

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202012027



轨迹和干扰功率联合优化的 无人机主动窃听算法

周洁, 王培臣, 张孟杰, 赵睿

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 研究一种无人机(UAV)作为合法窃听器的无线通信窃听算法. 首先, 将一个合法窃听器(UAV(E))用于窃听可疑发射器(UAV(B))发送到地面可疑接收器的可疑信息. 然后, 利用可疑系统的特点, 提出一种有效的主动干扰方案, 从而最大限度地提高有效窃听速率; 针对构造的原问题是一个优化变量耦合的混合非凸优化问题, 应用更新速率辅助的块坐标下降和连续凸优化技术, 在每次迭代中交替优化无人机轨迹和干扰功率. 最后, 针对非凸的无人机轨迹优化和干扰功率优化问题, 分别利用连续凸优化算法将原非凸问题转化为近似的次优化问题, 再使用凸优化方法进行求解. 仿真结果表明: 相较于其他基准算法, 文中算法具有更高的有效窃听速率.

关键词: 无人机; 合法窃听器; 无线通信; 凸优化

中图分类号: TN 918. 91

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2022)02-0237-08

Unmanned Aerial Vehicle Proactive Eavesdropping Algorithm Using Joint Optimization of Trajectory and Jamming Power

ZHOU Jie, WANG Peichen, ZHANG Mengjie, ZHAO Rui

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Research a wireless communication eavesdropping algorithm of unmanned aerial vehicle (UAV) as a legitimate eavesdropper. Firstly, a legitimate eavesdropper (UAV(E)) attempts to eavesdrop the suspicious messages sent from the suspicious transmitter (UAV(B)) to the suspicious receiver on the ground. Secondly, using the characteristics of the suspicious system, an effective proactive jamming scheme is proposed to maximize increase the effective eavesdropping rate. For the constructive original problem is a hybrid non-convex optimization problem with optimized variable coupling, the update rate-assisted block coordinate descent and successive convex optimization technology are applied to alternately optimize the UAV trajectory and jamming power in each iteration. Finally, for the problem of non-convex UAV trajectory optimization and jamming power optimization, the successive convex approximation algorithm is used to transform the original non-convex problem into an approximate sub-optimization problem, furthermore, use the convex optimization method to get the solution. The simulation results show that the proposed algorithm has a higher effective eavesdropping rate than other benchmark algorithms.

收稿日期: 2020-12-14

通信作者: 赵睿(1980-), 教授, 博士, 主要从事无线通信信号处理、人工智能无线通信、物联网安全、5G/6G 物理层通信关键技术的研究. E-mail: rzhaor@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61401165); 福建省自然科学基金资助项目(2019J01055); 华侨大学研究生科研创新基金资助项目(18014082041)

Keywords: unmanned aerial vehicle; legitimate eavesdropper; wireless communications; convex optimization

由于低成本、高机动性等特点,无人机(UAV)在公共安全、灾害管理、监视和通信等方面的应用需求不断增长,特别是利用无人机支持地面蜂窝网络受到了广泛的关注^[1]. 与地面无线系统相比,在无人机辅助无线通信系统中,无人机可以灵活、快速地进行部署^[2],为无基础设施覆盖的设备提供一种具有前景的视距链路(LoS)连接技术^[3],进而可以获得更高的可达速率.

然而,随着无人机通信系统的普及,低成本的无线服务扩大了罪犯或恐怖分子的活动范围,对国家安全产生了严重的威胁^[4]. 因此,政府机构需要合法地监控任何可疑的通信链接,并检测商业无线网络中的异常行为. 文献[5]研究一种由 3 架无人机组成的无线监控系统,1 架无人机作为合法的窃听器,采用干扰技术主动窃听其他两架无人机的可疑通信,综合考虑有效窃听速率和无人机能耗,提出一种迭代干扰功率优化算法分配干扰功率和中继功率. 文献[6]构建 3 架无人机组成的无线监控系统,合法无人机通过跟踪可疑无人机的飞行,防止故意犯罪和恐怖袭击,为了提高跟踪精度,合法无人机综合利用可疑发射器信号的窃听数据包、到达角和接收信号强度,提出了一种新的跟踪算法. 文献[7]考虑一种地面主动窃听无线信息监视场景,1 个合法窃听器试图窃听由无人机可疑发射器发送的可疑信息,提出一种基于连续凸逼近的迭代算法求解原非凸优化问题^[8],从而最大限度地提高可达窃听速率.

在目前的研究中,主动窃听器被视为固定在地面的节点,或是固定飞行路径的无人机,无人机作为主动窃听器的轨迹变化对系统窃听速率的影响几乎被忽略. 然而,无人机的轨迹优化问题在无人机网络中至关重要,这是因为无人机的高机动性、无线通信固有的广播特性,以及考虑的信道是由视距链路控制的,无人机的位置变化可直接影响其接收速率. 基于轨迹优化的无人机通信模型受到了学者广泛的关注. 文献[9]在地面存在多个用户及多个窃听者的情况下,部署单个无人机对地面用户进行服务,通过一个干扰无人机对地面窃听者进行干扰,提出无人机轨迹和发射功率联合优化算法,从而使所有用户的平均安全速率最大化. 文献[10]在以无人机为移动中继的无线通信系统中,采用无人机中继在两个地面用户之间转发信息,地面上存在一个窃听者对中继无人机进行窃听,提出基于机动性约束、无人机功率约束和中继无人机信息因果约束的安全速率最大化问题,利用更新速率辅助块坐标下降,并采用连续凸逼近技术交替优化两种无人机的发射功率和飞行轨迹. 文献[11]在位置区域不确定的多个窃听者的情况下,研究向多个合法接收方发送机密信息的无人机通信系统. 基于此,本文研究无人机的轨迹变化对系统有效窃听速率的影响,并进行轨迹和干扰功率的联合优化.

1 系统模型

在一个三维笛卡尔坐标中,无人机 B(UAV(B))是一个可疑发送节点,发送可疑信息到 M 个地面用户 $D_m, m \in \triangle \{1, 2, \dots, M\}$,地面用户和 UAV(B)均只配备一根天线. 无人机 E(UAV(E))是一个合法窃听器,配备两根天线,分别用于窃听从 UAV(B)发送到地面用户的信息,以及发送干扰信号干扰地面用户. UAV(E)可以通过自干扰消除技术,消除自身发送的干扰信号^[12]. 无人机主动窃听通信系统模型,如图 1 所示.

两架无人机假设在一个恒定的高度 H 飞行,这是无人机需要地形回避的最小值,同时,也有助于减少其上升或下降时的能源消耗. UAV(B)采用时分多址(TDMA)的传输方式服务地面用户^[13],即每个时隙只服务于一个用户,UAV(B)根据距离最近原则,选择服务的用户. 为了简化优化问题,确保地面用户的接收速率最大化,UAV(B)的轨迹和用户调度规则 A 已定,而 UAV(E)的初始轨迹是以用户的几何中点为圆心,设置不同飞行半径的圆形轨迹.

设无人机的整个飞行周期为 T ,连续时间意味着无穷多个速度约束,这使无人机的轨迹设计难以处理. 因此,将 T 离散化,等分为 N 个很小的通信时隙长度 δ_t ,即 $T = N\delta_t$. 由于每个通信时隙设置得足够

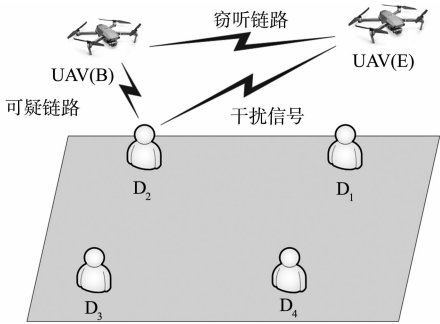


图 1 无人机主动窃听通信系统模型
Fig. 1 Proactive eavesdropping communication system model of UAV

小, 所以可认为在每个时隙中, 无人机的坐标位置不变.

利用离散化的时隙, 可将无人机的二维水平坐标表示为

$$\mathbf{q}_v[n] \triangleq [x_v[n], y_v[n]]^T, \quad n \in N \triangleq \{1, 2, \dots, N\}, \quad v \in V \triangleq \{B, E\}.$$

上式中: V 为无人机 B, E 的集合.

定义 M 个地面用户 D_m 在三维笛卡尔坐标上的水平坐标为

$$\mathbf{q}_{D_m} \triangleq [x_{D_m}, y_{D_m}]^T, \quad m \in \triangleq \{1, 2, \dots, M\}.$$

为计算方便, 忽略无人机起飞和降落的时间. UAV(B) 和 UAV(E) 的最大飞行速度为 v_{\max} , 则无人机在每个时隙的最大飞行距离 $L = \delta_t v_{\max}$. 此外, UAV(B), UAV(E) 的最后一个时隙会飞到初始位置.

根据上述假设, UAV(B) 的轨迹已定, 只需考虑 UAV(E) 的移动约束, 有

$$\|\mathbf{q}_E[n+1] - \mathbf{q}_E[n]\|^2 \leq L^2, \quad \forall n, \quad (1)$$

$$\mathbf{q}_E[1] = \mathbf{q}_E[N]. \quad (2)$$

为了避免 UAV(B) 和 UAV(E) 在飞行过程中发生碰撞, 增加最小安全距离的约束, 即

$$\|\mathbf{q}_E[n] - \mathbf{q}_B[n]\|^2 \geq d_{\min}^2, \quad \forall n. \quad (3)$$

式(3)中: d_{\min} 为 UAV(B), UAV(E) 之间的最小安全距离.

在文中的无人机-地面通信的无线通信系统中, 假设 UAV(B), UAV(E) 与所有地面用户的信道都为视距链路, 在第 n 个通信时隙中, UAV 与地面用户的信道模型 $h_{v,D_m}[n]$ 为

$$h_{v,D_m}[n] = \frac{\beta_0}{d_{v,D_m}^2[n]} = \frac{\beta_0}{\|\mathbf{q}_v[n] - \mathbf{q}_{D_m}\|^2 + H^2}, \quad \forall v, m, n. \quad (4)$$

式(4)中: β_0 为参考距离 $d_0 = 1$ m 时的信道功率增益; $d_{v,D_m}[n]$ 为第 n 个时隙无人机与地面用户的距离.

UAV(B) 与 UAV(E) 之间的信道模型 $h_{B,E}[n]$ 为

$$h_{B,E}[n] = \frac{\beta_0}{d_{B,E}^2[n]} = \frac{\beta_0}{\|\mathbf{q}_E[n] - \mathbf{q}_B[n]\|^2}, \quad \forall n. \quad (5)$$

式(5)中: $d_{B,E}[n]$ 为第 n 个时隙 UAV(B) 与 UAV(E) 之间的距离.

UAV(E) 的干扰功率约束为

$$0 \leq P_E[n] \leq P_{E,\max}, \quad \forall n. \quad (6)$$

式(6)中: $P_E[n]$ 为第 n 个时隙 UAV(E) 的干扰功率; $P_{E,\max}$ 为 UAV(E) 的干扰功率峰值.

第 n 个时隙 UAV(E) 的接收速率 $R_E[n]$ 为

$$R_E[n] = \log_2(1 + P_B[n] \hat{h}_{B,E}[n]), \quad \forall n. \quad (7)$$

式(7)中: $P_B[n]$ 为第 n 个时隙 UAV(B) 的发送功率; $\hat{h}_{B,E}[n] = \frac{\lambda_0}{\|\mathbf{q}_E[n] - \mathbf{q}_B[n]\|^2}$, $\forall n$, λ_0 表示参考距离 $d_0 = 1$ m 时的信道功率增益 β_0 与噪声功率 σ_0^2 的比值, $\lambda_0 = \frac{\beta_0}{\sigma_0^2}$.

UAV(E) 的平均接收速率 \bar{R}_E 为

$$\bar{R}_E = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N R_E[n]. \quad (8)$$

第 n 个时隙地面用户 D_m 的接收速率 $R_{D_m}[n]$ 为

$$R_{D_m}[n] = \log_2 \left(1 + \frac{P_B[n] \hat{h}_{B,D_m}[n]}{P_E[n] \hat{h}_{E,D_m}[n] + 1} \right), \quad \forall n, m. \quad (9)$$

式(9)中: $\hat{h}_{v,D_m}[n] = \frac{\lambda_0}{\|\mathbf{q}_v[n] - \mathbf{q}_{D_m}\|^2 + H^2}$, $\forall v, m, n$.

由于 UAV(E) 工作于主动窃听模式, 当 $R_{D_m}[n] \leq R_E[n]$ 时, UAV(E) 能可靠地解码来自 UAV(B) 的消息, 此时, 有效窃听速率的值为 $R_{D_m}[n]$; 当 $R_{D_m}[n] > R_E[n]$ 时, 合法窃听器 UAV(E) 无法无差错地解码信息, 此时, 有效窃听速率为 0.

因此, 合法窃听器 UAV(E) 的有效窃听速率 $R_{EV}[n]$ 为

$$R_{EV}[n] = \begin{cases} R_{D_m}[n], & R_E[n] \geq R_{D_m}[n], \quad \forall m, n, \\ 0, & R_E[n] < R_{D_m}[n], \quad \forall m, n. \end{cases} \quad (10)$$

2 优化问题

为方便起见,定义 $\mathcal{Q}_E = \{q_E[n], \forall n\}$, $\mathcal{Q}_B = \{q_B[n], \forall n\}$, $\mathcal{P}_B = \{P_B[n], \forall n\}$, $\mathcal{P}_E = \{P_E[n], \forall n\}$, UAV(B)的用户调度规则 $A = \{\alpha_m[n], \forall m, n\}$,通过联合优化 UAV(E)在所有时隙上的轨迹和干扰功率,使平均有效窃听速率(\bar{R}_{EV})最大化.

优化问题 P1 可表示为

$$\max_{\mathcal{Q}_E, \mathcal{P}_E} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \alpha_m[n] R_{EV}[n], \quad \text{s. t. } (1), (2), (3), (6), (10). \quad (11)$$

由优化问题 P1 可知以下两点结论.

1) 在优化目标中, $R_{D_m}[n]$ 和 $R_E[n]$ 的分子、分母都含有轨迹及干扰功率的优化变量.

2) 因为优化变量在所有时隙上的耦合性,无法使用标准凸优化技术进行求解,因此,优化问题 P1 无法使用标准的凸优化技术进行求解,故先将其分解为优化 UAV(E)的干扰功率、优化 UAV(E)的轨迹两个子问题,再交替求解这两个子问题,直到算法收敛.

2.1 UAV(E)干扰功率的优化

给定 UAV(B), UAV(E)的初始轨迹,即给定 $\tilde{\mathcal{Q}}_v = \{\tilde{q}_v[n], \forall v, n\}$, UAV(B)的用户调度规则 A 及 UAV(B)的发送功率 $\tilde{\mathcal{P}}_B = \{\tilde{P}_B[n], \forall n\}$,对 UAV(E)的干扰功率进行优化.

引入松弛变量 η_{po} 对非凸问题进行替代简化,通过 $X_m = \{x_m[n], \forall m, n\}$, $Y_m = \{y_m[n], \forall m, n\}$,将优化问题 P1 转换为优化 UAV(E)干扰功率的子问题 P2,即

$$\max_{\eta_{po}, X_m, Y_m} \eta_{po}, \quad (12)$$

$$\text{s. t. } \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left[\frac{1}{\ln 2} (x_m[n] - y_m[n]) \right] \geq \eta_{po}, \quad \forall m, \quad (13)$$

$$\tilde{P}_B[n] \hat{h}_{B,D_m}[n] + P_E[n] \hat{h}_{E,D_m}[n] + 1 \geq e^{x_m[n]}, \quad \forall m, n, \quad (14)$$

$$P_E[n] \hat{h}_{E,D_m}[n] + 1 \leq e^{y_m[n]}, \quad \forall m, n, \quad (15)$$

$$0 \leq P_E[n] \leq P_{E,\max}, \quad \forall n, \quad (16)$$

$$\alpha_m[n] R_{D_m}[n] \leq R_E[n], \quad \forall m, n. \quad (17)$$

由式(12)~(17)可知,子问题 P2 是非凸约束,表示为两个凸函数差的形式,可以采用逐次凸优化(SCA)技术进行求解,即采用一阶泰勒展开式近似 $e^{y_m[n]}$.

因此,给定初始值 $\tilde{y}_m[n]$,式(15)可转化为

$$P_E[n] \hat{h}_{E,D_m}[n] + 1 \leq e^{\tilde{y}_m[n]} (y_m[n] - \tilde{y}_m[n] + 1), \quad \forall m, n. \quad (18)$$

因此,子问题 P2 可重新表示为子问题 P3,即

$$\max_{\eta_{po}, X_m, Y_m} \eta_{po}, \quad \text{s. t. } (13), (14), (16), (17), (18). \quad (19)$$

子问题 P3 是一个凸优化问题,可直接采用现有的凸优化求解工具(如 CVX)进行求解.

2.2 UAV(E)轨迹的优化

给定无人机的初始干扰功率 $\tilde{\mathcal{P}}_v = \{\tilde{P}_B[n], \tilde{P}_E[n], \forall n\}$, UAV(B)的初始轨迹 $\tilde{\mathcal{Q}}_B = \{\tilde{q}_B[n], \forall n\}$,以及 UAV(B)的用户调度规则 A ,对 UAV(E)的轨迹进行优化.

引入松弛变量 η_{tr} ,通过 $X_m = \{x_m[n], \forall m, n\}$, $Y_m = \{y_m[n], \forall m, n\}$,将优化问题 P1 转换为优化 UAV(E)轨迹的子问题 P4,即

$$\max_{\eta_{tr}, X_m, Y_m} \eta_{tr}, \quad (20)$$

$$\text{s. t. } \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left[\frac{1}{\ln 2} (x_m[n] - y_m[n]) \right] \geq \eta_{\text{tr}}, \quad \forall m, \quad (21)$$

$$\tilde{P}_{\text{B}}[n] \hat{h}_{\text{B}, \text{D}_m}[n] + \tilde{P}_{\text{E}}[n] \hat{h}_{\text{E}, \text{D}_m}[n] + 1 \geq e^{x_m[n]}, \quad \forall m, n, \quad (22)$$

$$\tilde{P}_{\text{E}}[n] \hat{h}_{\text{E}, \text{D}_m}[n] + 1 \leq e^{y_m[n]}, \quad \forall m, n, \quad (23)$$

$$\| \mathbf{q}_{\text{E}}[n+1] - \mathbf{q}_{\text{E}}[n] \|^2 \leq L^2, \quad n \in N \triangleq \{1, \dots, N\}, \quad (24)$$

$$\mathbf{q}_{\text{E}}[1] = \mathbf{q}_{\text{E}}[N], \quad (25)$$

$$\| \mathbf{q}_{\text{E}}[n] - \tilde{\mathbf{q}}_{\text{B}}[n] \|^2 \geq d_{\min}^2, \quad \forall n, \quad (26)$$

$$\alpha_m[n] R_{\text{D}_m}[n] \leq R_{\text{E}}[n], \quad \forall m, n. \quad (27)$$

由于式(22), (23), (26), (27)是非凸约束, 因此, 子问题 P4 是一个非凸优化问题。

$\log_2(1 + \tilde{P}_{\text{B}}[n] \hat{h}_{\text{B}, \text{E}}[n])$ 和 $\hat{h}_{\text{E}, \text{D}_m}[n]$ 分别是关于 $\| \mathbf{q}_{\text{E}}[n] - \tilde{\mathbf{q}}_{\text{B}}[n] \|^2$ 和 $\mathbf{q}_{\text{E}}[n]$ 的凸函数, 在给定 $\| \tilde{\mathbf{q}}_{\text{E}}[n] - \tilde{\mathbf{q}}_{\text{B}}[n] \|^2$ 和 $\tilde{\mathbf{q}}_{\text{E}}[n]$ 上应用一阶泰勒展开, 可得其近似值为

$$\begin{aligned} \hat{h}_{\text{E}, \text{D}_m}[n] &= \frac{\lambda_0}{\| \mathbf{q}_{\text{E}}[n] - \mathbf{q}_{\text{D}_m} \|^2 + H^2} \geq \hat{h}_{\text{E}, \text{D}_m}^{\text{lb}}[n] \triangleq \frac{\lambda_0}{\| \tilde{\mathbf{q}}_{\text{E}}[n] - \mathbf{q}_{\text{D}_m} \|^2 + H^2} - \\ &\quad \frac{2\lambda_0 (\tilde{\mathbf{q}}_{\text{E}}[n] - \mathbf{q}_{\text{D}_m})^{\text{T}} (\mathbf{q}_{\text{E}}[n] - \tilde{\mathbf{q}}_{\text{E}}[n])}{(\| \tilde{\mathbf{q}}_{\text{E}}[n] - \mathbf{q}_{\text{D}_m} \|^2 + H^2)^2}, \quad \forall n, m, \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} R_{\text{E}}[n] &= \log_2(1 + \tilde{P}_{\text{B}}[n] \hat{h}_{\text{B}, \text{E}}[n]) \geq R_{\text{E}}^{\text{lb}}[n] \triangleq \log_2 \left(1 + \frac{\tilde{P}_{\text{B}}[n] \lambda_0}{\| \tilde{\mathbf{q}}_{\text{E}}[n] - \tilde{\mathbf{q}}_{\text{B}}[n] \|^2} \right) - \\ &\quad \left(\frac{\tilde{P}_{\text{B}}[n] \lambda_0}{\ln 2 (\| \tilde{\mathbf{q}}_{\text{E}}[n] - \tilde{\mathbf{q}}_{\text{B}}[n] \|^2)^2} \right) \times \left(\frac{\| \tilde{\mathbf{q}}_{\text{E}}[n] - \tilde{\mathbf{q}}_{\text{B}}[n] \|^2}{\| \tilde{\mathbf{q}}_{\text{E}}[n] - \tilde{\mathbf{q}}_{\text{B}}[n] \|^2 + \tilde{P}_{\text{B}}[n] \lambda_0} \right) \times \\ &\quad (\| \mathbf{q}_{\text{E}}[n] - \tilde{\mathbf{q}}_{\text{B}}[n] \|^2 - \| \tilde{\mathbf{q}}_{\text{E}}[n] - \tilde{\mathbf{q}}_{\text{B}}[n] \|^2), \quad \forall n. \end{aligned} \quad (29)$$

因此, 式(22), (27)可近似表示为

$$\tilde{P}_{\text{B}}[n] \hat{h}_{\text{B}, \text{D}_m}[n] + \tilde{P}_{\text{E}}[n] \hat{h}_{\text{E}, \text{D}_m}^{\text{lb}}[n] + 1 \geq e^{x_m[n]}, \quad \forall m, n, \quad (30)$$

$$R_{\text{E}}^{\text{lb}}[n] \geq \alpha_m[n] R_{\text{D}_m}[n], \quad \forall m, n. \quad (31)$$

由于非凸约束是两个凸函数差的形式, 可以采用连续凸优化技术进行求解, 即采用一阶泰勒展开式近似 $e^{y_m[n]}$, 并引入松弛变量 $\partial = \{\partial_m[n], \forall n, m\}$, 将式(23)重新表示为

$$\frac{\tilde{P}_{\text{E}}[n] \lambda_0}{\partial_m[n] + H^2} + 1 \leq e^{\tilde{y}_m[n]} (y_m[n] - \tilde{y}_m[n] + 1), \quad \forall m, n. \quad (32)$$

对非凸约束引入松弛变量 $\gamma = \{\gamma[n], \forall n\}$, 式(26)可重新表示为

$$\gamma[n] \geq d_{\min}^2, \quad \forall n. \quad (33)$$

由于 $\| \mathbf{q}_{\text{E}}[n] - \mathbf{q}_{\text{D}_m} \|^2$ 和 $\| \mathbf{q}_{\text{E}}[n] - \tilde{\mathbf{q}}_{\text{B}}[n] \|^2$ 都是关于 $\mathbf{q}_{\text{E}}[n]$ 的凸函数, 在给定 $\tilde{\mathbf{q}}_{\text{E}}[n]$ 上应用一阶泰勒展开, 得到其近似值为

$$\begin{aligned} \| \mathbf{q}_{\text{E}}[n] - \mathbf{q}_{\text{D}_m} \|^2 &\geq \| \tilde{\mathbf{q}}_{\text{E}}[n] - \mathbf{q}_{\text{D}_m} \|^2 + 2 (\tilde{\mathbf{q}}_{\text{E}}[n] - \mathbf{q}_{\text{D}_m})^{\text{T}} \times \\ &\quad (\mathbf{q}_{\text{E}}[n] - \tilde{\mathbf{q}}_{\text{E}}[n]) \triangleq \partial_m[n], \quad \forall m, n. \end{aligned} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} \| \mathbf{q}_{\text{E}}[n] - \tilde{\mathbf{q}}_{\text{B}}[n] \|^2 &\geq \| \tilde{\mathbf{q}}_{\text{E}}[n] - \tilde{\mathbf{q}}_{\text{B}}[n] \|^2 + 2 (\tilde{\mathbf{q}}_{\text{E}}[n] - \tilde{\mathbf{q}}_{\text{B}}[n])^{\text{T}} \times \\ &\quad (\mathbf{q}_{\text{E}}[n] - \tilde{\mathbf{q}}_{\text{E}}[n]) \triangleq \gamma[n], \quad \forall n. \end{aligned} \quad (35)$$

经上述变换, 将子问题 P4 中的非凸约束转换为凸约束, 可得子问题 P5, 即

$$\max_{\eta_{\text{tr}}, X_m, Y_m, \partial, \gamma} \eta_{\text{tr}} \quad \text{s. t. } (21), (24), (25), (30), (31), (32), (33). \quad (36)$$

子问题 P5 是一个凸优化问题, 可直接采用现有的凸优化求解工具(如 CVX)进行求解。

3 整体算法

在经典块坐标下降法中, 为了保证算法的收敛性, 需要在每次迭代中以最优的方式精确求解更新每

个子问题^[14]. 然而,在求解过程中,对于子问题 P2,P4,只优化解决近似问题 P3,P5. 因此,无法直接应用经典块坐标下降法的收敛性分析^[15].

优化问题 P1 的交替优化算法(算法 1)有如下 6 个步骤.

算法 1 交替优化.

步骤 1 给定 UAV(B)和 UAV(E)的初始轨迹 $\tilde{\mathcal{Q}}_B, \tilde{\mathcal{Q}}_E^0$ 、初始干扰功率 $\tilde{P}_B, \tilde{P}_E^0$ 、松弛变量的初始值 \tilde{Y}_m 、UAV(B)的用户调度 A、松弛变量 γ 、更新参数 ζ 及迭代次数 $k=0$.

步骤 2 循环.

步骤 3 开始, $k=k+1, \gamma=\gamma/(1+(k-1)\times\zeta)$.

步骤 4 使用给定的 UAV(B)和 UAV(E)的初始轨迹 $\tilde{\mathcal{Q}}_B, \tilde{\mathcal{Q}}_E^{k-1}$ 、UAV(B)的用户调度规则 A 及 \tilde{Y}_m , 求解子问题 P3, 可以求得合法窃听器 UAV(E)的干扰功率最优值 P_E . 更新得到的值, $\tilde{P}_E^k = \gamma(P_E - \tilde{P}_E^{k-1}) + \tilde{P}_E^{k-1}$.

步骤 5 使用步骤 4 求得的 UAV(E)最优功率 \tilde{P}_E^k , 和给定的 UAV(B) 初始轨迹 $\tilde{\mathcal{Q}}_B$ 、用户调度规则 A 及 \tilde{Y}_m , 求解子问题 P5, 可得 UAV(E)轨迹的最优值 \mathcal{Q}_E . 更新得到的值, $\tilde{\mathcal{Q}}_E^k = \gamma(\mathcal{Q}_E - \tilde{\mathcal{Q}}_E^{k-1}) + \tilde{\mathcal{Q}}_E^{k-1}$.

步骤 6 直至优化问题 P1 中目标值的增加小于阈值 ξ .

文献[15]已验证了算法 1 的收敛性,不再赘述.

4 数值结果与分析

通过仿真验证轨迹和干扰功率联合优化算法(文中算法)的有效性. 采用以下两种基准算法作为比较:1) 算法 1,固定发送功率的 UAV(E)轨迹优化;2) 算法 2,固定 UAV(E)轨迹的干扰功率优化.

系统参数设置如下:假设地面有 4 个用户,位置分别为 $(800,800), (-800,800), (-800,-800)$ 和 $(800,-800)$, $M=4, v_{\max}=40\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}, H=50\text{ m}, \tilde{P}_B=16\text{ dBm}, P_{E,\max}=16\text{ dBm}, \tilde{P}_E^0=P_{E,\max}, \xi=1\times 10^{-4}, \gamma=0.5$, 更新参数 $\zeta=0.08, \lambda_0=1\times 10^6$.

当 $T=160\text{ s}$ 时,UAV(B)的用户调度规则,如图 2 所示. 图 2 中: $D_1\sim D_4$ 分别为地面用户 1~4. 由图 2 可知:为了最大化地面用户的可达接收速率,UAV(B)的轨迹是在用户上空的正方形飞行轨迹,并逐个服务于距离最近的一个用户,即 UAV(B)每个时隙只服务一个用户^[11]. UAV(E)的初始轨迹是一个以原点为圆心,半径为 600 m 的圆形.

UAV(B)和 UAV(E)的轨迹,如图 3 所示. 由图 3 可知:UAV(B)以固定的轨迹在每个用户上方进行逐个访问,UAV(E)优化后的轨迹与 UAV(B)的轨迹相似,从而实现对 UAV(B)发送信息的窃听.

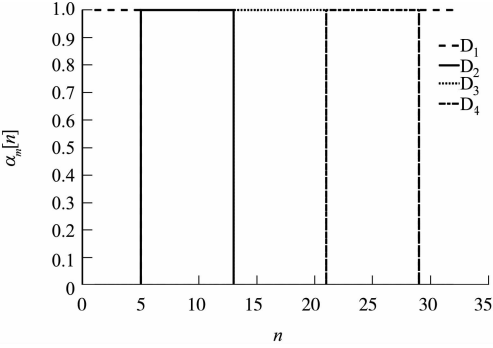


图 2 UAV(B)用户调度规则

Fig. 2 User scheduling rules of UAV(B)

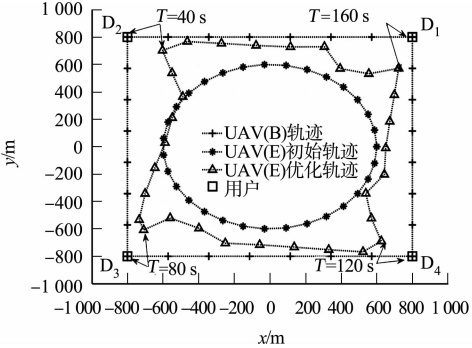


图 3 UAV(B)和 UAV(E)的轨迹

Fig. 3 Trajectory of UAV(B) and UAV(E)

UAV(E)的干扰功率随时间的变化情况,如图 4 所示. 由图 3,4 可知:当 T 分别为 $0, 40, 80, 120, 160\text{ s}$ 时,对应的 UAV(B), UAV(E) 飞行到各地面用户上空位置,其中,UAV(E)距离地面用户较近,为了使有效窃听速率最大化,所以 UAV(E)发送的干扰功率下降.

UAV(E)的平均接收速率,如图 5 所示. 由图 5 可知:文中算法明显优于算法 1,2,这就验证了 UAV(E)轨迹和干扰功率的联合优化可以提高有效窃听速率;相比较于算法 2,文中算法的平均接收速率明显提高.

由于固定的轨迹限制了 UAV(E)机动性的潜力,而当轨迹和干扰功率联合优化时,在单纯的轨迹优化上叠加了功率的优化,使 UAV(E)更加灵活. 因此,相较于算法 1,2,文中算法的 UAV(E)平均接收速率更高. 随着飞行周期 T 的增大,UAV(E)具有更大的移动范围,给 UAV(E)靠近 UAV(B)提供了可能,故 UAV(E)的平均接收速率随着飞行时长 T 的增大而增大.

当 $T=160\text{ s}$ 时,文中算法平均有效窃听速率收敛图,如图 6 所示. 由图 6 可知:随着迭代次数的增加,文中算法的平均有效窃听速率迅速增加,约 18 次迭代后,平均有效窃听速率收敛到一个常数,即最大有效窃听速率.

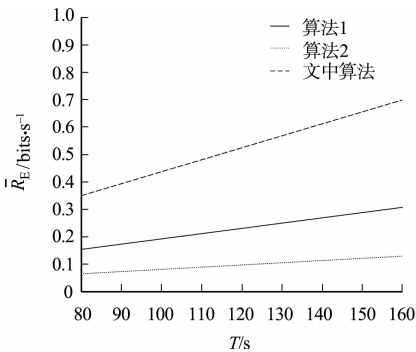


图 5 UAV(E)的平均接收速率
Fig. 5 Average reception rate of UAV(E)

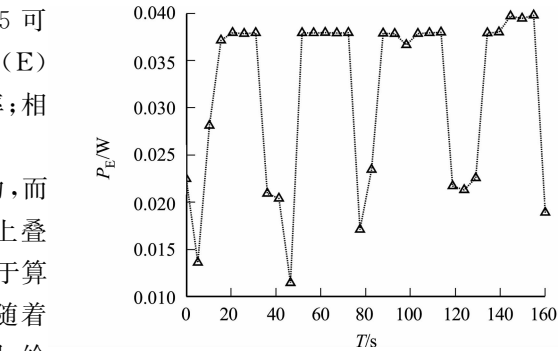


图 4 UAV(E)的干扰功率随时间的变化情况
Fig. 4 Variation situation of interference power with time of UAV(E)

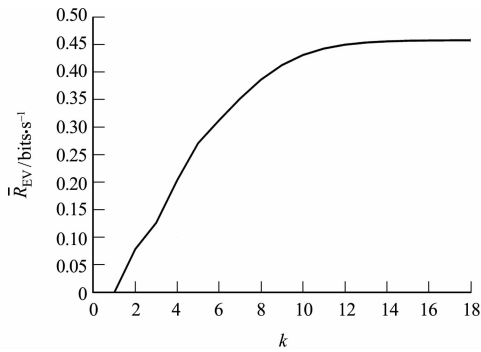


图 6 文中算法平均有效窃听速率收敛图
Fig. 6 Convergence graph of average effective eavesdropping rate of proposed algorithm

5 结束语

对采用无人机合法窃听器的无人机空对地通信系统的物理层安全问题进行研究. 采用无人机合法窃听器对可疑链路进行窃听,针对可疑系统的特点,在给定的飞行周期内,对主动窃听无人机进行轨迹和干扰功率联合优化,从而最大限度地提高合法窃听器的有效窃听速率. 将非凸的优化问题分解为两个容易处理的子问题,利用更新速率辅助的块坐标下降和连续凸优化技术,采用一种高效的迭代算法,交替求解子问题,并利用 SCA 技术解决相关的优化问题. 相较于固定发送功率的 UAV(E)轨迹优化(算法 1)、固定 UAV(E)轨迹的干扰功率优化(算法 2)这两种基准算法,文中算法可以显著地提高系统的性能. 在今后的工作中,将进一步考虑不同带宽之间的动态分配,以及在用户位置不完全可知的情况下空中存在多个移动窃听者的情况.

参考文献:

[1] ZENG Yong,ZHANG Rui. Cellular-connected UAV: Potential, challenges, and promising technologies[J]. IEEE Wireless Communications,2019,26(1):120-127. DOI:10.1109/MWC.2018.1800023.

[2] ZENG Yong,ZHANG Rui. Throughput maximization for UAV-enabled mobile relaying systems[J]. IEEE Transactions on Communications,2016,64(12):4983-4996. DOI:10.1109/TCOMM.2016.2611512.

[3] ZHANG Shuhang,ZHANG Hongliang,DI Boya. Joint trajectory and power optimization for UAV sensing over cellular networks[J]. IEEE Communications Letters,2018,22(11):2382-2385. DOI:10.1109/LCOMM.2018.2868075.

- [4] FAN Wenlu, WU Yang, JU Shaohua, *et al.* Secure UAV communication with robust communication and trajectory design[C]//International Conference on Computer, Information and Telecommunication Systems (CITS). Beijing: IEEE Press, 2019: 28-31. DOI: 10.1109/CITS. 2019. 8862090.
- [5] LI Kai, KANHERE S S, NI Wei, *et al.* Proactive eavesdropping via jamming for trajectory tracking of UAVs[C]//15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC). Tangier: IEEE Press, 2019: 24-28. DOI: 10.1109/IWCMC. 2019. 8766696.
- [6] ZHANG Mingzhu, YI Hongju, CHEN Yu, *et al.* Proactive eavesdropping via jamming for power-limited UAV communications[C]//IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Shanghai: IEEE Press, 2019: 20-24.
- [7] LU Haiquan, ZHANG Haiyang, DAI Haibo. Proactive eavesdropping in UAV-aided suspicious communication systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(2): 1993-1997. DOI: 10.1109/TVT. 2018. 2889397.
- [8] BOYD S L. Vandenberghe, convex optimization[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- [9] ZHOU Xiaobo, WU Qingqing. UAV-enabled secure communications: Joint trajectory and transmit power optimization[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(4): 4069-4073. DOI: 10.1109/TVT. 2019. 2900157.
- [10] ZHANG Guangchi, WU Qingqing, CUI Miao. 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.
- [11] NNAMANI C O, KHANDAKER M R A, SELLATHURAI M. UAV-aided jamming for secure ground communication with unknown eavesdropper location[J]. IEEE Access, 2020, 8: 72881-72892. DOI: 10.1109/ACCESS. 2020. 2986025.
- [12] 潘雨龙. 全双工无线通信系统中的自干扰消除方法研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2016.
- [13] WU Qingqing, ZENG Yong, 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.
- [14] CUI Miao, ZHANG Guangchi, WU Qingqing. Robust trajectory and transmit power design for secure UAV communications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(9): 9042-9046. DOI: 10.1109/TVT. 2018. 2849644.
- [15] MIAO Jiansong, ZHENG Ziyuan. Cooperative jamming for secure UAV-enabled mobile relay system[J]. IEEE Access, 2020, 8: 48943-48957. DOI: 10.1109/ACCESS. 2020. 2980242.

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 吴逢铁)