[n]=\frac{\frac{\gamma_{0j}[n]\cdot\log_2\mathrm{e}}{\left(\|\boldsymbol{q}_j^r[n]-\boldsymbol{w}_\mathrm{s}\|^2\right)^2}}{\left(1+\frac{\gamma_{0j}[n]}{\|\boldsymbol{q}_j^r[n]-\boldsymbol{w}_\mathrm{s}\|^2}+\frac{\gamma_k[n]}{\|\boldsymbol{q}_1^r[n]-\boldsymbol{q}_2^r[n]\|^2}\right)}\tag{24}$$

$$F_{\mathrm{s},j}^l[n]=\frac{\frac{\gamma_k[n]\cdot\log_2\mathrm{e}}{\left(\|\boldsymbol{q}_1^r[n]-\boldsymbol{q}_2^r[n]\|^2\right)^2}}{\left(1+\frac{\gamma_{0j}[n]}{\|\boldsymbol{q}_j^r[n]-\boldsymbol{w}_\mathrm{s}\|^2}+\frac{\gamma_k[n]}{\|\boldsymbol{q}_1^r[n]-\boldsymbol{q}_2^r[n]\|^2}\right)}\tag{25}$$

接着再处理约束式(2c)中$\|\boldsymbol{q}_1[n]-\boldsymbol{q}_2[n]\|^2$的非凹性。由于$\|\boldsymbol{q}_1[n]-\boldsymbol{q}_2[n]\|^2$相对于$\boldsymbol{q}_1[n]$和$\boldsymbol{q}_2[n]$是凸的，将其在点$\boldsymbol{q}_1^r[n]$和$\boldsymbol{q}_2^r[n]$处进行1阶泰勒展开，所以问题(P6)的近似问题可以表示为

$$\text{(P7)}\quad\max_{\boldsymbol{Q},\mu_1,\mu_2}\frac{1}{N}\left[\sum_{n=1}^{\frac{N-1}{2}}\mu_1[n]+\sum_{n=1}^{\frac{N-1}{2}}\mu_2[n]\right]\tag{26a}$$

$$\text{s.t.}\quad\mu_1[n]\leq R_{\mathrm{s},1}^{\mathrm{lb}}[n],\ \ n=1\tag{26b}$$

$$\mu_1[n]\leq R_{\mathrm{s},1}^{\mathrm{br}}[n]-\log_2\left(1+\frac{\gamma_2[n]}{S_{1,2}[n]}\right),\quad n=3,5,\cdots,N-2\tag{26c}$$

$$\mu_1[n]\leq R_{1,\mathrm{d}}^{\mathrm{lb}}[n],\ \ n=2,4,\cdots,N-1\tag{26d}$$

$$\mu_2[n]\leq R_{\mathrm{s},2}^{\mathrm{br}}[n]-\log_2\left(1+\frac{\gamma_1[n]}{S_{1,2}[n]}\right),\quad n=2,4,\cdots,N-1\tag{26e}$$

$$\mu_2[n]\leq R_{2,\mathrm{d}}^{\mathrm{lb}}[n],\ n=3,5,\cdots,N\tag{26f}$$

$$d_{\min}^2\leq-\|\boldsymbol{q}_1^r[n]-\boldsymbol{q}_2^r[n]\|^2+2(\boldsymbol{q}_1^r[n]-\boldsymbol{q}_2^r[n])^{\mathrm{T}}\cdot(\boldsymbol{q}_1[n]-\boldsymbol{q}_2[n]),\ \forall n\tag{26g}$$

$$\begin{aligned}&S_{1,2}[n]\leq-\|\boldsymbol{q}_1^r[n]-\boldsymbol{q}_2^r[n]\|^2\\&\quad+2(\boldsymbol{q}_1^r[n]-\boldsymbol{q}_2^r[n])^{\mathrm{T}}\cdot(\boldsymbol{q}_1[n]-\boldsymbol{q}_2[n]),\ \forall n\\&\text{式(1)、式(2a)}-\text{式(2c)}\end{aligned}\tag{26h}$$

其中，式(26b)中的$R_{\mathrm{s},1}^{\mathrm{lb}}[n]$、式(26d)中的$R_{1,\mathrm{d}}^{\mathrm{lb}}[n]$和式(26f)中的$R_{2,\mathrm{d}}^{\mathrm{lb}}[n]$是$\boldsymbol{Q}$的凹函数，约束式(26c)和式(26e)的左边部分相对于$\boldsymbol{Q}$和$S_{1,2}[n]$是联合凹的，并且式(26g)和式(26h)的右侧相对于$\boldsymbol{Q}$是线性的，因此问题(P7)是凸的，可以通过内点法解出$\boldsymbol{q}_1[n]$和$\boldsymbol{q}_2[n]$最优解。由于问题(P7)的约束条件式(26b)—式(26f)隐含了问题(P6)的约束条件式(17b)—式(17f)，通过求解问题(P7)得到的解保证是问题(P6)的可行解。因此问题(P6)目标值的获得，通过解决问题(P7)在第$r+1$次迭代的解，且必须不小于在第r次迭代中获得相应的目标值，由于问题(P6)的目标值上方有界，因此解决问题(P6)的迭代被保证收敛。

整个算法交替求解子问题1和子问题2直至收敛。所提算法的复杂度主要集中在轨迹优化部分，该部分复杂度为$O\left((N)^{3.5}\right)\log_2(1/\varepsilon)$[15]，因此整体算法的复杂度为$O\left(K_1\left((N)^{3.5}\right)\log_2(1/\varepsilon)\right)$，其中

K_1表示整体算法迭代的次数。具体的算法流程如图3所示，算法描述如下。

算法：联合轨迹优化和功率分配算法

步骤1 初始化可行轨迹变量$\boldsymbol{q}_1^0$和$\boldsymbol{q}_2^0$, $R_{\rm sum}^0=0$, $r=0$，误差阈值$\varepsilon=10^{-2}$；

步骤2 用给定的$\boldsymbol{q}_1^r$和$\boldsymbol{q}_2^r$解决问题(P4)，得到解表示为$P_{{\rm s},1}^{r+1}$, $P_{{\rm s},2}^{r+1}$, P_1^{r+1}, P_2^{r+1}；

步骤3 用给定的$P_{{\rm s},1}^{r+1}$, $P_{{\rm s},2}^{r+1}$, P_1^{r+1}, P_2^{r+1}，以及$\boldsymbol{q}_1^r$和$\boldsymbol{q}_2^r$去解问题(P7)，得到解表示为$\boldsymbol{q}_1^{r+1}$和$\boldsymbol{q}_2^{r+1}$；且得到整个系统吞吐量即目标函数值$R_{\rm sum}^{r+1}$；

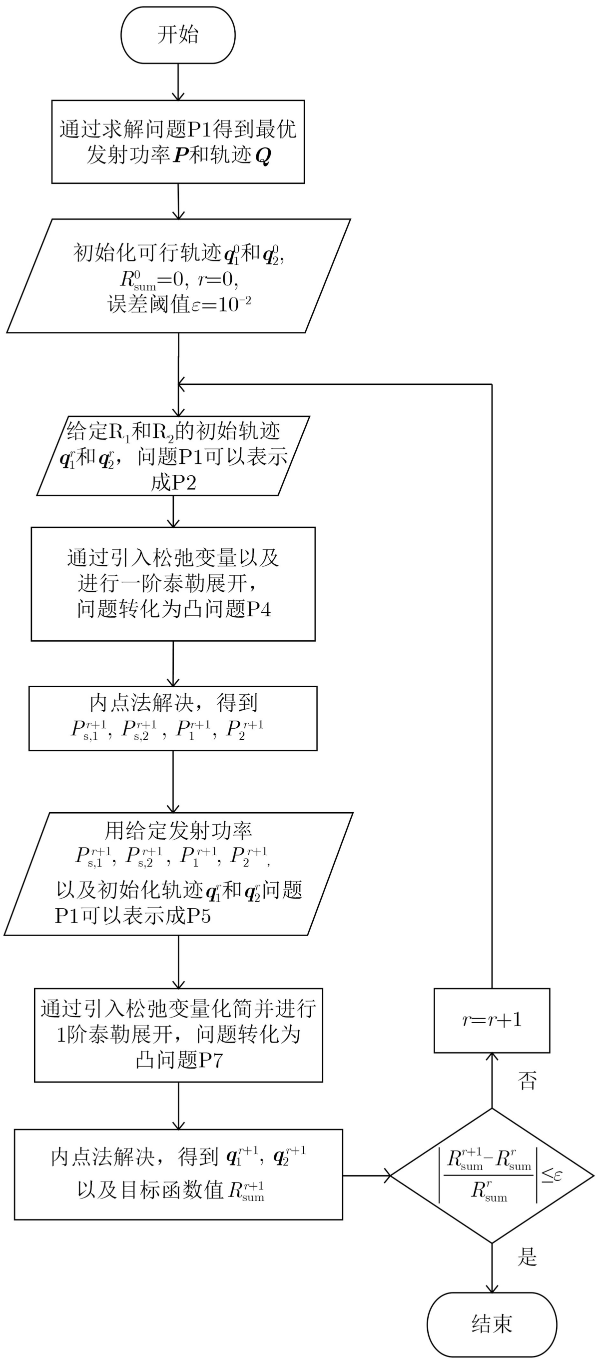

图 3 问题求解示意图

步骤4 $r=r+1$；

步骤5 重复步骤2—步骤4，直到$\left|\dfrac{R_{\rm sum}^{r+1}-R_{\rm sum}^r}{R_{\rm sum}^r}\right|\le\varepsilon$。

4 仿真结果与分析

本节给出仿真结果来验证本文提出的轨迹和发射功率联合优化的性能，并且和以下3种基准方案作对比：

(1) 只优化轨迹方案。在这个方案中$P_{{\rm s},1}[n]$, $P_{{\rm s},2}[n]$, $P_1[n]$和$P_2[n]$每个时隙都分配相等的发射功率，例如$P_{{\rm s},1}[n]=P_{{\rm s},2}[n]=\overline{P_{\rm s}}$，$P_1[n]=\overline{P_1}$，$P_2[n]=\overline{P_2}$, $\forall n$，且可以通过迭代求解(P7)直至收敛从而得到$\rm R_1$和$\rm R_2$的轨迹。

(2) 只优化功率方案。这个方案中$\rm R_1$和$\rm R_2$会依次从起点以最大速度直线飞到终点，如果飞行时间T足够，$\rm R_1$和$\rm R_2$会在终点上方保持静止，因此，此方案获得的轨迹由线段组成。

(3) 中继静止方案。在这个方案中$\rm R_1$和$\rm R_2$分别保持静止于$[450,0,100]^{\rm T}$和$[550,0,100]^{\rm T}$，且$P_{{\rm s},1}[n]$, $P_{{\rm s},2}[n]$, $P_1[n]$和$P_2[n]$在每个时隙设置为固定值，例如$P_{{\rm s},1}[n]=P_{{\rm s},2}[n]=\overline{P_{\rm s}}$，$P_1[n]=\overline{P_1}$，$P_2[n]=\overline{P_2}$，$\forall n$。

在仿真中，设置S到D之间的距离为1000 m，坐标分别为$[0,0,0]^{\rm T}$和$[1000,0,0]^{\rm T}$。$\rm R_1$的起点坐标为$[450,500,100]^{\rm T}$，终点坐标为$[450,-500,100]^{\rm T}$，$\rm R_2$的起点坐标和终点坐标分别为$[550,500,100]^{\rm T}$和$[550,-500,100]^{\rm T}$。上述坐标的单位均为m。参考距离$d_0=1$ m的参考性噪比$\gamma_0=80$ dB，$\rm R_1$和$\rm R_2$的最大速度$V_{\max}=10$ m/s，$\rm R_1$和$\rm R_2$之间的最小距离$d_{\min}=10$ m，最小飞行高度$h_{\min}=100$ m，最大飞行高度$h_{\max}=150$ m，令$\overline{P_{\rm s}}=\overline{P_1}=\overline{P_2}=\overline{P}$，$P_{{\rm s},\max}=P_{1,\max}=P_{2,\max}=P_{\max}$, $P_{\max}=4\overline{P}$，时隙长度$d_t=5$ s，算法中的阈值$\varepsilon=10^{-2}$。首先，描述无人机在不同飞行持续时间T条件下不同方案获得的$\rm R_1$和$\rm R_2$轨迹。因为中继静止方案的轨迹只包含两个点，所以没有给出这种方案的轨迹结果。图4展示了当无人机持续飞行时间为$T=105$ s且$\overline{P}=10$ dBm时，在不同方案下无人机在水平面内的飞行轨迹。此处，优化得到的无人机飞行高度均为100 m。可以观察到，联合优化方案和只优化轨迹方案所获得的$\rm R_1$和$\rm R_2$的飞行轨迹是相似的，由于T并不是足够大，所以$\rm R_1$和$\rm R_2$会以最大速度飞到终点。具体而言，两个无人机从初始位置以弧形路径飞行到终点位置，并且在飞行过程中$\rm R_1$和$\rm R_2$分别靠近S和D。相比之下，对于只优化功率的方案，$\rm R_1$和$\rm R_2$都保持较直的飞行轨迹，这种差异表明了所提出的方案能更好地在各个链路之间保持平衡。

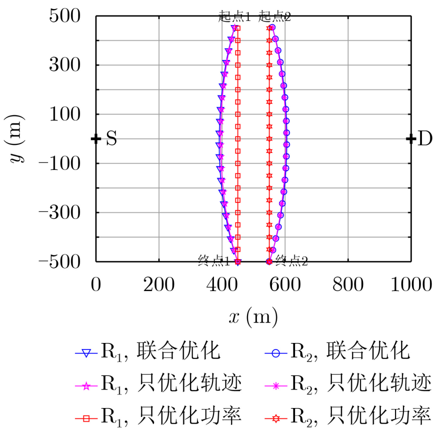

图 4 $T=105$ s时无人机的飞行轨迹

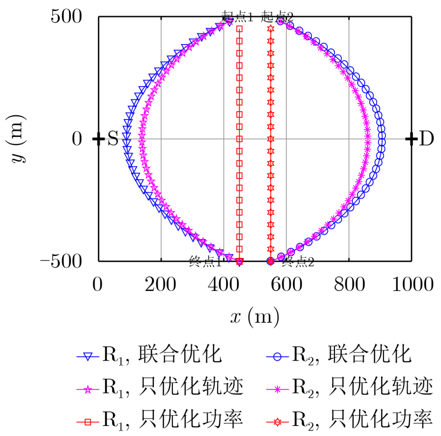

图 5 $T=205$ s时无人机的飞行轨迹

图5展示了当无人机持续飞行时间为$T=205$ s且$\overline{P}=10$ dBm时，不同的方案所获得的无人机的飞行轨迹。由于图5的飞行持续时间T大于图4的飞行持续时间，因此有更多的自由度用于无人机飞行轨迹优化。仿真图显示联合优化方案和只优化轨迹方案有相似的趋势，R_1和R_2都是从各自的起点沿着一条弧线飞到终点。具体来说，在这两种方案中，R_1从起点位置出发先朝着S飞行一段时间然后再朝R_2方向飞向终点位置，R_2则是先靠近D，然后再朝靠近R_1的位置以弧形路线飞到最终位置。相对于只优化轨迹方案，联合优化方案中R_1轨迹的最左端更靠近S，并且R_2轨迹的最右端更靠近D。R_1飞得更靠近S，以便于从S接收尽可能多的数据；R_2则飞得更靠近D，这样能够尽可能把接收到的数据信息发送到D。

图6展示了表示$T=205$ s且$\overline{P}=10$ dBm时，联合优化方案下$P_{s,1}[n]$, $P_{s,2}[n]$, $P_1[n]$和$P_2[n]$的功率分配情况。由于半双工的约束，S, R_1以及R_2是交替传输信息的，因此出现发射功率交替为0情况。通过结合图5的飞行轨迹图，可以观察到，在从$t=0$ s到$t=55$ s这期间，R_1先靠近S飞行，R_2先靠近D飞行，分配给S到R_1的功率明显大于S到R_2的功率，显然，R_1比R_2得到的功率多。R_2在从$t=60$ s到$t=140$ s这段时间，分配给S到R_2的功率比S到R_1的功率要多，R_2比R_1得到的功率多。从$t=145$ s到飞行结束，分配给S到R_1的功率大于S到R_2的功率，R_1分配功率大于R_2分配功率。通过结合R_1和R_2的飞行轨迹，给S, R_1以及R_2分配不同的功率，能够更好地协调各个链路之间的干扰问题，同时提高频谱利用率，实现吞吐量最大化。

图7显示了不同方案的端到端吞吐量随平均功率$\overline{P}$的趋势图，此时$T=205$ s。可以看到这几种方案的吞吐量都随着$\overline{P}$增加。另外，也可以看出双中继联合优化方案的吞吐量总是胜过单中继方案[9,15–17]。

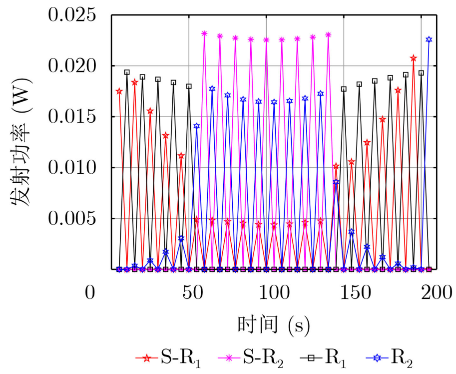

图 6 $T=205$ s时联合优化方案的源端和无人机端的功率分配

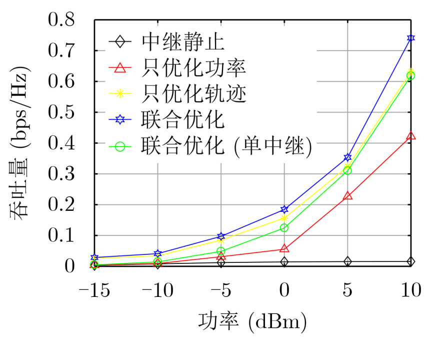

图 7 吞吐量随初始功率P的变化图

并且，在双中继情况下，联合优化方案的吞吐量优于其他3种方案。这是因为联合优化方案有更多的设计自由度去优化吞吐量。以上结果表明双无人机交替中继通信能有效提高频谱效率，对其进行联合轨迹和发射功率优化能进一步提高吞吐量。

5　结束语

本文为无人机中继通信系统提出了一种交替中继策略。为了协调无人机中继链路之间的干扰，提高系统的吞吐量，研究联合优化无人机中继的轨迹和源端、无人机中继的发射功率以最大化系统的端到端吞吐量。提出了一种基于交替最大化和连续凸优化方法的有效算法来求解涉及的优化问题。仿真

结果表明双无人机交替中继系统的吞吐量性能优于传统的单无人机中继系统，并且所提轨迹与功率联合优化算法的吞吐量性能明显优于只优化轨迹和只优化功率分配的基准方案。

参 考 文 献

[1] 达新宇, 张宏伟, 胡航, 等. 认知无人机网络中次级链路吞吐量优化研究[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(8): 1934–1941. doi: 10.11999/JEIT200056.
DA Xinyu, ZHANG Hongwei, HU Hang, *et al*. Throughput optimization of secondary link in cognitive UAV network[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(8): 1934–1941. doi: 10.11999/JEIT200056.

[2] 张广驰, 曾志超, 崔苗, 等. 无线供电混合多址接入网络的资源分配[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(12): 3013–3019.
ZHANG Guangchi, ZENG Zhichao, CUI Miao, *et al*. Resource allocation for wireless powered hybrid multiple access networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(12): 3013–3019.

[3] ZENG Yong, ZHANG Rui, and LIM T J. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2016, 54(5): 36–42. doi: 10.1109/MCOM.2016.7470933.

[4] LYU Jiangbin, ZENG Yong, and ZHANG Rui. Cyclical multiple access in UAV-aided communications: A throughput-delay tradeoff[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2016, 5(6): 600–603. doi: 10.1109/LWC.2016.2604306.

[5] LYU Jiangbin, ZENG Yong, ZHANG Rui, *et al*. Placement optimization of UAV-mounted mobile base stations[J]. *IEEE Communications Letters*, 2017, 21(3): 604–607. doi: 10.1109/LCOMM.2016.2633248.

[6] ZHAN Cheng, ZENG Yong, and ZHANG Rui. Energy-efficient data collection in UAV enabled wireless sensor network[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2018, 7(3): 328–331. doi: 10.1109/LWC.2017.2776922.

[7] ZENG Yong, XU Xiaoli, and ZHANG Rui. Trajectory design for completion time minimization in UAV-enabled multicasting[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(4): 2233–2246. doi: 10.1109/TWC.2018.2790401.

[8] LIU Tianyu, CUI Miao, ZHANG Guangchi, *et al*. 3D trajectory and transmit power optimization for UAV-enabled multi-link relaying systems[J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2021, 5(1): 392–405. doi: 10.1109/TGCN.2020.3048135.

[9] ZENG Yong, ZHANG Rui, and LIM T J. Throughput maximization for UAV-enabled mobile relaying systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2016, 64(12): 4983–4996. doi: 10.1109/TCOMM.2016.2611512.

[10] ZHANG Guangchi, LI Quanzhong, ZHANG Qi, *et al*. Signal-to-interference-plus-noise ratio-based multi-relay beamforming for multi-user multiple-input multiple-output cognitive relay networks with interference from primary network[J]. *IET Communications*, 2015, 9(2): 227–238. doi: 10.1049/iet-com.2014.0494.

[11] LUO Liping, ZHANG Ping, ZHANG Guangchi, *et al*. Outage performance for cognitive relay networks with underlay spectrum sharing[J]. *IEEE Communications Letters*, 2011, 15(7): 710–712. doi: 10.1109/LCOMM.2011.051011.110426.

[12] CHEN Junting and GESBERT D. Optimal positioning of flying relays for wireless networks: A LOS map approach[C]. 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC), Paris, France, 2017: 1–6.

[13] CHEN Yunfei, FENG Wei, and ZHENG Gan. Optimum placement of UAV as relays[J]. *IEEE Communications Letters*, 2018, 22(2): 248–251. doi: 10.1109/LCOMM.2017.2776215.

[14] WU Qingqing, ZENG Yong, and ZHANG Rui. Joint trajectory and communication design for multi-UAV enabled wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(3): 2109–2121. doi: 10.1109/TWC.2017.2789293.

[15] WU Qingqing, ZENG Yong, and ZHANG Rui. Joint trajectory and communication design for UAV-enabled multiple access[C]. GLOBECOM 2017-2017 IEEE Global Communications Conference, Singapore, 2017: 1–6.

[16] ZHANG Guangchi, Wu Qingqing, CUI Miao, *et al*. Securing UAV communications via joint trajectory and power control[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(2): 1376–1389. doi: 10.1109/TWC.2019.2892461.

[17] ZHANG Shuhang, ZHANG Hongliang, HE Qichen, *et al*. Joint trajectory and power optimization for UAV relay networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2018, 22(1): 161–164. doi: 10.1109/LCOMM.2017.2763135.

[18] ZHANG Guangchi, YAN Haiqiang, ZENG Yong, *et al*. Trajectory optimization and power allocation for multi-hop UAV relaying communications[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 48566–48576. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2868117.

[19] HUANG Chuan and CUI Shuguang. On the alternative relaying Gaussian diamond channel with conferencing links[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(2): 758–768. doi: 10.1109/TWC.2013.010413.120278.

[20] BOYD S and VANDENBERGHE L. Convex Optimization[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.

张广驰：男，1982年生，教授，研究方向为新一代无线通信技术.
陈　娇：女，1995年生，硕士生，研究方向为新一代无线通信技术.
崔　苗：女，1978年生，讲师，研究方向为新一代无线通信网络.
陈　伟：男，1979年生，高级工程师，研究方向为重大地质灾害防灾减灾与地下水风险管控.
张　景：男，1974年生，教授，研究方向为星地融合通信组网传输技术.

责任编辑：马秀强