

引用格式:廖乃稳,何攀峰,张余,等.面向隐蔽侦察任务的无人机中继通信频谱资源优化方法[J].信息对抗技术,2022,1(2):65-73. [LIAO Naiwen, HE Panfeng, ZHANG Yu, et al. Spectrum resource optimization method of UAV-relaying communication for covert reconnaissance mission[J]. Information Countermeasure Technology, 2022, 1(2):65-73. (in Chinese)]

# 面向隐蔽侦察任务的无人机中继通信频谱资源优化方法

廖乃稳,何攀峰,张余\*,梁涛

(国防科技大学第六十三研究所,江苏南京 210007)

**摘要** 战场环境下,无人机因其自身辐射被敌侦收而产生安全威胁,并容易对其他通信网络产生干扰。为提高无人机安全执行战场侦察任务时的侦察信息传输速率,提出面向隐蔽侦察任务的无人机中继通信频谱资源优化方法,通过功率控制避免被敌方反侦测,并利用无人机中继增大系统通信速率,通过频谱资源优化达到无有害干扰通信的目的。同时提出了基于块坐标下降法与连续凸近似法相结合的频谱资源联合优化算法,通过对带宽分配、发射功率和无人机轨迹等变量的联合优化获得次优解。仿真结果表明:与基准策略相比,联合优化算法具有更高的信息传输速率。

**关键词** 无人机中继;隐蔽侦察;频谱资源优化;块坐标下降法;连续凸近似

**中图分类号** TP 925 **文献标志码** A **文章编号** 2097-163X(2022)02-0065-10

**DOI** 10.12399/j.issn.2097-163x.2022.02.005

## Spectrum resource optimization method of UAV-relaying communication for covert reconnaissance mission

LIAO Naiwen, HE Panfeng, ZHANG Yu\*, LIANG Tao

(The Sixty-third Research Institute, National University of Defense Technology, Nanjing 210007, China)

**Abstract** In the battlefield environment, unmanned aerial vehicles (UAVs) pose a security threat due to their own radiation being detected by the enemy, and may interfere with other communication networks. To improve the transmission rate when UAV safely executes reconnaissance mission in battlefield, spectrum resource optimization method of UAV-relaying communication was proposed. Through power control and UAV-relaying, reconnaissance system could avoid being detected by the enemy and increase the transmission rate at the same time. Spectrum resource optimization achieved the purpose of communication without harmful interference. Through the joint optimization of bandwidth allocation, transmission power and UAV trajectory, a spectrum resource optimization algorithm based on block coordinate descent and successive convex approximation method was proposed to obtain the suboptimal solution. Simulation results verified that, compared with the benchmark strategy, the joint optimization algorithm had a higher information transmission rate.

收稿日期:2022-03-09

修回日期:2022-03-24

通信作者:张余, E-mail: zhyu63@163.com

**作者简介:**廖乃稳(1992—),男,硕士研究生,研究方向为通信与信息处理;何攀峰(1986—),男,博士,工程师,研究方向为无线网络、频谱管理;张余(1983—),男,博士,副研究员,研究方向为电磁频谱技术;梁涛(1961—),男,博士,研究员,研究方向为通信抗干扰

**Keywords** UAV relay; covert reconnaissance; spectrum resource optimization; block coordinate descent; successive convex approximation

## 0 引言

无人机自出现以来,因其成本相对低廉、自主性强,零伤亡等特点<sup>[1]</sup>,在联合作战中执行的任务越来越多,主要包括侦察<sup>[2]</sup>、火力攻击<sup>[3-4]</sup>、诱骗<sup>[5-6]</sup>和电子干扰等<sup>[7]</sup>,并逐渐呈现出代替有人战斗机成为未来空战主导的趋势<sup>[8]</sup>。无人机机动性强,覆盖范围广,能快速部署到任务区域,可以弥补卫星侦察有限时空到达的不足<sup>[9]</sup>。无人机的飞行高度使其同样能够获得良好的视距信道质量,在克服遮挡、地球曲率影响的同时,相比卫星侦察具有更好的成本优势。无人机的作战部署也存在相应的问题:一方面,无人机实施抵近侦察任务时,即使是小型隐身无人机,其电磁辐射也容易被敌方截获,面临被摧毁的风险;另一方面,无人机高机动性使其经常在多个现存无线通信网络间机动,容易与其他无线通信网络产生用频冲突。因此,控制无人机发射功率,既是实施隐蔽侦察的前提条件,也是在无线网络条件下无干扰通信的重要基础。当无人机执行战场临时辅助通信任务时,若为其分配固定的频谱资源,将降低频谱利用率,造成频谱资源的浪费,因此,与现有无线通信网络共享频谱是更为合理的选择。如何在确保无人机安全的前提下,在任务时间内传输尽可能多的侦察信息是一个值得研究的课题。

无固定通信设施的场景下,采用无人机中继是战场信息传输的重要应用方式<sup>[10]</sup>,它可以大幅延伸可靠通信距离,使战场前沿与后方紧密相连。文献[11]研究了战场无人机中继系统的应用场景、潜在优势和需求。无人机的灵活部署,为多种场景的中继通信服务提供了支撑。文献[12]提出战场无人机通信中继的自主机动方案,无人机通过信号到达时间差来估计用户位置,再机动至最佳的中继位置进行辅助中继通信。针对通信链路易遭破坏的情况,文献[13]提出利用无人机多跳中继辅助战场通信网络快速构建方法。在战场环境下,信息传输除了链路的鲁棒性外,往往还存在保密通信的需求,无人机由于其自身携能、带宽的有限性,其通信频谱资源优化主要结合无人机航迹,从带宽和功率开展研究,以增

加信息安全传输速率,提高频谱利用率或者能量效率。文献[14-15]在用户和窃听者都在地面时,分别针对空地与地空信道差异和存在主用户的情况下,通过无人机轨迹和功率优化,提高合法链路质量,降低潜在窃听链路质量,以提高安全传输速率。此外,利用辅助干扰,增加合法用户与窃听者链路增益的差异以提升安全传输速率也得到了研究。文献[16-17]针对存在窃听者的情况,在无人机为地面 D2D 通信中继时,利用接收机对窃听者辅助干扰,联合优化干扰功率和无人机位置,通过训练深度神经网络,以确定无人机最大安全传输速率的位置。文献[18]采用引入协作无人机作为移动干扰器的方式,通过联合优化源无人机和干扰无人机的轨迹和发射功率来最大化安全传输速率。由于窃听者往往是非合作用户,难以确知具体位置,文献[19]在窃听者位置信息不完全的情况下,根据估计的窃听者位置概率密度函数优化发射源和中继无人机功率来最大化安全传输速率,利用泰勒展开和迭代算法,获得干扰信息不完全情况下安全传输速率的次优解,同时减少了算法复杂度。文献[20]在窃听者主动发送干扰信号以降低合法传输信道质量时,提出块坐标下降和逐次凸优化的无人机轨迹与传输功率联合优化算法,以最大化上下行链路的安全通信速率。文献[21]将无人机轨迹的优化扩展到三维,增加了无人机的自由度,更加符合现实情况。在目前的研究中,对无人机中继通信的应用场景、安全策略及资源优化等方面有很好的启示,但研究面向隐蔽侦察任务无人机共享现有用户频谱的不多,在充满威胁的战场环境下,还有待结合实际情况做进一步研究。

综上所述,现有研究主要集中在安全环境下无人机自身传输网络的资源优化,很少考虑无人机因自身辐射被敌侦收所产生的安全威胁,以及对现有无线通信网络的干扰影响。特别是在复杂战场环境背景下,多种无线通信网络相互交织,无人机机动性使其容易与现有其他无线通信网络产生互扰。因此,低辐射通信的频谱资源优化对无人机中继网络显得尤为重要。本文针对无人机执行战场隐蔽侦察任务,构建隐蔽侦察系

统模型,在确保自身安全与不对现有用户通信产生干扰的条件下,通过信号中继和带宽、功率、轨迹的联合优化,最大化任务时间内无人机的信息传输量。由于优化问题是非凸的,难以求得全局最优解,本文通过块坐标下降(block coordinate descent, BCD)法和连续凸近似(successive convex approximation, SCA)法相结合的频谱资源联合优化算法,以高效迭代求得次优解。

## 1 系统模型

### 1.1 隐蔽侦察系统模型描述

在隐蔽侦察系统模型中(如图1所示),战场上有进攻分队M,为准确判断前方敌情,呼叫无人机进行空中支援侦察。小型隐身侦察无人机S前出,对侦察目标O实施侦察。为控制电磁辐射,避免被侦察目标O侦收,侦察无人机无法与控制中心直接通信,侦察信息通过中继无人机R回传至控制中心C。由于侦察任务的临时性和战场频谱资源有限性,无人机难以分配专用频谱资源,以重叠型(underlay)的模式共享现有无线网络的下行频谱资源,并将干扰门限设置为现有网络的接收机灵敏度。因此无人机的信号辐射到达敌方侦察设备或进攻分队接收机时的强度不会超过其灵敏度,避免了被敌发现而暴露企图或对现有通信产生干扰。无人机与控制中心为合作关系,可以准确获取其位置信息。无人机与侦察目标和进攻分队之间是非合作关系,其位置、接收机灵敏度等信息通过其他情报渠道获知。出于避障和安全的需要,假设侦察和中继2架无人机在执行任务的过程中高度均为 $H$ ,侦察无人机S在侦察目标上空以半径 $R_0$ 、速度 $v_0$ 作匀速圆周运动。中继无人机R在适当位置徘徊,协助侦察无人机S实时回传侦察信息。

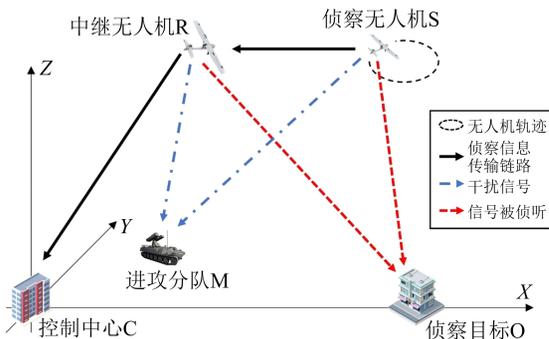


图1 系统模型

Fig. 1 System model

为便于分析,以控制中心为圆点,控制中心与侦察目标的连线为 $X$ 轴建立三维笛卡尔坐标系。不失一般性地,假设侦察目标的坐标为 $\omega_0 = (x_0, 0, 0)$ ,进攻分队的坐标为 $\omega_M = (x_M, y_M, 0)$ 。由于时间的连续性,会涉及无穷多个变量,难以处理,为将其转换成可处理形式,需将其离散化。将任务总时间 $T$ 均分成 $N$ 个时隙,每个时隙长度为 $\tau = T/N$ ,只要 $N$ 足够大,就可以在1个时隙内将无人机的状态与位置近似看作不变。

### 1.2 问题构建

中继无人机采用解码转发(decode-and-forward, DF)的工作方式,在其中一个信道上接收侦察无人机的信号,重新编码后将其以一定的功率在另一个信道上发射出去。

假设在第 $n$ 个时隙,侦察无人机坐标为 $\omega_s = (x_0 + R_0 \sin \frac{v_0 n \tau}{R_0}, R_0 \cos \frac{v_0 n \tau}{R_0}, H)$ ,中继无人机坐标为 $\omega_r = (x_r[n], y_r[n], z_r[n])$ 。地面控制中心与无人机及无人机之间的信道可为视距信道<sup>[22]</sup>,按自由空间路径损耗模型计算传输衰减,则无人机-无人机和无人机-控制中心的信息传输链路的信道增益可表示为:

$$h[n] = \beta_0 d^{-\alpha} [n] \quad (1)$$

式中, $n \in \mathcal{N}$ ,  $\mathcal{N} = \{1, \dots, N\}$ ,  $\beta_0$ 表示参考距离为1 m处的信道功率增益, $d[n]$ 为第 $n$ 时隙通信收发端的距离, $\alpha$ 为环境指数衰减因子。

侦察无人机到中继无人机侦察信息传输链路的瞬时传输速率为:

$$R_s[n] = \rho[n] B \ln \left( 1 + \frac{p_s[n] h_{sr}[n]}{\rho[n] B \sigma^2} \right) \quad (2)$$

式中, $B$ 为系统总带宽, $\rho[n]$ 和 $h_{sr}[n]$ 分别为第 $n$ ( $n \in \mathcal{N}$ )时隙侦察无人机到中继无人机侦察信息传输链路的带宽分配系数和信道增益, $p_s[n]$ 为第 $n$ 时隙侦察无人机的发射功率, $\sigma^2$ 为环境噪声功率谱密度。

侦察无人机的信号经衰减传至侦察目标接收机时的信号强度为:

$$I_{so}[n] = p_s[n] h_{so}[n] \quad (3)$$

式中, $h_{so}[n]$ 为第 $n$ 时隙侦察无人机到侦察目标链路的信道增益。侦察无人机的信号经衰减传至进攻分队接收时的信号强度为:

$$I_{sm}[n] = p_s[n] h_{sm}[n] \quad (4)$$

式中, $h_{sm}[n]$ 为第 $n$ 时隙侦察无人机到进攻分队

链路的信道增益。中继无人机到控制中心侦察信息传输链路的瞬时传输速率为:

$$R_R[n] = (1 - \rho[n])B \ln \left( 1 + \frac{p_R[n]h_{RC}[n]}{(1 - \rho[n])B\sigma^2} \right) \quad (5)$$

式中,  $(1 - \rho[n])B$ ,  $h_{RC}[n]$  和  $p_R[n]$  分别为第  $n$  ( $n \in \mathcal{N}$ ) 时隙中继无人机到控制中心侦察信息传输链路的带宽、信道增益和发射功率。

中继无人机信号经衰减到达侦察目标接收机时的信号强度为:

$$I_{RO}[n] = p_R[n]h_{RO}[n] \quad (6)$$

式中,  $h_{RO}[n]$  为第  $n$  时隙中继无人机到侦察目标链路的信道增益。中继无人机信号经衰减到达进攻分队接收机时的信号强度为:

$$I_{RM}[n] = p_R[n]h_{RM}[n] \quad (7)$$

式中,  $h_{RM}[n]$  为第  $n$  时隙中继无人机到进攻分队链路的信道增益。

为达到信号不被侦察目标侦收和不对进攻分队产生干扰的目的, 考虑最坏的情况, 即无人机的发射信号全部落入侦察目标和进攻分队的接收机带宽中。因此, 侦察无人机与中继无人机信号传至侦察目标与进攻分队处时, 信号强度均不能超过其接收机灵敏度, 否则将被侦察目标发现而导致侦察行动失败或者对进攻分队产生干扰, 有:

$$I_{SO}[n] \leq \theta_O \quad (8)$$

$$I_{RO}[n] \leq \theta_O \quad (9)$$

$$I_{SM}[n] \leq \theta_M \quad (10)$$

$$I_{RM}[n] \leq \theta_M \quad (11)$$

式中,  $\theta_O$  为侦察目标接收机灵敏度,  $\theta_M$  为进攻分队接收机灵敏度。同时, 无人机也会受到其自身飞行参数的限制, 假设中继无人机为固定翼无人机, 无法悬停, 必须保持一定的飞行速度, 则有:

$$v_{\min} \leq \|v[n]\| \leq v_{\max} \quad (12)$$

$$\|a[n]\| \leq a_{\max} \quad (13)$$

$$\|w_R[n+1] - w_R[n]\| = v[n]\tau + \frac{1}{2}a[n]\tau^2 \quad (14)$$

$$v[n+1] = v[n] + a[n]\tau \quad (15)$$

式中, 中继无人机速度  $v[n] = (v_x[n], v_y[n])$ , 加速度  $a[n] = (a_x[n], a_y[n])$ ,  $n \in \mathcal{N}$ 。  $v_{\max}$ ,  $v_{\min}$  和  $a_{\max}$  分别为无人机最大飞行速度、最小飞行速度和最大加速度。

### 1.3 问题模型

无人机侦察系统有 2 条信息传输链路, 即侦察无人机到中继无人机侦察信息传输链路与中

继无人机到控制中心侦察信息传输链路, 系统信息传输速率由其较小者决定, 即系统瞬时传输速率为  $\eta[n] = \min\{R_S[n], R_R[n]\}$ , 在任务时间内可以传输的信息量为  $\sum_{n=1}^N \eta[n]\tau$ 。当存在战场威胁与无干扰通信要求时, 在确保无人机辐射信号不被敌方侦收的前提下, 尽可能提高系统传输速率, 最大化侦察信息传输量。因此, 本文求解问题表述为无人机侦察信息传输量最大化问题, 即:

$$\begin{cases} \max_{\rho, p_R, W_R, \eta} \sum_{n=1}^N \eta[n]\tau \\ \text{s. t. C1: } I_{SO}[n] \leq \theta_O \\ \text{C2: } I_{RO}[n] \leq \theta_O \\ \text{C3: } I_{SM}[n] \leq \theta_M \\ \text{C4: } I_{RM}[n] \leq \theta_M \\ \text{C5: } v_{\min} \leq \|v[n]\| \leq v_{\max} \\ \text{C6: } \|a[n]\| \leq a_{\max} \\ \text{C7: } \|w_R[n+1] - w_R[n]\| = \\ \quad v[n]\tau + \frac{1}{2}a[n]\tau^2 \\ \text{C8: } v[n+1] = v[n] + a[n]\tau \\ \text{C9: } \eta[n] \leq R_R[n] \\ \text{C10: } \eta[n] \leq R_S[n] \\ \text{C11: } p_S[n] \leq p_{S, \max} \\ \text{C12: } p_R[n] \leq p_{R, \max} \\ \text{C13: } 0 \leq \rho[n] \leq 1 \end{cases} \quad (16)$$

式中,  $\rho = \{\rho[1], \dots, \rho[N]\}$ ,  $p_R = \{p_R[1], \dots, p_R[N]\}$ ,  $W_R = \{w_R[1], \dots, w_R[N]\}$ ,  $\eta = \{\eta[1], \dots, \eta[N]\}$ 。C1~C4 表示无人机辐射信号到达侦察目标或进攻分队处的强度不能超过其接收机灵敏度的约束; C5~C6 表示无人机不能超过其飞行参数的物理约束; C7 表示无人机间隔 1 个时隙位置变化量的约束; C8 表示无人机速度在下一个时隙的约束; C9~C10 表示系统速率  $\leq$  中继无人机到控制中心链路和侦察无人机到中继无人机链路传输速率的约束; C11~C12 表示无人机最大发射功率的约束,  $p_{S, \max}$  和  $p_{R, \max}$  分别为侦察机和中继机的最大发射功率; C13 为带宽分配系数的约束。

不难发现, 优化目标函数不是关于变量  $\rho[n]$ ,  $p_R[n]$  和  $w_R[n]$  的凸函数, 约束条件 C2, C4, C9 和 C10 相对待优化变量也是非凸的。因此, 式(16)不是一个凸问题, 不能用现有的凸优化方法直接解决。寻找优化问题式(16)的最佳解决方案具有挑战性。

## 2 联合迭代优化算法设计

由于优化变量带宽、功率和轨迹间存在耦合性,可利用块坐标下降法来解决式(16)的非凸问题,通过固定部分变量块来更新其中 1 个变量块,因此,可将待优化问题分解成 3 个子问题,通过交替迭代优化来获得次优解。

### 2.1 带宽分配系数的优化

在第  $k+1$  次迭代中,基于前一次迭代优化结果,已知的无人机飞行轨迹  $w_R^{(k)}[n]$  和发射功率  $p_R^{(k)}[n], p_S^{(k)}[n]$ , 优化无人机的带宽分配系数,优化问题式(16)可表示为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \max_{\rho, \eta} \sum_{n=1}^N \eta[n] \tau \\ \text{s. t. } \text{C1.1: } 0 \leq \rho[n] \leq 1 \\ \text{C1.2: } \eta[n] \leq (1 - \rho[n]) \cdot \\ \quad \text{Blb} \left( 1 + \frac{p_R^{(k)}[n] h_{RC}^{(k)}[n]}{(1 - \rho[n]) B \sigma^2} \right) \\ \text{C1.3: } \eta[n] \leq \rho[n] \cdot \\ \quad \text{Blb} \left( 1 + \frac{p_S^{(k)}[n] h_{SR}^{(k)}[n]}{\rho[n] B \sigma^2} \right) \end{array} \right. \quad (17)$$

对于约束 C1.2 和 C1.3, 可求得其右边函数相对于  $\rho[n]$  的二阶导数均小于 0, 为凹函数, 即约束 C1.2 和 C1.3 为凸约束。目标函数和约束 C1.1 为线性约束, 所有约束和目标函数都是凸函数, 这是一个标准凸问题, 可以利用现有凸优化方法来解决。

### 2.2 发射功率的优化

由于侦察无人机在固定轨迹上飞行, 其发射功率  $p_S^{(k)}[n]$  由式(8)限制。在优化得到无人机飞行轨迹  $w_R^{(k)}[n]$  和带宽分配系数  $\rho^{(k)}[n]$  的基础上, 优化中继无人机发射功率, 优化问题式(16)可表示为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \max_{p_R, \eta} \sum_{n=1}^N \eta[n] \tau \\ \text{s. t. } \text{C2.1: } I_{RO}[n] \leq \theta_O \\ \text{C2.2: } I_{RM}[n] \leq \theta_M \\ \text{C2.3: } \eta[n] \leq (1 - \rho^{(k)}[n]) \cdot \\ \quad \text{Blb} \left( 1 + \frac{p_R[n] h_{RC}^{(k)}[n]}{(1 - \rho^{(k)}[n]) B \sigma^2} \right) \\ \text{C2.4: } \eta[n] \leq \rho^{(k)}[n] \cdot \\ \quad \text{Blb} \left( 1 + \frac{p_S^{(k)}[n] h_{SR}^{(k)}[n]}{\rho^{(k)}[n] B \sigma^2} \right) \\ \text{C2.5: } p_R[n] \leq p_{R, \max} \end{array} \right. \quad (18)$$

因为  $\text{lb}(1+kx)$  是关于  $x$  是凹函数, 故 C2.3

相对于  $p_R[n]$  为凸约束。又因为约束 C2.1, C2.2, C2.4 和 C2.5 为线性约束, 不改变问题的凹凸性, 所以式(18)是一个标准凸问题, 可以利用现有凸优化方法来解决。

### 2.3 飞行轨迹的优化

在优化得到无人机带宽分配系数  $\rho^{(k)}[n]$  和发射功率  $p_R^{(k)}[n], p_S^{(k)}[n]$  的基础上, 优化无人机飞行轨迹, 此时, 优化问题式(16)可表示为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \max_{w_R, V, A, \eta} \sum_{n=1}^N \eta[n] \tau \\ \text{s. t. } \text{C3.1: } I_{RO}[n] \leq \theta_O \\ \text{C3.2: } I_{RM}[n] \leq \theta_M \\ \text{C3.3: } v_{\min} \leq \|v[n]\| \leq v_{\max} \\ \text{C3.4: } \|a[n]\| \leq a_{\max} \\ \text{C3.5: } \|w_R[n+1] - w_R[n]\| = \\ \quad v[n] \tau + \frac{1}{2} a[n] \tau^2 \\ \text{C3.6: } v[n+1] = v[n] + a[n] \tau \\ \text{C3.7: } \eta[n] \leq R_R[n] \\ \text{C3.8: } \eta[n] \leq R_S[n] \end{array} \right. \quad (19)$$

式中,  $V = \{v[1], \dots, v[N]\}$ ,  $A = \{a[1], \dots, a[N]\}$ 。目标函数和约束 C3.7, C3.8 相对于  $w_R[n]$  是非凸的, 其余均为凸约束。引入松弛条件  $l[n], m[n]$ , 优化问题式(19)可表示为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \max_{w_R, V, A, \eta, l, m} \sum_{n=1}^N \eta[n] \tau \\ \text{s. t. } \text{C3.1} \sim \text{C3.6} \\ \text{C3.9: } l[n] \leq \frac{1}{\|w_S[n] - w_R[n]\|^a} \\ \text{C3.10: } \eta[n] \leq \rho^{(k)}[n] \cdot \\ \quad \text{Blb} \left( 1 + \frac{p_S^{(k)}[n] \beta_0 l[n]}{\rho^{(k)}[n] B \sigma^2} \right) \\ \text{C3.11: } m[n] \leq \frac{1}{\|w_R[n]\|^a} \\ \text{C3.12: } \eta[n] \leq (1 - \rho^{(k)}[n]) \cdot \\ \quad \text{Blb} \left( 1 + \frac{p_R^{(k)}[n] \beta_0 m[n]}{(1 - \rho^{(k)}[n]) B \sigma^2} \right) \end{array} \right. \quad (20)$$

式中,  $l = \{l[1], \dots, l[N]\}$ ,  $m = \{m[1], \dots, m[N]\}$ 。当约束 C3.9 和 C3.11 同时取等号时, 问题式(20)与原问题有相同局部最优解。约束 C3.10 和 C3.12 的右侧函数分别相对于  $l[n]$  和

$m[n]$ 是凹函数,即 C3. 10 和 C3. 12 为凸约束。约束 C3. 9 和 C3. 11 的右侧函数分别相对于  $\|\omega_S[n]-\omega_R[n]\|^\alpha$  和  $\|\omega_R[n]\|^\alpha$  是凸的,利用一阶泰勒展开在其任意确定点展开得到其函数的下界:

$$\frac{1}{\|\omega_S[n]-\omega_R[n]\|^\alpha} \geq \frac{1}{\|\omega_S[n]-\omega_R^{(k)}[n]\|^\alpha} - \frac{\|\omega_S[n]-\omega_R[n]\|^\alpha - \|\omega_S[n]-\omega_R^{(k)}[n]\|^\alpha}{\|\omega_S[n]-\omega_R^{(k)}[n]\|^{2\alpha}} \triangleq \varphi_{lb}[n] \quad (21)$$

$$\frac{1}{\|\omega_R[n]\|^\alpha} \geq \frac{1}{\|\omega_R^{(k)}[n]\|^\alpha} - \frac{\|\omega_R[n]\|^\alpha - \|\omega_R^{(k)}[n]\|^\alpha}{\|\omega_R^{(k)}[n]\|^{2\alpha}} \triangleq \phi_{lb}[n] \quad (22)$$

其中,  $\varphi_{lb}[n]$  和  $\phi_{lb}[n]$  分别表示定义第  $n$  时隙一阶泰勒展开式近似函数下界的表达式。式(20)可重写为:

$$\begin{cases} \max_{w_R, V, A, \eta, l, m} \sum_{n=1}^N \eta[n] \tau \\ \text{s. t. C3. 1} \sim \text{C3. 6, C3. 10, C3. 12} \\ \text{C3. 13: } l[n] \leq \varphi_{lb}[n] \\ \text{C3. 14: } m[n] \leq \phi_{lb}[n] \end{cases} \quad (23)$$

当约束 C3. 10, C3. 12, C3. 13 和 C3. 14 同时取等号时,式(23)与式(19)能得到相同的局部最优解。经过以上设计处理,目标函数和约束条件都是凸函数,可以用现有方法解决。

#### 2.4 优化算法理论分析与流程

由于无人机发射功率和可用带宽有限,限制了链路传输速率  $R_S[n]$  和  $R_R[n]$  的无限增长,因此目标函数有上界。

令  $U(\rho, p_R, w_R)$ ,  $U_\rho(\rho, p_R, w_R)$ ,  $U_{p_R}(\rho, p_R, w_R)$  和  $U_{w_R}(\rho, p_R, w_R)$  分别表示式(16), 式(17), 式(18)和式(19)的目标值,即侦察信息传输量。经过带宽分配系统优化,有:

$$U_\rho(\rho^{(k)}, p_R^{(k)}, W_R^{(k)}) \leq U_\rho(\rho^{(k+1)}, p_R^{(k)}, W_R^{(k)}) = U(\rho^{(k+1)}, p_R^{(k)}, W_R^{(k)}) \quad (24)$$

因为  $\rho^{(k+1)}$  是经式(17)优化后得到的结果。经过发射功率优化,有:

$$U_{p_R}(\rho^{(k+1)}, p_R^{(k)}, W_R^{(k)}) \leq U_{p_R}(\rho^{(k+1)}, p_R^{(k+1)}, W_R^{(k)}) = U(\rho^{(k+1)}, p_R^{(k+1)}, W_R^{(k)}) \quad (25)$$

因为式(18)为标准凸问题,  $p_R^{(k+1)}$  是经优化后得到的结果。经过飞行轨迹优化,有:

$$U_{w_R}(\rho^{(k+1)}, p_R^{(k+1)}, W_R^{(k)}) \stackrel{(26.a)}{=} U_{w_R}^l(\rho^{(k+1)}, p_R^{(k+1)}, W_R^{(k)}) \stackrel{(26.b)}{\leq} U_{w_R}^{lb}(\rho^{(k+1)}, p_R^{(k+1)}, W_R^{(k+1)}) \stackrel{(26.c)}{\leq} U(\rho^{(k+1)}, p_R^{(k+1)}, W_R^{(k+1)}) \quad (26)$$

由于式(20)与式(19)具有相同最优解,等式(26. a)成立。由于  $W_R^{(k+1)}$  为经式(23)优化后的结果,不等式(26. b)成立。由于式(23)求得的目标值总是原问题式(19)的下界,不等式(26. c)成立。因此,有下式成立

$$U(\rho^{(k)}, p_R^{(k)}, W_R^{(k)}) \leq U(\rho^{(k+1)}, p_R^{(k+1)}, W_R^{(k+1)}) \quad (27)$$

即经过一轮迭代后,求得了无人机频谱资源分配的近似优化问题,但能保证算法的目标值是不减的。基于上述分析,又因为  $U(\rho, p_R, w_R)$  有上界,故算法收敛。

无人机频谱资源联合交替迭代优化算法如下:

步骤 1 初始化无人机的带宽分配系数  $\rho^{(k)}[n]$ 、发射功率  $p_R^{(k)}[n]$  和飞行轨迹  $w_R^{(k)}[n]$ , 迭代次数  $k=1$ , 最大迭代次数  $K$ , 误差精度  $\epsilon$ ;

步骤 2 循环;

步骤 3 固定无人机发射功率  $p_R^{(k)}[n]$ 、飞行轨迹  $w_R^{(k)}[n]$ , 利用凸优化技术求解式(17), 得到第  $k+1$  次迭代的最优解  $\rho^*[n]$ , 更新  $\rho^{(k+1)}[n] = \rho^*[n]$ ;

步骤 4 固定无人机带宽分配系数  $\rho^*[n]$ 、飞行轨迹  $w_R^{(k)}[n]$ , 利用凸优化技术求解式(18), 得到第  $k+1$  次迭代的最优解  $p_R^*[n]$ , 更新  $p_R^{(k+1)}[n] = p_R^*[n]$ ;

步骤 5 固定无人机带宽分配系数  $\rho^*[n]$ 、发射功率  $p_R^*[n]$ , 利用凸优化技术求解式(19), 得到第  $k+1$  次迭代的最优解  $w_R^*[n]$ , 更新  $w_R^{(k+1)}[n] = w_R^*[n]$ ;

步骤 6 更新  $\{\rho[n], p_R[n], w_R[n]\}^k = \{\rho[n], p_R[n], w_R[n]\}^{k+1}$ ,  $k+1=k$ , 计算传输的信息量  $I^{k+1}$ ;

步骤 7 直到  $I^{k+1} - I^k \leq \epsilon$  或者  $k > K$ ;

步骤 8 输出带宽分配系数  $\rho[n]$ 、发射功率  $p_R[n]$  和飞行轨迹  $w_R[n]$ 。

算法的复杂度主要取决于步骤 3~5, 当使用内点法时, 其最坏情况下的算法复杂度为  $O(n^{3.5}) \lg(1/\epsilon)^{[23]}$ , 其中,  $n$  为优化变量的个数,  $\epsilon$  为求解精度。优化问题式(17)包含变量  $\rho[n]$ , 而优化问题式(18)包含变量  $p_R[n]$ , 优化问题式

(19)包含变量  $w_R[n]$ ,  $v[n]$  和  $a[n]$ , 且  $w_R[n]$ ,  $v[n]$  和  $a[n]$  各包含  $2N$  个变量。故算法总的计算复杂度为  $O((6N)^{3.5})\lg(1/\epsilon)$ 。

### 3 仿真与分析

将带宽分配系数、功率和轨迹联合优化算法表示为“联合优化”, 并与2个基准算法进行对比, 其中带宽平均分配, 功率和轨迹联合优化算法为“基准1”; 中继无人机功率固定为  $0.5 \text{ mW}$ , 带宽分配系数和轨迹联合优化算法为“基准2”。

仿真参数参照文献[22]和[24]的数值, 设置如下: 侦察目标坐标为  $(1000, 0, 0)$ , 进攻分队坐标为  $(0, 100, 0)$ , 信息传输总带宽  $B=0.1 \text{ MHz}$ , 噪声功率谱密度  $\sigma^2 = -169 \text{ dBm/Hz}$ , 侦察目标和进攻分队的接收机灵敏度为  $-110 \text{ dBm}$ , 侦察无人机和中继无人机的最大发射功率为  $10 \text{ dBm}$ , 侦察无人机飞行半径  $R_0=50 \text{ m}$ , 速度  $v_0=15 \text{ m/s}$ , 无人机的飞行高度为  $H=200 \text{ m}$ ,  $1 \text{ m}$  参考距离信道增益为  $-60 \text{ dB}$ 。中继无人机起点坐标为  $(100, 50, H)$ , 终点坐标为  $(100, -50, H)$ , 初始轨迹为半径  $50 \text{ m}$  的圆周,  $v_{\max}=30 \text{ m/s}$ ,  $v_{\min}=3 \text{ m/s}$ ,  $a_{\max}=8 \text{ m/s}^2$ 。带宽分配系数初始化为  $0.5$ , 中继无人机功率初始化为  $0.5 \text{ mW}$ , 任务时间设置为  $T=30 \text{ s}$ 。

图2~4分别展示了不同策略下无人机优化后的发射功率、带宽分配系数、水平轨迹和系统传输速率的结果。由图2可知, 侦察无人机受到侦察目标接收机灵敏度的制约, 其发射功率必须在  $0.425 \text{ mW}$  以下。“基准1”策略带宽分配系数锁定在  $0.5$ , 中继无人机只能通过发射功率与飞行轨迹的优化, 以获取更大的系统传输速率来提高任务时间内的信息传输量。由于中继无人机发射功率还受到侦察目标和进攻分队接收机灵敏度的约束, 由图2可知, 中继无人机的发射功率始终大于侦察无人机, 因此中继无人机的位置应当远离控制中心, 靠近侦察无人机(如图3所示), 以提高系统的传输速率。“基准2”策略可以对带宽资源的分配进行优化, 但因为中继无人机的发射功率较小, 无人机的中继位置不应离控制中心过远(如图3所示), 主要通过带宽分配的优化(如图2所示)提升系统的传输速率, 增加任务时间内的信息传输量。“联合优化”策略因可以同时优化带宽、发射功率和飞行轨迹, 中继无人机的发射功率比“基准2”的大, 因此无人机轨迹相比“基准

2”也离控制中心更远(如图3所示)。通过联合频谱分配、发射功率和飞行轨迹的优化, 进一步增大了系统的传输速率, 增加了任务时间内的信息传输量, 直观地验证了所提算法能够有效调动有限频谱资源, 进行合理优化, 提高系统的传输速率。

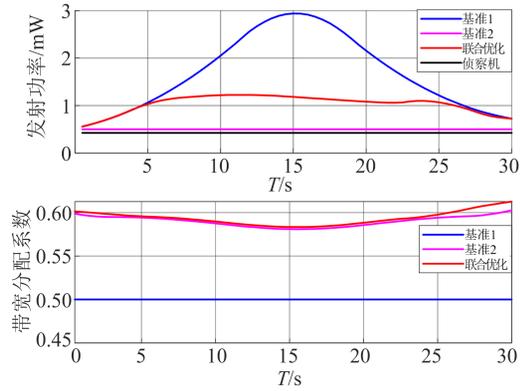


图2 不同策略下带宽和功率优化结果

Fig. 2 Bandwidth and power optimization results using different strategies

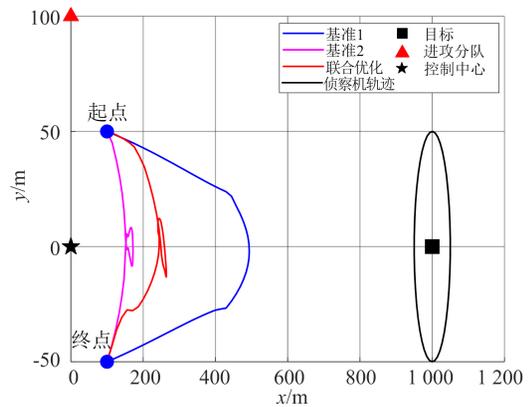


图3 不同策略下无人机水平轨迹优化结果

Fig. 3 Horizontal trajectory optimization results of UAV using different strategies

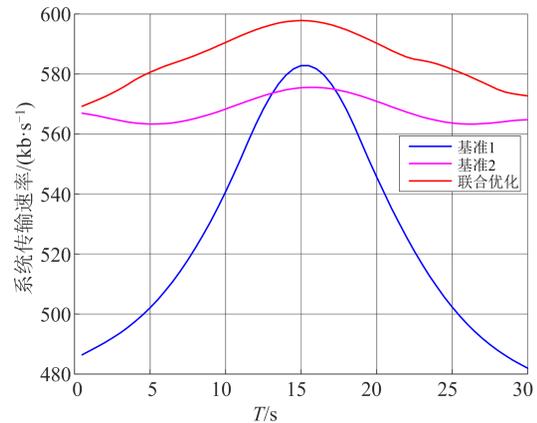


图4 不同策略下系统传输速率优化结果

Fig. 4 System transmission rate optimization results using different strategies

图5展示了不同策略的信号到达侦察目标和进攻分队接收机处的强度变化情况。由图可知,无论何种策略,由于侦察无人机与进攻分队的距离均大于与侦察目标的距离,因此侦察目标接收处的信号强度大于进攻分队处,而中继无人机的情况则相

反。同时,不同策略下无人机信号到达侦察目标或者进攻分队接收机时,其信号强度均不超过相应接收机的灵敏度。因此侦察信息的传输不会被侦察目标侦收或者对进攻分队的正常通信产生影响,达到隐蔽侦察和与进攻分队频谱共享的目的。

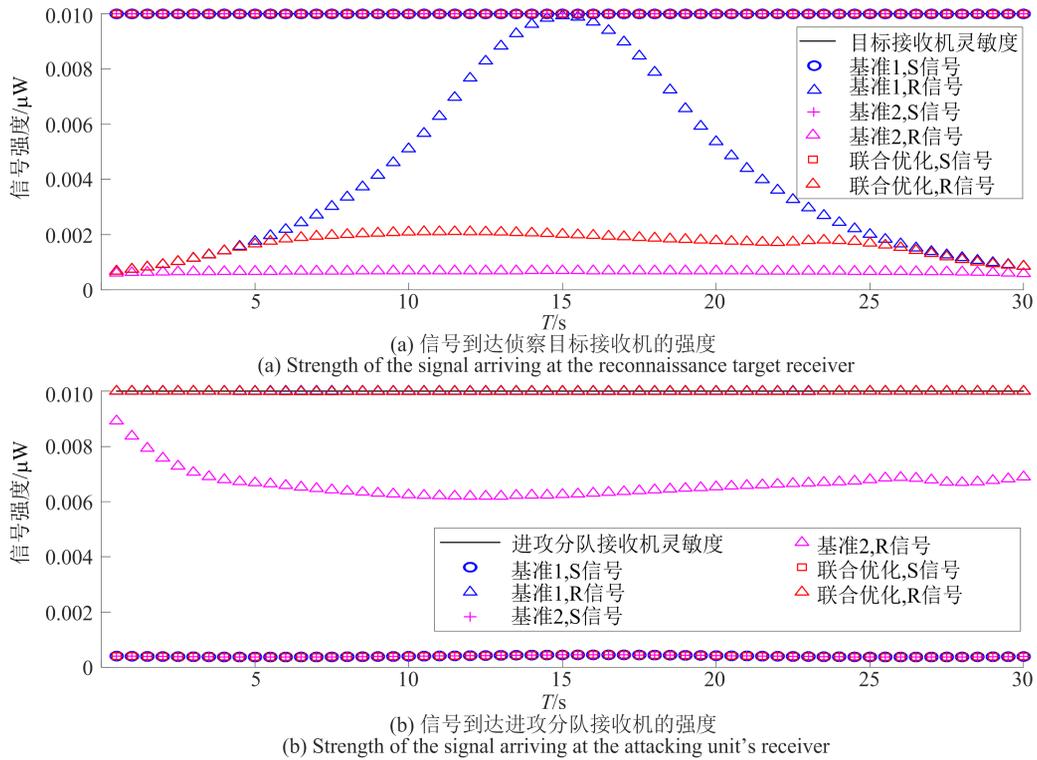


图5 不同策略的信号在相应接收机处的强度

Fig. 5 Signal strength of different strategies at the corresponding receiver

图6展示了不同策略下系统传输信息量的收敛情况。由图可知,3种优化策略的传输信息量经过数次迭代后都得到了提升并最终收敛。算法的迭代误差精度设置为 $10^{-3}$ 时,“基准1”策略迭代6次后收敛,“联合优化”策略迭代10次后收敛。“基准2”策略在迭代3次后不再有明显变化,可认为其已收敛,算法计算为12次迭代后收敛。虽然本文所提算法收敛所需的迭代次数较多,但优化效果最好,即传输的信息量最多。所提算法传输的信息量比“基准1”提高了11%,比“基准2”提高了3%,说明了所提算法的有效性。

图7展示了在本文所提算法下,中继无人机水平轨迹基于连续凸近似方法的迭代变化情况。由图7可知,初始轨迹为靠近控制中心的半圆,由于距离关系,侦察无人机到中继无人机通信链路的信息速率远低于中继无人机到控制中心通信链路的信息速率。通过连续凸近似算法的优化,中继无人机的轨迹向侦察目标方向偏移,即提升

了侦察无人机到中继无人机通信链路的信息速率、降低了中继无人机到控制中心链路的信息速率。由于系统的传输速率是由2条通信链路的较小者决定的,因此中继无人机轨迹的偏移,会增大系统的传输速率,直到2条链路的传输速率相等时,系统的传输速率达到最大,轨迹不再变化。从图中可以看出,最后3次迭代的轨迹几乎重叠,从轨迹放大方框也可以看出,随着迭代次数的增加,无人机的轨迹最终趋于收敛,不再有明显变化,说明了连续凸近似方法的有效性。

图8展示了不同策略的系统传输信息量随最大可发射功率的变化情况。由图8可知,当最大可发射功率小于1.2 mW时,随着最大可发射功率的增大,不同策略的系统传输信息量也都随之增加,但是当最大可发射功率增大到一定值时,系统的传输信息量不再随之增加。这是因为当最大可发射功率较小时,无人机信号不会被侦察目标侦收或者对进攻分队的正常通信产生干扰,

即没有受到约束;随着最大可发射功率的进一步增大,无人机的发射功率会受到侦察目标或者进攻分队的制约,实际发射功率达不到最大可发射功率,系统传输的信息量也无法增加。“基准 1”策略因带宽分配系数不可调,受任务时间的限制,无人机位置还未达到系统最大速率处时就必须返回,轨迹优化空间有限,因此在最大可发射功率相同时传输的信息量也较少。“基准 2”和“联合优化”策略带宽分配系数可调,当无人机的最大可发射功率较小时,因为还未受到侦察目标和进攻分队的限制,两者的传输信息量基本一致,随着最大可发射功率超过 1.2 mW,“基准 2”策略实际的发射功率受到初始状态的影响,不可再增长。“联合优化”策略则可以随着轨迹的迭代,进一步增大实际的发射功率,信息传输量也进一步增加。与 3 个基准策略相比,本文所提算法可以获得最好的传输信息量增益,这是因为所提算法联合优化带宽、功率和飞行轨迹,为系统性能的提升提供了更大的自由度。

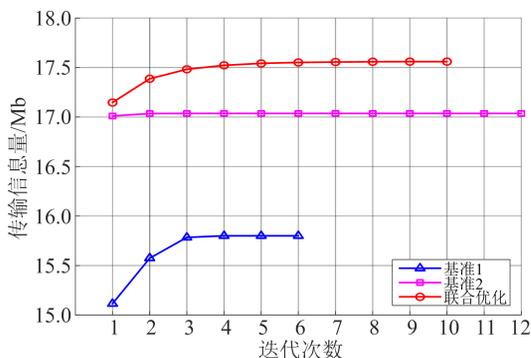


图 6 不同策略的算法迭代曲线  
Fig. 6 Iterative curve of algorithm with different strategies

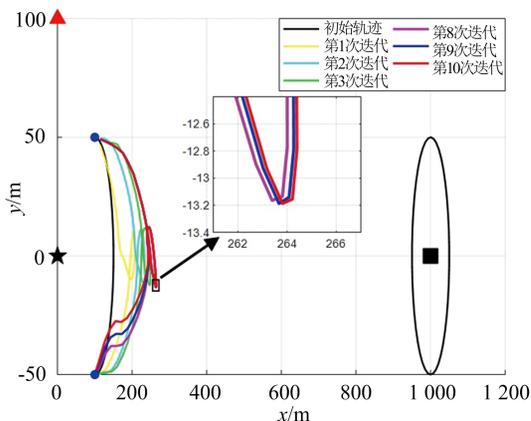


图 7 本文算法无人机水平轨迹随迭代次数的变化  
Fig. 7 Variation of the UAV’s horizontal trajectory with the number of iterations

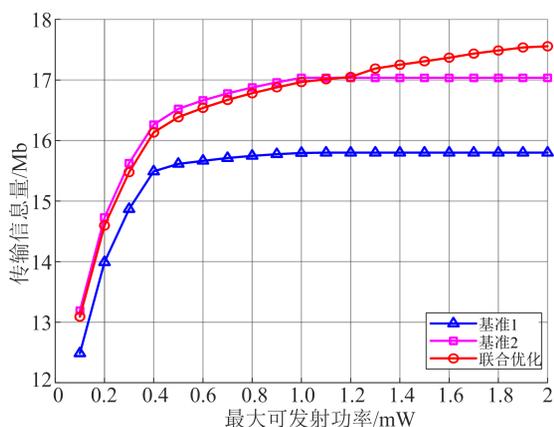


图 8 不同策略下传输信息量随最大可发射功率的变化  
Fig. 8 Transmitted information amount of different strategies versus maximum transmissible power

### 4 结束语

本文对双无人机执行隐蔽侦察任务的信息传输问题进行了研究。采用解码转发的中继方式,在传输信号不被侦察目标截获和不对现有用户产生干扰的前提下,通过对带宽分配、功率和轨迹等频谱资源的联合优化,最大化任务时间的侦察信息传输量。将待优化的非凸复杂问题通过块坐标下降法和连续凸近似法转化为一系列凸问题加以解决。仿真结果表明,相较于功率、轨迹联合优化(基准 1)与带宽分配系数、轨迹联合优化(基准 2),本文所提算法提高了系统信息传输速率,增强了系统性能。在今后的工作中,将进一步考虑多个侦察目标及其移动性、频谱资源的动态性和多无人机等条件下,频谱资源的优化问题,增强不同策略算法的仿真对比工作。

### 参考文献

[1] LI R, MA H. Research on UAV swarm cooperative reconnaissance and combat technology[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Unmanned Systems. Harbin, China; IEEE, 2020; 996-999.

[2] WANG T, LI M, ZHANG M Y. Cooperative coverage reconnaissance of multi-uav[C]// Proceedings of the 5th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC). Chongqing, China; IEEE, 2020; 1647-1651.

[3] XIA T, HE J, ZOU X, et al. Research and application of high-efficiency attack method based on statistical model for search and strike integrated UAV[C]// Proceedings of the 2nd International Conference on

- Education, Knowledge and Information Management. Xiamen, China: IEEE, 2021: 636-639.
- [4] ZHANG S, JIE L I, ZHANG Z. The simulation of attack area for suicide UAV based on flight data[C]// Proceedings of 2019 IEEE International Conference on Unmanned Systems. Beijing, China: IEEE, 2019: 152-156.
- [5] FANG F, YE G, ZHANG H, et al. Energy-efficient joint user association and power allocation in a heterogeneous network[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(11): 7008-7020.
- [6] NI W, ZHANG X. Optimized application of multi-uav electromagnetic deception jamming[C]// Proceedings of the 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference. Chongqing, China: IEEE, 2020: 1658-1662.
- [7] XU J, GUO Q, XIAO L, et al. Autonomous decision-making method for combat mission of UAV based on deep reinforcement learning[C]// Proceedings of the 4th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference. Chengdu, China: IEEE, 2019: 538-544.
- [8] LIU Y, DAI H N, WANG Q, et al. Unmanned aerial vehicle for internet of everything: opportunities and challenges [J]. Computer Communications, 2020, 155: 66-83.
- [9] LADOSZ P, OH H, CHEN W H. Optimal positioning of communication relay unmanned aerial vehicles in urban environments[C]// Proceedings of 2016 International Conference on Unmanned Aircraft Systems. Arlington, USA: IEEE, 2016: 1140-1147.
- [10] KIM B S, KIM K I, ROH B S, et al. A new routing protocol for UAV relayed tactical mobile ad hoc networks[C]// Proceedings of 2018 Wireless Telecommunications Symposium. Phoenix, USA: IEEE, 2018: 1-4.
- [11] ZHANG Y, HUANG J, SHI Y, et al. Design of an UAV-based automatic relay system[C]// Proceedings of 2019 Chinese Automation Congress. Hangzhou, China: IEEE, 2019: 4181-4185.
- [12] JEE H, LEE K, LIM J. Autonomous maneuvering of relay UAV for battlefields using TDOA localization [C]// Proceedings of Milcom IEEE Military Communications Conference. Baltimore, USA: IEEE, 2017: 453-458.
- [13] WANG G, CHENG P, LUO H. Fast construction algorithm of cooperative relay network for unmanned aerial vehicle[C]// Proceedings of the 33rd Chinese Control and Decision Conference. Kunming, China: IEEE, 2021: 6869-6874.
- [14] ZHANG G C, WU Q Q, CUI M, et al. Securing UAV communications via joint trajectory and power control[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(2): 1376-1389.
- [15] CAO S N, JIA X D, GUO Y X, et al. Physical layer security communication of cognitive UAV mobile relay network [C]// Proceedings of the 7th International Symposium on Mechatronics and Industrial Informatics. Zhuhai, China: IEEE, 2021: 267-271.
- [16] MAMAGHANI M T, HONG Y. On the performance of low-altitude UAV-enabled secure AF relaying with cooperative jamming and SWIPT[J]. IEEE Access, 2019, 7: 153060-153073.
- [17] LIU N, TANG X, ZHANG R, et al. A DNN framework for secure transmissions in UAV-relaying networks with a jamming receiver[C]// Proceedings of the 20th International Conference on Communication Technology. Nanning, China: IEEE, 2020: 703-708.
- [18] LI A, ZHANG W. Mobile jammer-aided secure UAV communications via trajectory design and power control [J]. China Communications, 2018, 15 ( 8 ): 141-151.
- [19] SUN G, LI N, TAO X, et al. Power allocation in UAV-enabled relaying systems for secure communications[J]. IEEE Access, 2019, 7: 119009-119017.
- [20] DUO B, LUO J, LI Y, et al. Joint trajectory and power optimization for securing UAV communications against active eavesdropping[J]. China Communications, 2021, 18(1): 88-99.
- [21] WANG Z, ZHOU F, WANG Y, et al. Joint 3D trajectory and resource optimization for a UAV relay-assisted cognitive radio network[J]. China Communications, 2021, 18(6): 184-200.
- [22] LIN X, YAJNANARAYANA V, MURUGANATHAN S D, et al. The sky is not the limit: LTE for unmanned aerial vehicles [J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(4): 204-210.
- [23] BOYD S, BOYD S P, VANDENBERGHE L. Convex optimization[M]. Los Angeles: Cambridge university press, 2004.
- [24] HUANG F, CHEN J, WANG H, et al. UAV-assisted SWIPT in internet of things with power splitting: trajectory design and power allocation[J]. IEEE Access, 2019, 7: 68260-68270.