



研究与开发

基于协作波束成形的无人机群安全通信算法

韩东升^{1,2}, 赵逸朔¹

- (1. 华北电力大学电子与通信工程系, 河北 保定 071003;
2. 华北电力大学河北省电力物联网技术重点实验室, 河北 保定 071003)

摘 要: 无人机群辅助通信系统可以改善现有无线通信网络, 提升系统服务质量和通信服务覆盖范围, 但无线信道的开放特性使无人机通信系统极易被非法用户窃听。为此提出了一种基于协作波束成形的无人机群安全通信算法, 该算法综合考虑无人机群中各无人机的相对位置、能量, 以及无人机群的整体移动和天线阵列的波束, 实现最大化系统的保密率。由于该优化问题存在高度耦合的非凸项, 将初始问题分解为两个子问题, 并通过泰勒展开、凸松弛等方式, 设计了一种循环迭代的逐次凸逼近算法进行求解。仿真结果表明, 该优化方案可以有效提升系统保密率, 实现物理层安全通信, 并能获得比其他算法更好的效果。

关键词: 无人机通信; 虚拟天线阵列; 协作波束成形; 安全通信

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025144

A secure communication algorithm for UAV swarms based on cooperative beamforming

HAN Dongsheng^{1,2}, ZHAO Yishuo¹

1. Department of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China
2. Hebei Province Electric Power Internet of Things Technology Key Laboratory, North China Electric Power University, Baoding 071003, China

Abstract: UAV swarm assistance communication system can improve the existing wireless communication network, enhance the system service quality and coverage. However, the open characteristics of wireless channels make drone communication systems extremely vulnerable to eavesdropped by illegal users. A safe communication algorithm for UAVs based on cooperative beamforming was proposed. To maximize the confidentiality of the system, the relative position and energy of each drone in the swarm, as well as the overall movement of the swarm and the beam of the antenna array, were comprehensively considered. Since this optimization problem was characterized by highly coupled non-convex terms, the initial problem was decomposed into two sub-problems and a cyclic iterative succes-

收稿日期: 2024-12-23; 修回日期: 2025-04-02

通信作者: 赵逸朔, zhao-yishuo@foxmail.com

基金项目: 河北省省级科技计划项目 (No.SZX2020034)

Foundation Item: The Science and Technology Program of Hebei (No.SZX2020034)



sive convex approximation algorithm was designed to solve it through Taylor expansion and convex relaxation. Simulation results show that the optimization scheme proposed can effectively improve the system confidentiality rate, realize physical layer secure communication, and achieve better results compared with other comparison algorithms.

Key words: UAV communication, virtual antenna array, cooperative beamforming, secure communication

0 引言

由于无人机具有灵活性、机动性和强大的视距通信能力,无人机辅助无线通信可以提供良好的通信环境,灵活地扩大通信覆盖范围,并提高通信系统的质量^[1-5]。

无人机通信所依赖的无线信道具有开放性,容易被非法用户窃听其传输的信息。同时无人机能量受限的特点也导致其无法使用地面基站常用的复杂安全通信方案^[6]。适用于无人机通信网络特点的安全通信技术研究是实现低空通信和空地一体化的重要保障。

波束成形是一种可以有效提升通信系统性能、实现通信物理层安全的有效技术^[7-9]。但波束成形技术需要的多天线阵列相较于单天线元件具有物理成本和通信开销高等缺点。尤其在无人机通信系统中,无人机具有能量限制、质量限制、尺寸限制等特点,多天线阵列的加入会增加整体系统开销,进一步缩减无人机服务时间上限。由此引入协作波束成形(cooperative beamforming, CB)技术,可以将多个单天线单元组成虚拟天线阵列(virtual antenna array, VAA),利用协作波束成形技术进行通信,实现更好的通信性能^[10-15]。

使用多架携带单天线的无人机组成虚拟天线阵列并使用协作波束成形技术可以在保证系统性能的情况下,削减无人机所携带的物理设备和能量开销,实现提高系统服务时间和整体性能^[16-17]。虽然无人机飞行过程中不可避免地存在位置抖动,会从波束指向性^[18]、保密率^[19]、峰值

功率^[20]等方面对系统造成性能损失,但协作波束成形技术仍然会对系统带来大量性能提升^[21],并且随着无人机飞控技术的不断进步,采用协作波束成形技术的无人机群通信依然是增强整体通信性能的一个重要方案。

采用协作波束成形技术实现指向性的波束增益,可以从通信物理层方面加强系统安全性,有效增强系统信息传输保密率,实现信息的安全通信。文献[22]针对存在窃听者的情况下,通过使用改进遗传算法优化机群中无人机的相对位置和激励电流权重,实现与远方地面基站的安全通信。文献[23-24]通过改进的多目标蜻蜓算法针对静态无人机群实现了对多个不同基站依次执行协作波束成形传输,提高系统的总保密率。文献[25]将无人机群结合自动驾驶汽车联合构建虚拟天线阵列,实现了信息的安全传输。文献[26]考虑无人机携带有限机载能量,由每时刻随机改变位置的多架无人机组成的无人机阵列采用协作波束成形技术提高了针对特定用户传输保密率。除此之外,还可以采用主动发射噪声的方法提高系统安全性,例如,文献[27]使用无人机群构建虚拟天线阵列向除合法用户以外的方向发射人工噪声,实现了整体系统保密率的提升。

上述文献通过无人机群搭建虚拟天线阵列,利用无人机的灵活性重组阵列排布实现协作波束成形,优化波束指向,实现了通信质量的提升和物理层安全性能的提升。但相关研究^[22-26]更多将无人机群作为静态单元进行机群排布位置调整优化,并没有充分考虑在能量受限的无人机通信系统中,利用UAV高可移动性动态调整机群阵列排

布和按需移动机群位置, 通过释放系统更高的自由度以实现整体性能和通信安全的最优。同时考虑波束成形技术需要天线元件实现相位调控, 但针对能量受限的无人机设备中, 移相器的加入会增加整体设备开销, 采用机群阵列中各无人机分布位置的微小调整取代相位调整元件实现波束指向性, 可以进一步缩减系统整体开销, 增强总体服务时间^[17]。

针对这些情况, 本文利用无人机的高可移动性, 采用多架固定相位单天线无人机组成无人机群, 通过实时动态调整机群阵列排布和无人机群整体位置, 提出了一种基于协作波束成形的动态无人机群安全通信方案。针对无人机群辅助通信系统安全通信问题, 联合考虑无人机能量、位置、阵列波束等因素, 建立最大化系统信息传输保密率的优化问题。由于该问题是高度耦合的非凸问题, 无法直接求解。通过将原问题分解为无人机群阵列排布优化问题和无人机群位置优化问题, 并提出了一种迭代优化算法, 成功得到该问题的局部最优解。最后将所提算法进行仿真验证, 结果表明本文提出的无人机群协作波束成形优化方案能够切实提高系统的保密率。

1 系统模型

系统模型如图 1 所示, 本文考虑 1 个无人机辅助的通信系统模型, 其中包含 N 架无人机和 K 个地面用户, 所有 N 架无人机组成无人机阵列作为一个整体依次与每个地面用户进行通信。无人机集合表示为 $\mathcal{U}=\{1, 2, \dots, N\}$, 地面用户集合表示为 $\mathcal{G}=\{1, 2, \dots, K\}$ 。为了实现最小化无人机设备开销成本, 每架无人机仅携带单天线元件, N 架无人机共同组成一个虚拟天线阵列。其中第 i 架无人机位置记为 $\mathbf{p}_i^U=[x_i^U \ y_i^U \ z_i^U]$, 第 k 个地面用户位置记为 $\mathbf{p}_k^G=[x_k^G \ y_k^G \ z_k^G]$ 。设 D_k 表示第 k 个地面用户所需

传输数据量大小, 本文重点研究无人机协作波束成形安全通信问题, 故假设每个地面用户均配置单天线且所需传输数据量均为 D_0 , 同理假设每个无人机初始能量相等且均为 E_0 。本文系统中存在非法用户 eve 窃听通信数据, 窃听者位置记为 $\mathbf{p}^E=[x^E \ y^E \ z^E]$ 。

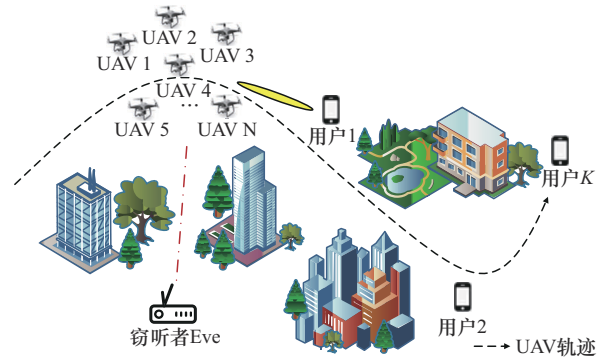


图 1 系统模型

1.1 通信模型

本文考虑无人机群对分布在该区域的多个用户进行服务, 无人机阵列悬停于特定位置为用户 k 提供服务, 然后飞行至新位置为下一用户提供服务。为了提高波束指向性和信号传输质量, 同时实现更高的信息保密率, 无人机群采用协作波束成形技术进行信号传输。波束成形技术依赖于每个天线相位的调控, 而移相器的加入会增加系统开销, 故本文利用无人机的灵活性和高可移动性, 在固定天线相位的情况下, 通过调整无人机阵列间距来获取所需的波束指向。

则无人机群阵列的阵列矢量可以表示为:

$$\mathbf{AF}(\theta, \phi) = \sum_{i=1}^N I_i \mathbf{e}^{jk_c(x_i^U \sin \theta \cos \phi + y_i^U \sin \theta \sin \phi + z_i^U \cos \theta)} = \sum_{i=1}^N I_i \mathbf{e}^{jk_c \mathbf{p}_i^U \mathbf{v}} \quad (1)$$

其中, $k_c=2\pi/\lambda$ 是相位常数, λ 是波长, $\theta \in [0, \pi]$ 和 $\phi \in [-\pi, \pi]$ 分别是俯仰角和方位角, I_i 是第 i 架无人机的励磁电流权重, $\mathbf{v}=[\sin \theta \cos \phi, \sin \theta \sin \phi, \cos \theta]^T$ 。



无人机阵列对地面用户 k 处的阵列增益可以表示为:

$$G_k = \frac{4\pi |\mathbf{AF}(\theta_k, \phi_k)|^2 \omega(\theta_k, \phi_k)^2}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi |\mathbf{AF}(\theta, \phi)|^2 \omega(\theta, \phi)^2 \sin \theta d\theta d\phi} \eta \quad (2)$$

其中, $\eta \in [0, 1]$ 是天线阵列效率, $\omega(\theta, \phi)$ 表示单个天线远场波束辐射方向图, 本文考虑无人机通信系统均采用全向天线, 各天线元方向图一致。 (θ_k, ϕ_k) 表示无人机波束期望指向方向的俯仰角和方位角, 可表示为:

$$\theta_k = \arccos \left(\frac{z_k^G - z^U}{\sqrt{(x_k^G - x^U)^2 + (y_k^G - y^U)^2 + (z_k^G - z^U)^2}} \right) = \arccos \left(\frac{(\mathbf{p}_k^G - \mathbf{p}^U) \mathbf{c}}{\|\mathbf{p}_k^G - \mathbf{p}^U\|_2} \right) \quad (3)$$

$$\phi_k = \arctan \left(\frac{y_k^G - y^U}{x_k^G - x^U} \right) = \arctan \left(\frac{(\mathbf{p}_k^G - \mathbf{p}^U) \mathbf{b}}{(\mathbf{p}_k^G - \mathbf{p}^U) \mathbf{a}} \right) \quad (4)$$

其中, $\mathbf{a} = [1 \ 0 \ 0]^T, \mathbf{b} = [0 \ 1 \ 0]^T, \mathbf{c} = [0 \ 0 \ 1]^T$ 。

由于无人机在高空对地面用户通信, 与传统地面设备相比可以带来更高的视距 (line of sight, LoS) 信道链接的可能性。但简化的 LoS 通道模型不足以准确地表征空地信道中复杂环境的信号传播。故本文采用概率 LoS 信道模型:

$$p_k^{\text{LoS}} = \frac{1}{1 + \beta_0 \exp \left(-\beta_1 \left(\frac{180}{\pi} \theta - \beta_0 \right) \right)} \quad (5)$$

其中, β_0, β_1 为由环境决定的常量。非视距信道概率可以表示为 $p_k^{\text{NLoS}} = 1 - p_k^{\text{LoS}}$ 。至此, 可以得到信道增益为:

$$h_k = K_0 d_k^{-\alpha} (p_k^{\text{LoS}} g_k^{\text{LoS}} + p_k^{\text{NLoS}} g_k^{\text{NLoS}}) \quad (6)$$

其中, K_0 是路径损耗常数, g_k^{LoS} 和 g_k^{NLoS} 分别是 LoS 信道和 NLoS 信道的两个衰减因子, $d_k = \sqrt{(x_k^G - x^U)^2 + (y_k^G - y^U)^2 + (z_k^G - z^U)^2} = \|\mathbf{p}_k^G - \mathbf{p}^U\|_2$ 表示无人机阵列到第 k 个地面用户的距离。

由此无人机阵列到地面用户 k 的传输速率可

以表示为:

$$R_k(x_{i,k}, y_{i,k}, z_{i,k}) = B \log \left(1 + \frac{h_k P_t G_k(x_{i,k}, y_{i,k}, z_{i,k})}{\sigma^2} \right) \quad (7)$$

其中, $(x_{i,k}, y_{i,k}, z_{i,k})$ 表示第 i 架无人机在服务于第 k 个地面用户时的位置坐标, B 表示信道带宽, P_t 是无人机天线阵列总发射功率, σ^2 是噪声功率。

同时由于系统中存在非法窃听者, 根据式 (1) ~ 式 (7) 可以得到窃听者处接收到的传输信息速率为:

$$R_{UE}(x_{i,k}, y_{i,k}, z_{i,k}) = B \log \left(1 + \frac{h_e P_t G_e(x_{i,k}, y_{i,k}, z_{i,k})}{\sigma^2} \right) \quad (8)$$

至此, 无人机阵列与第 k 个地面用户通信时的系统信息传输保密率可以表示为^[24]:

$$R_{\text{sec}_k} = [R_{\text{UG}_k} - R_{\text{UE}}]^+ = \left[B \log \left(1 + \frac{h_k P_t G_k(x_{i,k}, y_{i,k}, z_{i,k})}{\sigma^2} \right) - B \log \left(1 + \frac{h_e P_t G_e(x_{i,k}, y_{i,k}, z_{i,k})}{\sigma^2} \right) \right]^+ \quad (9)$$

其中, $[x]^+ = \max \{0, x\}$ 保证传输保密率非负。

1.2 能耗模型

由于无人机携带能量有限, 本系统同时需要考虑无人机能耗相关模型, 避免在执行任务中无人机能量耗尽带来的不可控因素。无人机的能量消耗包括无人机推进功耗、电路控制功耗和信号收发相关的通信功耗。在实际应用中, 无人机的电路控制功率和通信功率远小于推进功率^[4], 可以近似将无人机通信相关功率固定为 $P_c = 5 \text{ W}$ 。

一般而言, 推进能耗取决于无人机的飞行速度及其加速度。由于无人机加速时间仅占其总运动时间的很少部分, 为了便于说明和分析, 本文忽略了无人机加减速引起的能耗。对于速度为 V 的旋翼无人机, 推进功耗可以建模为:

$$P(V) = P_0 \left(1 + \frac{3V^2}{U_{\text{tip}}^2} \right) + P_i \left(\sqrt{1 + \frac{V^4}{4v_0^4}} - \frac{V^2}{2v_0^2} \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{2} d_0 \rho s A V^3 \quad (10)$$

其中, P_0 和 P_i 分别表示悬停状态下的桨叶轮廓功率常数和诱导功率常数, U_{tip} 表示无人机旋翼尖端速度, v_0 为悬停状态下的平均旋翼诱导速度, d_0 和 s 分别为机身阻力比和旋翼实度, ρ 和 A 分别表示空气密度和旋翼盘面积。

将 $V=0$ 代入式 (10), 可以得到无人机悬停能耗:

$$P_h = P_0 + P_i \quad (11)$$

由此, 当飞行速度固定为 V 时, 无人机剩余能量表示如下:

$$E = E_0 - \sum_{k=1}^K P_h t'_k - \sum_{k=1}^K P_m(V) t_k \quad (12)$$

其中, E_0 为无人机初始携带的能量, $t'_k = \frac{D_k}{R_{GD_k}}$ 表示无人机在第 k 个用户处的悬停通信时间, $t_k = \frac{\sqrt{(x_k^U - x_{k-1}^U)^2 + (y_k^U - y_{k-1}^U)^2 + (z_k^U - z_{k-1}^U)^2}}{V} = \frac{d_k}{V} = \frac{\| \mathbf{p}_k^U - \mathbf{p}_{k-1}^U \|_2}{V}$ 表示无人机移动到第 k 个用户处所需时间。

1.3 问题表述

本文中地面用户和窃听者位置固定, 为了最大化系统总保密率, 应该在有限的无人机能量限制下合理规划无人机位置, 实现最优无人机群位置和波束指向。针对上述系统, 在无人机位置、能量、传输信息量等因素的约束下, 提出优化问题如下。

$$\begin{aligned} \max_{\{\mathbf{p}_{i,k}\}} & \sum_{k=1}^K R_{\text{sec}_k} \\ \text{C1:} & x_{\min} \leq x_{i,k}^U \leq x_{\max}, \forall i \in U, \forall k \in G \\ \text{C2:} & y_{\min} \leq y_{i,k}^U \leq y_{\max}, \forall i \in U, \forall k \in G \\ \text{C3:} & H_{\min} \leq z_{i,k}^U \leq H_{\max}, \forall i \in U, \forall k \in G \\ \text{C4:} & E_i \geq E_{\min}, \forall i \in U \\ \text{C5:} & D_k \geq D_0, \forall k \in G \\ \text{C6:} & L_{i,j} \geq L_{\min}, \forall i, j \in U \end{aligned} \quad (13)$$

其中, $\{\mathbf{p}_{i,k}\}$ 表示第 i 个无人机在和第 k 个用户通信时的三维位置坐标。约束 (C1) ~ 约束 (C3) 表示无人机的位置约束, 规定了无人机可行的最大移动范围; 约束 (C4) 表示无人机能量约束, 规定无人机剩余能量须大于最小能量 $E_{\min}$; 约束 (C5) 为信息传输约束, 规定无人机在每个用户处需满足其最低传输信息量; 约束 (C6) 是无人机距离约束, 设定无人机间最小距离避免发生碰撞。由于约束 (C4) ~ 约束 (C6) 和目标函数均为非凸函数, 且存在高度耦合, 优化问题式 (13) 很难通过标准凸优化方法求解。

2 无人机群协作波束成形优化算法

本文所提出的优化问题式 (13) 由于存在非凸函数, 无法直接通过凸优化求解得到最优解。本文采用将该问题分解为两个子问题, 分别是固定无人机群整体位置下的无人机阵列排布优化子问题和固定无人机阵列排布情况下的机群位置优化子问题, 然后通过凸逼近的方法对两个子问题进行交替优化, 最终可以得到式 (13) 的次优解。

2.1 固定无人机群整体位置下的无人机阵列排布优化子问题

该子问题固定了无人机群阵列位置, 通过调整无人机间相互位置排布, 增强用户方向指向性波束强度, 减小窃听者方向波束强度, 以达到最大化传输保密率的目的。子问题可以表述为:

$$\begin{aligned} \max_{\{\mathbf{p}_i\}} & R_{\text{sec}} \\ \text{C7:} & x_{\min} \leq x_i^U \leq x_{\max}, \forall i \in U \\ \text{C8:} & y_{\min} \leq y_i^U \leq y_{\max}, \forall i \in U \\ \text{C9:} & H_{\min} \leq z_i^U \leq H_{\max}, \forall i \in U \\ \text{C10:} & L_{i,j} \geq L_{\min}, \forall i, j \in U \end{aligned} \quad (14)$$

由于固定无人机群阵列位置, 因此可以将式 (14) 中目标函数简化表达如下。



$$\min_{\{p_i\}} \left| \mathbf{AF}(\theta_e, \phi_e) \right|^2 \omega(\theta_e, \phi_e)^2 - \left| \mathbf{AF}(\theta_k, \phi_k) \right|^2 \omega(\theta_k, \phi_k)^2 \quad (15)$$

(C7~C10)

其中, 约束 (C7~C10) 限制了无人机可以移动的范围, 约束 (C10) 中 $L_{i,j} = \|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j\|_2$, 该约束限制无人机间最小距离, 避免发生碰撞。式 (15) 中目标函数为凸函数减去凸函数的形式, 整体为非凸函数。同时约束 (C10) 也是非凸约束。为了解决该优化问题, 需要对原问题进行凸松弛处理, 进而采用连续凸逼近来近似求解局部最优解。

设 $\mathbf{p}^{(r)} = \{\mathbf{p}_i^{(r)} | \forall i \in \mathcal{U}\}$ 为第 r 次迭代时的局部最优解, 针对式 (13) 中目标函数右侧项, 设 $f_k = -\left| \mathbf{AF}(\theta_k, \phi_k) \right|^2 \omega(\theta_k, \phi_k)^2$, 并在 $\mathbf{p}^{(r)}$ 处进行泰勒展开:

$$\begin{aligned} -\left| \mathbf{AF}(\theta_k, \phi_k) \right|^2 \omega(\theta_k, \phi_k)^2 &\geq (-\omega(\theta_k, \phi_k)^2 \sum_{i=1}^N I_i e^{j k_c \mathbf{p}_i^{(r)T} \mathbf{v}} \omega(\theta_k, \phi_k)^2) + \\ \nabla f_k(\mathbf{p}^{(r)}) (\mathbf{p} - \mathbf{p}^{(r)}) &\triangleq \mu^{(r)} \end{aligned} \quad (16)$$

其中,

$$\nabla f_k(\mathbf{p}^{(r)}) = \begin{bmatrix} \nabla f_k(\mathbf{p}_1^{(r)}) \\ \nabla f_k(\mathbf{p}_2^{(r)}) \\ \vdots \\ \nabla f_k(\mathbf{p}_k^{(r)}) \end{bmatrix} \quad (17)$$

由此, 可以得到 f_k 的下界函数 $\mu^{(r)}$ 。

针对非凸约束 (C10), 在给定局部最优解 $\mathbf{p}_i^{(r)} = \{x_i^{(r)}, y_i^{(r)}, z_i^{(r)} | \forall i \in \mathcal{U}\}$ 处进行泰勒展开, 得到其下界函数:

$$\begin{aligned} L_{i,j} &\geq \|\mathbf{p}_i^{(r)} - \mathbf{p}_j^{(r)}\|_2 + \nabla L(\mathbf{p}_i^{(r)}) (\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_i^{(r)}) + \\ \nabla L(\mathbf{p}_j^{(r)}) (\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_j^{(r)}) &\triangleq \eta_L^{(r)} \end{aligned} \quad (18)$$

其中,

$$\nabla L(\mathbf{p}_i^{(r)}) = \begin{bmatrix} \frac{(\mathbf{p}_i^{(r)} - \mathbf{p}_j) \mathbf{a}}{\|\mathbf{p}_i^{(r)} - \mathbf{p}_j\|_2} \\ \frac{(\mathbf{p}_i^{(r)} - \mathbf{p}_j) \mathbf{b}}{\|\mathbf{p}_i^{(r)} - \mathbf{p}_j\|_2} \\ \frac{(\mathbf{p}_i^{(r)} - \mathbf{p}_j) \mathbf{c}}{\|\mathbf{p}_i^{(r)} - \mathbf{p}_j\|_2} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\nabla L(\mathbf{p}_j^{(r)}) = \begin{bmatrix} \frac{(\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j^{(r)}) \mathbf{a}}{\|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j^{(r)}\|_2} \\ \frac{(\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j^{(r)}) \mathbf{b}}{\|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j^{(r)}\|_2} \\ \frac{(\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j^{(r)}) \mathbf{c}}{\|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j^{(r)}\|_2} \end{bmatrix} \quad (20)$$

通过上述处理, 式 (15) 可以转化为含有迭代值的问题:

$$\begin{aligned} \min_{\{p_i\}} & \left| \mathbf{AF}(\theta_e, \phi_e) \right|^2 \omega(\theta_e, \phi_e)^2 + \mu^{(r)} \\ (C7 \sim C9) & \\ C11: & \eta_L^{(r)} \geq L_{\min}, \forall i, j \in \mathcal{U} \end{aligned} \quad (21)$$

至此, 式 (14) 转化为凸问题, 可以通过标准凸优化算法求解。

2.2 固定无人机阵列排布情况下的机群位置优化子问题

该子问题固定无人机群阵列排布, 通过调整无人机群为每个用户服务时的位置和整体移动路径, 在无人机能量限制下, 实现最优化系统整体保密率。子问题可以表述为:

$$\begin{aligned} \max_{\{p_{k,k}\}} & \sum_{k=1}^K R_{\text{sec}_k} \\ C12: & x_{\min} \leq x_k^U \leq x_{\max}, \forall k \in G \\ C13: & y_{\min} \leq y_k^U \leq y_{\max}, \forall k \in G \\ C14: & H_{\min} \leq z_k^U \leq H_{\max}, \forall k \in G \\ C15: & E_i \geq E_{\min}, \forall i \in \mathcal{U} \\ C16: & D_k \geq D_0, \forall k \in G \end{aligned} \quad (22)$$

其中, 约束 (C12) ~ 约束 (C14) 表示无人机机群位置约束, (C15) 约束保证无人机剩余能量大于最小值 $E_{\min}$, 约束 (C16) 表示无人机给用户所传输信息量需大于最小值 $D_{\min}$, 其中 $D_k = R_{\text{sec}_k} t'_k$ 。该优化问题中, 由于目标函数非凸, 约束 (C15) (C16) 非凸, 无法直接求解, 需要引入适合的辅助变量。

针对式 (22) 中的目标函数, 首先用 $\mathbf{p}^{(r)} = \{\mathbf{p}_k^{(r)} | \forall k \in \mathcal{G}\}$ 表示第 r 次迭代时的局部最优解, 针对目标函数中的 d_k^{-a} 和 d_e^{-a} 项, 在 $\mathbf{p}_k^{(r)}$ 处进行泰勒展开可以得到:

$$d_k^{-a} \geq \left(\|\mathbf{p}_k^G - \mathbf{p}_k^{(r)}\|_2 \right)^{-a} + \nabla d_k^{-a}(\mathbf{p}_k^{(r)}) (\mathbf{p}_k - \mathbf{p}_k^{(r)}) \triangleq \xi_k^{(r)} \quad (23)$$

$$d_e^{-a} \geq \left(\|\mathbf{p}_e - \mathbf{p}_k^{(r)}\|_2 \right)^{-a} + \nabla d_e^{-a}(\mathbf{p}_k^{(r)}) (\mathbf{p}_k - \mathbf{p}_k^{(r)}) \triangleq \xi_e^{(r)} \quad (24)$$

其中,

$$\nabla d_k^{-a}(\mathbf{p}_k^{(r)}) = \begin{bmatrix} \frac{(\mathbf{p}_k^G - \mathbf{p}_k^{(r)}) \mathbf{a}}{\left(\|\mathbf{p}_k^G - \mathbf{p}_k^{(r)}\|_2 \right)^{a+2}} \\ \frac{(\mathbf{p}_k^G - \mathbf{p}_k^{(r)}) \mathbf{b}}{\left(\|\mathbf{p}_k^G - \mathbf{p}_k^{(r)}\|_2 \right)^{a+2}} \\ \frac{(\mathbf{p}_k^G - \mathbf{p}_k^{(r)}) \mathbf{c}}{\left(\|\mathbf{p}_k^G - \mathbf{p}_k^{(r)}\|_2 \right)^{a+2}} \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$\nabla d_e^{-a}(\mathbf{p}_k^{(r)}) = \begin{bmatrix} \frac{(\mathbf{p}_e^G - \mathbf{p}_k^{(r)}) \mathbf{a}}{\left(\|\mathbf{p}_e^G - \mathbf{p}_k^{(r)}\|_2 \right)^{a+2}} \\ \frac{(\mathbf{p}_e^G - \mathbf{p}_k^{(r)}) \mathbf{b}}{\left(\|\mathbf{p}_e^G - \mathbf{p}_k^{(r)}\|_2 \right)^{a+2}} \\ \frac{(\mathbf{p}_e^G - \mathbf{p}_k^{(r)}) \mathbf{c}}{\left(\|\mathbf{p}_e^G - \mathbf{p}_k^{(r)}\|_2 \right)^{a+2}} \end{bmatrix} \quad (26)$$

由此可将目标函数转化为:

$$\hat{R}_{\text{sec}_k} = [\hat{R}_{UG_k} - \hat{R}_{UE}]^+ = \left[B \ln \left(1 + \frac{h_k' P_t G_k}{\sigma^2} \xi_k^{(r)} \right) - B \ln \left(1 + \frac{h_e' P_t G_e}{\sigma^2} \xi_e^{(r)} \right) \right]^+ \quad (27)$$

其中, $h_k' = K_0 (p_k^{\text{LoS}} g_k^{\text{LoS}} + p_k^{\text{NLoS}} g_k^{\text{NLoS}})$, 该函数转化为为了为凸函数相减的形式, 进一步对其右侧项 $f_{\xi_e} = -B \ln \left(1 + \frac{h_e' P_t G_e}{\sigma^2} \xi_e^{(r)} \right)$ 在 $\mathbf{p}_k^{(r)}$ 处进行泰勒展开得到下界函数:

$$f_{\xi_e} \geq f_{\xi_e^{(r)}} - \frac{B h_e' P_t G_e}{\sigma^2 \ln \left(1 + \frac{h_e' P_t G_e}{\sigma^2} \xi_e^{(r)} \right)} (\xi_e - \xi_e^{(r)}) \triangleq \eta_e^{(r)} \quad (28)$$

由此可以将优化目标函数转为凸函数:

$$\tilde{R}_{\text{sec}_k} = \left[B \ln \left(1 + \frac{h_k' P_t G_k}{\sigma^2} \xi_k^{(r)} \right) + \eta_e^{(r)} \right]^+ \quad (29)$$

针对约束 (C16), 分析可知当传输信息量大于规定最小信息量要求时, 对优化目标没有正向增益, 由此该约束可以简化为等式约束, 同时代入约束 (C15) 中, 可得:

$$E_0 - \sum_{k=1}^K P_h \frac{D_{\min}}{R_{UG_k}} - P_m \frac{\sum_{k=1}^K \|\mathbf{p}_k^U - \mathbf{p}_{k-1}^U\|_2}{V} \geq E_{\min} \quad (30)$$

由于该约束存在 $d_k = \|\mathbf{p}_k^U - \mathbf{p}_{k-1}^U\|_2$ 项, 是非凸约束, 通过在局部最优解 $\mathbf{p}_k^{(r)}$ 处进行泰勒展开可得其下界函数:

$$d_k \geq \|\mathbf{p}_k^{(r)} - \mathbf{p}_{k-1}^{(r)}\|_2 + \nabla d_k(\mathbf{p}_k^{(r)}) (\mathbf{p}_k - \mathbf{p}_k^{(r)}) + \nabla d_k(\mathbf{p}_{k-1}^{(r)}) (\mathbf{p}_{k-1} - \mathbf{p}_{k-1}^{(r)}) \triangleq \eta_{d_k}^{(r)} \quad (31)$$

其中,



$$\nabla d_k(\mathbf{p}_k^{(r)}) = \begin{bmatrix} \frac{(\mathbf{p}_k^{(r)} - \mathbf{p}_{k-1})\mathbf{a}}{\|\mathbf{p}_k^{(r)} - \mathbf{p}_{k-1}\|_2} \\ \frac{(\mathbf{p}_k^{(r)} - \mathbf{p}_{k-1})\mathbf{b}}{\|\mathbf{p}_k^{(r)} - \mathbf{p}_{k-1}\|_2} \\ \frac{(\mathbf{p}_k^{(r)} - \mathbf{p}_{k-1})\mathbf{c}}{\|\mathbf{p}_k^{(r)} - \mathbf{p}_{k-1}\|_2} \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$\nabla d_k(\mathbf{p}_{k-1}^{(r)}) = \begin{bmatrix} \frac{(\mathbf{p}_k - \mathbf{p}_{k-1}^{(r)})\mathbf{a}}{\|\mathbf{p}_k - \mathbf{p}_{k-1}^{(r)}\|_2} \\ \frac{(\mathbf{p}_k - \mathbf{p}_{k-1}^{(r)})\mathbf{b}}{\|\mathbf{p}_k - \mathbf{p}_{k-1}^{(r)}\|_2} \\ \frac{(\mathbf{p}_k - \mathbf{p}_{k-1}^{(r)})\mathbf{c}}{\|\mathbf{p}_k - \mathbf{p}_{k-1}^{(r)}\|_2} \end{bmatrix} \quad (33)$$

因此, 式 (22) 可以转化为含有迭代值的问题 (34)。

$$\max_{\{\mathbf{p}_k\}} \sum_{k=1}^K \tilde{R}_{\text{sec}_k} \quad (\text{C12} \sim \text{C14})$$

$$\text{C17: } E_0 - \sum_{k=1}^K P_h \frac{D_{\min}}{R_{UG_k}} - P_m \frac{\sum_{k=1}^K \eta_{d_k}^{(r)}}{V} \geq E_{\min}, \forall k \in G \quad (34)$$

至此, 上述问题中非凸约束被转化为凸约束, 目标函数也为凸函数, 可以通过标准凸优化或 CVX 求解器进行求解。

2.3 协作波束成形优化算法流程

基于上述的问题分析和求解, 本节提出了一种有效的优化迭代算法。该算法通过依次求解式 (21) 和式 (34), 进而解决式 (13), 当相邻两次迭代目标函数值之差小于设定精度 ε 或达到最大迭代次数 $l_{\max}$ 时, 可得到最优的 UAV 移动路径, 同时得到最大的用户传输保密率, 具体算法流程如下所示。

步骤 1 初始化 $\{\mathbf{p}_i^U = [x_i^U y_i^U z_i^U]\}$, 设置迭代次数 $l=0$, 误差精度 ε 等参数。

步骤 2 固定无人机机群整体位置 $\{\mathbf{p}_k^{(l)} = [x_k^{(l)} y_k^{(l)} z_k^{(l)}]\}$, 通过求解式 (21), 获得最优的无人机阵列排布 $\{\mathbf{p}_i^{(l+1)} = [x_i^{(l+1)} y_i^{(l+1)} z_i^{(l+1)}]\}$ 。

步骤 3 固定无人机群阵列排布 $\{\mathbf{p}_i^{(l+1)} = [x_i^{(l+1)} y_i^{(l+1)} z_i^{(l+1)}]\}$, 通过求解式 (34), 获得最优的无人机机群整体位置 $\{\mathbf{p}_k^{(l+1)} = [x_k^{(l+1)} y_k^{(l+1)} z_k^{(l+1)}]\}$ 。

步骤 4 判断两次迭代差值是否小于误差精度 $R_{\text{sec}}^{(l+1)} - R_{\text{sec}}^{(l)} < \varepsilon$ 或到达最大迭代次数或 $l > l_{\max}$, 若满足条件则输出最优解无人机位置 $\{\mathbf{p}_{i,k}^U = [x_{i,k}^U y_{i,k}^U z_{i,k}^U]\}$, 否则跳转到步骤 2。

2.4 算法复杂度与信息依赖性分析

记无人机数量和用户数量分别为 N 和 K , 则上述第 2.1 节优化问题的复杂度可以表示为 $\mathcal{O}(3N)^3$, 第 2.2 节优化问题的复杂度为 $\mathcal{O}(3K)^3$ 。通过交替优化, 总复杂度为 $\mathcal{O}\left(\log \frac{1}{\varepsilon} ((3K)^3 + (3N)^3)\right)$ 。当无人机群规模足够大, 即 $N \gg K$ 时, 总复杂度可以简化为 $\mathcal{O}\left((3N)^3 \log \frac{1}{\varepsilon}\right)$ 。本文所提算法采取波束成形技术, 需要依赖于信道状态信息、地面用户节点位置等信息实现系统整体最优的安全通信。

3 仿真结果与分析

为验证所提算法的有效性并评估算法性能, 本节利用 MATLAB 对所提算法进行仿真, 并对仿真结果进行分析。

3.1 参数设置

仿真场景设置为一个 $1000 \text{ m} \times 1000 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ 的三维区域, 区域内分布用户节点和窃听者。假设无人机的初始能源限制为 $E_0 = 6000 \text{ J}$, 设置初始用户节点 6 个, 窃听节点 1 个。其余无人机飞行和通信相关参数参考相关文献[4,16,26], 并针对本文场景选取设置, 无人机飞行和通信相关参数见表 1。

表1 无人机飞行和通信相关参数

符号	物理意义	值
$H_{\min}$	UAV 最小飞行高度	50 m
$H_{\max}$	UAV 最大飞行高度	200 m
V	无人机飞行速度	30 m/s
σ^2	噪声功率	-80 dBm
B	通信带宽	1 MHz
f_c	载波频率	2.4 GHz
K_0	路径损耗常数	2
β_0, β_1	信道相关常量	10、0.6
P_t	天线阵列总发射功率	20 dBm
P_c	无人机通信能耗	5 W
R	UAV 旋翼半径	0.4 m
A	UAV 旋翼面积	0.503 m^2
U_{tip}	UAV 旋翼尖端速度	120 m/s
v_0	UAV 平均旋翼诱导速度	4.03 m/s
d_0	UAV 机身阻力比	0.6
s	UAV 旋翼实度	0.05
P_0	UAV 桨叶轮廓功率常数	79.856 3
P_i	UAV 诱导功率常数	88.627 9
D	每个用户处传输数据量	50 MB
$E_{\min}$	UAV 最小能量限制	1 000 J
$L_{\min}$	UAV 最小距离限制	0.5 m

3.2 仿真结果分析

无人机协作波束成形波束强度如图2所示,展示了本文算法所搭建的一组多无人机VAA协作波束成形所得到的波束强度图。由图2中可以看出,波束在用户方向集中增强,在窃听者方向信号强度削弱。可以实现增强系统整体保密率的目的。

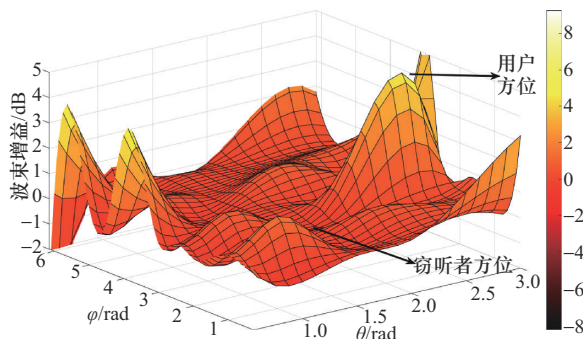


图2 多无人机协作波束成形波束强度

UAV飞行轨迹如图3所示,展示了当存在6个合法用户节点和1个非法窃听用户时,由8架无人机组成的无人机阵列进行安全通信的无人机飞行轨迹。可以看到,为达到最优传输保密率,无人机阵列会在有限能量下倾向于接近用户节点的同时远离窃听节点。无人机阵列悬停通信时会构建最优虚拟天线阵列,以针对用户处产生波束增益,同时抑制窃听者方位波束。图3中放大展示了无人机群在和其中3个地面用户通信时无人机阵列相对位置排布,可以看出,由于每个无人机均存在各自的能量限制和无人机阵列波束指向性要求,无人机群和不同地面用户通信时阵列排布均会发生相对变化。

系统保密率随无人机数量变化曲线如图4所示,展示了固定无人机发射总功率时不同UAV数量下的系统总保密率。同时对比了不同飞行方案与无人机携带初始能量 E_0 下系统所能达到的最优保密率,对本文算法进行了有效评估。其中对比方案1采取最优无人机机群位置固定,优化VAA排布获得不同指向性波束的方案;对比方案2采取先计算出固定的最优无人机阵列排布,然后保持固定VAA优化UAV阵列整体移动轨迹的方案。由图4可以看出,当无人机携带能量 E_0 相同时,随着无人机阵列中无人机数量的增加,3种算法的保密率均有所增加,这是由于组成VAA的天线单元越多,其协作波束成形所形成的波束指向性越强。当机群总数较少时,无人机数量的增加会带来更显著的波束增益,从而实现更快的保密率上涨。本文所提算法由于采用同步动态调整VAA阵列排布和无人机群移动路径的方案,具有更高的可移动性,由此带来的高自由度使系统相较于两种对比方案具有更高的保密率。对比相同算法下,单无人机初始携带能量 E_0 更少的方案系统保密性能更弱,同时无人机总数较多时该衰减较少,这是由于无人机数量的增加可以分担单无人机电能消耗压力,实现更优的整体性能。与对比算法

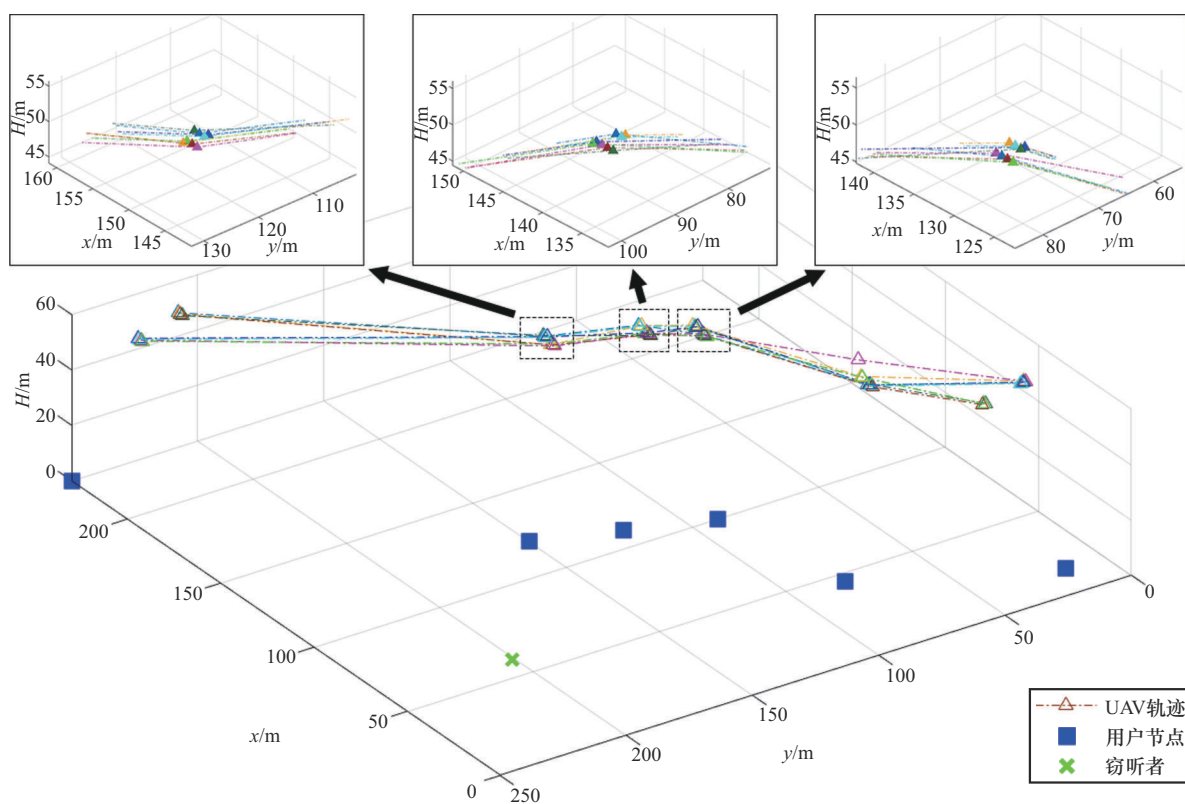


图3 UAV飞行轨迹

进行比较,可以看出本文所提算法在较低 E_0 时依然可以带来更优的系统安全性能。

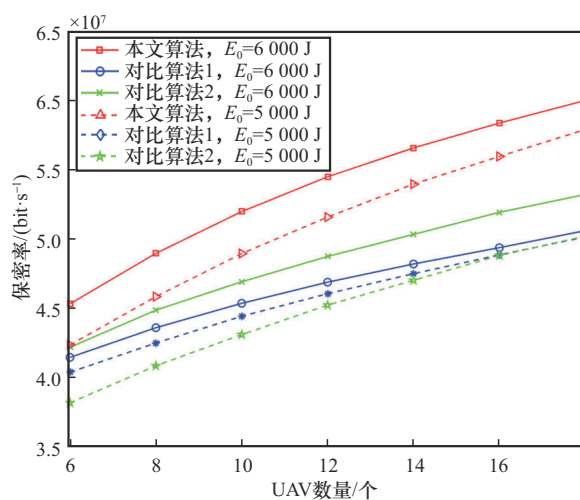


图4 系统保密率随无人机数量变化曲线

平均保密率随用户数量的变化曲线如图5所示,比较了不同方案下用户平均保密率随用户数量的变化。可以看到,当用户数量增加时,平均

保密率会相应下降,这是因为当服务用户数量过多时 UAV 传输和移动能耗均会增加, UAV 由于存在能量限制使其无法选择最优点位进行数据传输。本文所提算法在不同用户节点数量和不同 E_0 的情况下,保密率均高于对比算法,因为在能量受限系统中,本文方案可以通过实时动态调整 VAA 排布,利用无人机小范围移动实现更高的保密率目标。当地面用户数量足够多时,对比方案2因无人机群移动所需消耗的能量大幅增加,在较小 E_0 情况下,该方案无人机群位置选择更为恶劣,导致保密率会加速下降以至低于对比方案1所得保密率。

平均保密率随 UAV 初始能量变化曲线如图6所示,比较了不同用户数量下用户平均保密率随无人机初始能量的变化。可以看到,当无人机所携带的初始能量增加时,用户平均保密率也会随之增加,这是因为当地面用户位置不变时,更多

的能量携带可以支撑无人机运行到更优的通信位置；当初始能量超过一定程度时平均保密率增速变缓且趋于相同，该平稳点随用户数量增加所需能量更大，这是因为平稳点处能量已经可以满足 UAV 飞行到该用户数量下的最佳通信位置并对用户进行波束成形，进一步的能量增加对整体系统安全性能不会有更多的提升。

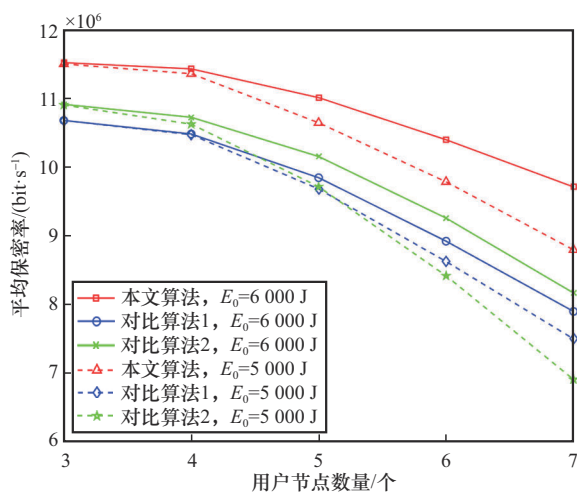


图5 平均保密率随用户数量的变化曲线

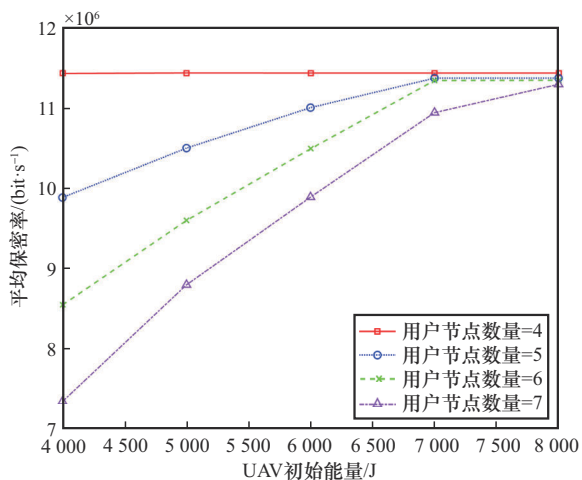


图6 平均保密率随 UAV 初始能量变化曲线

考虑环境影响和设备精度等因素，无人机不可避免地会存在定位误差和姿态抖动，而由此带来的无人机位置随机扰动会造成峰值功率降低、波束展宽等影响，从而衰减无人机阵列通信性

能。本文采用 $\delta = \frac{D_{Er}}{\lambda}$, $\delta \in [0, \delta_{\max}]$ 表示归一化无人机随机位置扰动。存在无人机随机位置扰动时的保密率曲线如图7所示，展示了当存在无人机随机位置扰动 $\delta_{\max} = 0.3$ 时，不同无人机数量下保密率随无人机数量的变化。可以看到，随着无人机数量的增加，由位置扰动所带来的系统衰减也会缓慢增加。相比对比算法1，本文算法受到无人机位置随机扰动后所造成的保密率衰减更小，具有更强的抗扰动性。无人机随机位置扰动会削减协作波束成形质量，降低系统保密率，但本文方案依然可以实现提升整体系统安全性能的目的。

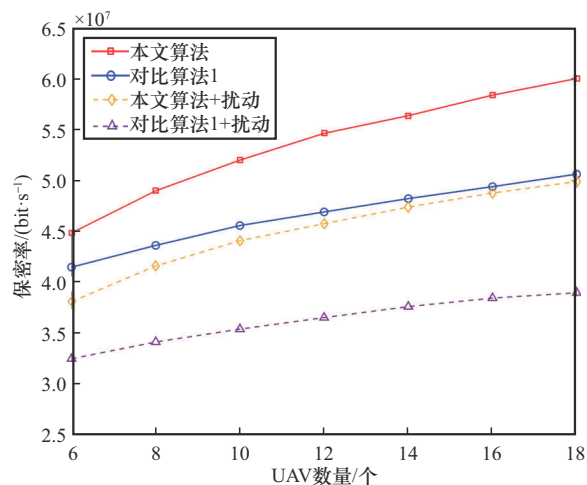


图7 存在无人机随机位置扰动时的保密率曲线

4 结束语

本文在无人机辅助通信系统中，提出了一种基于协作波束成形的无人机群安全通信算法。在无人机能量、传输信息量等约束条件限制下，通过优化无人机群中各无人机的排布和机群整体位置，最大化系统的保密率。针对优化问题非凸的情况，本文将原始问题分解为两个子问题，并通过泰勒展开、凸松弛等方式，设计了一种循环迭代的凸逼近算法进行求解。通过仿真模拟和结果分析，本文提出的优化方案充分利用了无人机群



的高移动性和高自由度,通过实时动态调整机群阵列和整体位置,相比传统静态优化方案,可以更加有效地提升系统保密率,实现物理层安全通信。

参考文献:

- [1] GERACI G, GARCIA-RODRIGUEZ A, AZARI M M, et al. What will the future of UAV cellular communications be? A flight from 5G to 6G[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2022, 24(3): 1304-1335.
- [2] XIAO Z Y, ZHU L P, LIU Y M, et al. A survey on millimeter-wave beamforming enabled UAV communications and networking[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2022, 24(1): 557-610.
- [3] WANG Z, ZHOU F H, WANG Y H, et al. Joint 3D trajectory and resource optimization for a UAV relay-assisted cognitive radio network[J]. China Communications, 2021, 18(6): 184-200.
- [4] ZENG Y, XU J, ZHANG R. Energy minimization for wireless communication with rotary-wing UAV[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(4): 2329-2345.
- [5] GAO Y F, WU Y, CUI Z C, et al. Robust trajectory and communication design for angle-constrained multi-UAV communications in the presence of jammers[J]. China Communications, 2022, 19(2): 131-147.
- [6] 白恒志,王海超,李国鑫,等. 无人机隐蔽通信网络研究综述[J]. 电信科学, 2023, 39(8): 1-16.
BAI H Z, WANG H C, LI G X, et al. Review on unmanned aerial vehicle covert communication network[J]. Telecommunications Science, 2023, 39(8): 1-16.
- [7] DONG R Z, WANG B H, CAO K R, et al. Hybrid beamforming for secure transmission of massive MIMO UAV communication networks[J]. IEEE Systems Journal, 2023, 17(3): 4200-4211.
- [8] 罗俊松,黄平,罗欣悦,等. 空中可重构智能表面辅助的全双工无人机安全通信[J]. 电信科学, 2024, 40(7): 34-50.
LUO J S, HUANG P, LUO X Y, et al. Aerial reconfigurable intelligent surfaces-assisted full-duplex UAV secure communication[J]. Telecommunications Science, 2024, 40(7): 34-50.
- [9] DONG R Z, WANG B H, CAO K R. Deep learning driven 3D robust beamforming for secure communication of UAV systems[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2021, 10(8): 1643-1647.
- [10] YIN Y, LIU M, GUI G, et al. Minimizing delay for MIMO-NOMA resource allocation in UAV-assisted caching networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(4): 4728-4732.
- [11] KANATAS A G. Spherical random arrays with application to aerial collaborative beamforming[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023, 71(1): 550-562.
- [12] LIANG S, FANG Z Y, SUN G, et al. JSSA: joint sidelobe suppression approach for collaborative beamforming in wireless sensor networks[J]. IEEE Access, 2019, 7: 151803-151817.
- [13] YU L M, CHENG Y F, HONG T, et al. Research on collaborative beamforming for a distributed satellite cluster based on convex optimization[C]//Proceedings of the 2019 International Symposium on Advanced Electrical and Communication Technologies (ISAECT). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [14] 许方敏,史文策,冯涛,等. 基于联合波束赋形的无人机辅助通信网络上行传输技术[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(3): 871-880.
XU F M, SHI W C, FENG T, et al. UAV assisted communication network uplink transmission technology based on joint beamforming[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2022, 44(3): 871-880.
- [15] JUNG H, LEE I H. Secrecy rate of analog collaborative beamforming with virtual antenna array following spatial random distributions[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2018, 7(4): 626-629.
- [16] ZHANG C, SUN G, LI J H, et al. Bi-objective optimization for UAV swarm-enabled relay communications via collaborative beamforming[C]//Proceedings of the 2023 26th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD). Piscataway: IEEE Press, 2023: 984-989.
- [17] MOZAFFARI M, SAAD W, BENNIS M, et al. Communications and control for wireless drone-based antenna array[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(1): 820-834.
- [18] GUO W B, DU J X, YAN M, et al. Impact of position perturbation on distributed collaborative beamforming using UAV swarm[C]//Proceedings of the 2023 IEEE International Confer-

- ence on Communications Workshops (ICC Workshops). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1908-1913.
- [19] JANG G, YOU B, LEE I H, et al. Secrecy rate degradation of ground-to-air collaborative beamforming due to UAV jitter[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(9): 12361-12366.
- [20] 郭文博, 杜嘉鑫, 杨健, 等. 运动平台分布式功率合成效能分析[J]. 通信学报, 2023, 44(11): 143-150.
- GUO W B, DU J X, YANG J, et al. Efficiency analysis of distributed power combining for mobile platform[J]. Journal on Communications, 2023, 44(11): 143-150.
- [21] DU J X, GUO W B, YAN M, et al. Location error analysis for collaborative beamforming in UAVs random array[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2024, 13(3): 904-907.
- [22] GUO X R, MEI F, SUN G, et al. A multi-objective optimization approach for secure communications based on collaborative beamforming in UAV networks[C]//Proceedings of the 2023 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-6.
- [23] LI J H, SUN G, KANG H, et al. Multi-objective optimization approaches for physical layer secure communications based on collaborative beamforming in UAV networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2023, 31(4): 1902-1917.
- [24] SUN G, LI J H, WANG A M, et al. Secure and energy-efficient UAV relay communications exploiting collaborative beamforming[J]. IEEE Transactions on Communications, 2022, 70(8): 5401-5416.
- [25] ZHANG Y Z, LIU Y H, SUN G, et al. Multi-objective optimization for joint UAV-AGV collaborative beamforming[C]//Proceedings of the 2022 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). Piscataway: IEEE Press, 2022: 150-157.
- [26] JUNG H, LEE I H, JOUNG J. Security energy efficiency analysis of analog collaborative beamforming with stochastic virtual antenna array of UAV swarm[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(8): 8381-8397.
- [27] JANG G, YOU B, LEE I H, et al. Secrecy rate degradation of ground-to-air collaborative beamforming due to UAV jitter[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(9): 12361-12366.

[作者简介]



韩东升 (1980-), 男, 博士, 华北电力大学电子与通信工程系教授, 主要研究方向为无线通信新技术、电力系统通信。



赵逸朔 (2000-), 男, 华北电力大学电子与通信工程系硕士生, 主要研究方向为无线通信新技术。