



## 无人机辅助通信系统的安全能效研究

杨茂林<sup>1\*</sup> 高静<sup>2</sup> 马俊驰<sup>3</sup> 孙浩楠<sup>4</sup> 陈冰<sup>5</sup>

1. 杨茂林, 天津师范大学, 研究方向: 无线通信, [yangmaolin621@163.com](mailto:yangmaolin621@163.com)
2. 高静, 天津师范大学, 研究方向: 无线通信, [Jing401@163.com](mailto:Jing401@163.com)
3. 马俊驰, 天津师范大学, 研究方向: 无线通信, [mx19977@163.com](mailto:mx19977@163.com)
4. 孙浩楠, 天津师范大学, 研究方向: 人工智能, [sunsun\\_wings@163.com](mailto:sunsun_wings@163.com)
5. 陈冰, 天津师范大学, 研究方向: 人工智能, [bing0812150121@163.com](mailto:bing0812150121@163.com)

\*通讯作者: 杨茂林

**摘要:** 无人机(Unmanned aerial vehicle, UAV)辅助通信技术凭借其灵活的部署和配置、高度的机动性以及强大的自适应能力而备受关注。如何提高无人机信息传输的安全性和能量效率一直是研究重点。本文考虑无人机辅助通信中的窃听场景, 通过交替优化无人机的飞行轨迹和发射功率来实现无人机与地面终端的安全节能通信, 定义安全能效为性能指标, 即服务时长内无人机推进能量消耗下的总保密率。由于目标函数非凸, 首先将其分解为固定功率下的轨迹设计问题和固定轨迹下的功率分配问题两个子问题, 然后使用凹凸过程(concave-convex process, CCCP)将子问题近似为凸优化问题, 提出了一种基于顺序凸规划(sequential convex programming, SCP)的迭代算法。最后, 通过交替优化子问题来得到原问题的解。仿真结果表明, 本文提出的方法可以有效地提高系统的安全容量和安全能效。

**关键词:** 无人机辅助通信, 安全与能效, 轨迹设计, 功率优化

## Research on the Safety and Energy Efficiency of UAV-assisted Communication Systems

**Abstract:** Unmanned aerial vehicle (UAV)-assisted communication technologies have attracted much attention due to their flexible deployment and configuration, high mobility, and powerful adaptive capabilities. The research focus has been on how to improve the security and energy efficiency of UAV information transmission. In this paper, considering the eavesdropping scenario in UAV-assisted communication, secure and energy-efficient communication between

2790-0622© Shuangqing Academic Publishing House Limited All rights reserved.

Article history: Received July 25, 2023 Accepted August 15, 2023 Available online August 18, 2023

To cite this document: 杨茂林,高静,马俊驰,孙浩楠,陈冰(2023). 无人机辅助通信系统的安全能效研究. 计算机科学(香港), 第3卷第1期, 29-37页.

Doi: <https://doi.org/10.55375/cps.2023.3.4>

UAVs and ground terminals is achieved by alternately optimizing the flight trajectory and transmitting power of UAVs and defining secure energy efficiency as the performance index, i.e., the total secrecy rate under UAV propulsion energy consumption during the service time. Since the objective function is nonconvex, it is decomposed into two subproblems, the trajectory design problem under fixed power and the power allocation problem under fixed trajectory. Then the subproblems are approximated as convex optimization problems using the concave-convex process (CCCP), and an iterative algorithm based on sequential convex programming (SCP) is proposed. Finally, the solution to the original problem is obtained by alternately optimizing the subproblem. Simulation results show that the method proposed in this paper can effectively improve the system's safety capacity and energy efficiency.

**Keywords:** *UAV-assisted communication, Safety and energy efficiency, Trajectory design, Power optimization*

随着无线通信技术的发展，传统的基础设施很难满足多样化的服务质量(quality of service, QoS)，相反无人机辅助通信技术凭借其高机动性、灵活的部署以及强大的自适应性而被广泛的应用<sup>[1]</sup>。无人机的高机动性提高了系统的自由度，通信运营商可以通过设计无人机的飞行轨迹来提高通信服务质量。同样无人机的灵活性和自适应性给通信网络设计带来了更多的可能。

目前，无人机辅助通信主要面临两大挑战：一是由于无线信道的传播特性导致地面终端易受到窃听和攻击，如何保证信息传输的安全性；二是无人机携带的能量十分有限，如何提高无人机辅助通信中能量效率。一方面，无人机与地面终端的信道常常被视为视距(line of sight, LoS)信道，往往更容易受到窃听端的截获。因此，保证信息传输的安全性是无人机辅助无线通信面临的重要问题之一。传统的加密技术需要复杂的密钥管理过程，并且解密复杂度和安全性受到加密类型和密钥类型的影响<sup>[2,3]</sup>。物理层安全技术的提出克服了上述缺点。物理层安全最早起源于 Shannon 的信息论<sup>[4]</sup> 它利用物理信道的唯一性和互易性来实现信息加密，可以极大的增强系统的安全性，实现保密信道的最大传输速率。继 Shannon 之后，Wyner<sup>[5]</sup> 将窃听信道编码的速率定义为保密容量；Csiszár 和 Körner<sup>[6]</sup> 提出了离散无记忆窃听信道的安全容量。其后，Zhang<sup>[7]</sup> 等人通过联合优化无人机的轨迹和发射功率提高了无人机与多个地面终端的安全容量。此外，无人机到窃听端的信道很可能优于无人机到地面终端的信道，导致保密率为零，一种有效的方法是无人机作为空中干扰源发送人工噪声来干扰窃听端，降低窃听端信道的性能<sup>[8]</sup>。另一方面，无人机辅助通信需要消耗大量的能量，自身携带的能量十分有限。如何在满足通信性能要求的同时尽可能减少能量消耗是又一难点问题。与传统无线通信系统的能耗问题不同的是无人机辅助通信技术的能耗问题决定着整个通信系统的正常运作<sup>[9,10]</sup>。其能量消耗不仅包括信息传输相关能耗，还包括维持飞行和悬停的能量消耗<sup>[11,12]</sup>。Zeng 和 Zhang<sup>[13]</sup> 等人同时考虑了无人机的通信吞吐量和能量消耗，推导出了固定翼无人机推进能耗模型，通过无人机的轨迹设计提高了无人机能量效率。Zeng<sup>[14]</sup> 等人继而提出了螺旋桨无人机的推进能耗模型，在满足系统吞吐量的前提下通过优化无人机的轨迹最小化无人机推进能耗。

综上，无人机辅助无线通信场景中，已有研究成果主要集中在两个方面：一、通过提高无人机与地面终端的保密容量来增强系统的安全性。二、通过无人机的轨迹设计来提高系统的能量效率。在本文中，我们兼顾考虑系统的安全性和能量效率，研究了固定翼无人机辅助通信的安全能效性能。其中，无人机作为信源和地面终端进行通信，地面窃听端作为非法接收端进行窃听或攻击。为保证和地面终端的保密容量，无人机在发送通信信号的同时发射人工噪声。通过联合优化无人机的轨迹和发射功率来平衡系统的保密容量和能量消耗，有效提高了系统的安全能效，实现无人机与地面终端的安全节能通信。

## 1 系统模型和问题构建

### 1.1 系统模型

本文考虑一个包括固定翼无人机信源、地面终端和地面窃听端的场景，如图 1 所示。其中，无人机作为

信源和地面终端相互通信，地面窃听端作为非法接收端旨在窃听或拦截无人机和地面终端的通信。为保证和地面终端的保密容量，无人机在发送通信信号的同时发射人工噪声，因为是同一架无人机，人工噪声可以设置为只降低窃听端的信道容量<sup>[15,16]</sup>。假设所有通信节点的位置都是已知的，其中窃听端的位置可以通过无人机配备的光学相机和SAR来检测获得<sup>[17]</sup>。

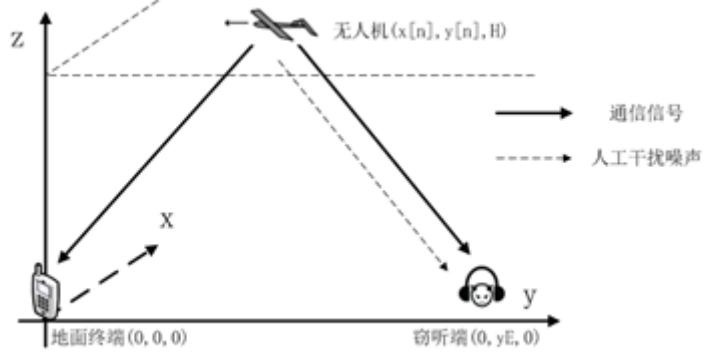


图1 通信系统原理图

假设无人机在服务时间  $T$  内以恒定高度  $H$  飞行， $H$  设置为在不需要频繁躲避障碍物情况下的最低飞行高度。为了简化问题，我们离散化服务时长  $T$  为  $N$  个时隙，即  $T = N\delta_t$ 。假设  $\delta_t$  足够小，则无人机的位置在每个时隙中近似不变。在一个三维笛卡尔坐标系中，地面终端和地面窃听端的位置分别定义为  $q_G \triangleq (0, 0, 0)^T$  和  $q_E \triangleq (0, y_E, 0)^T$  表示。无人机在每个时隙中的飞行轨迹定义为  $q[n] \triangleq (x_u[n], y_u[n], H)^T$ ， $n = 1, \dots, N$ 。由于无人机、地面终端以及窃听端的高度固定，下文中其坐标用水平坐标表示，即  $q_G = (0, 0)^T$ 、 $q_E = (0, y_E)^T$ 、 $q[n] = (x_u[n], y_u[n])^T$ ， $n = 1, \dots, N$ 。无人机的起始和终止速度、起始和终止位置分别定义为  $v_0$ ， $v_F$ ， $q_0 \triangleq (x_0, y_0)$ ， $q_F \triangleq (x_F, y_F)$ 。无人机到地面终端和窃听端的距离分别为

$$d_{UG}[n] = \sqrt{\|q[n]\|^2 + H^2}, n = 0, \dots, N \quad (1a)$$

$$d_{UE}[n] = \sqrt{\|q[n] - q_E\|^2 + H^2}, n = 0, \dots, N \quad (1b)$$

假设无人机移动导致的多普勒效应被完美补偿，无人机与地面设备的通信信道视为LoS信道，无人机与地面终端和窃听端的信道遵循自由空间的路径损耗模型分别表示为

$$h_{UG}[n] = \beta_0 d_{UG}^{-2}[n] = \frac{\beta_0}{\|q[n]\|^2 + H^2}, n = 0, \dots, N \quad (2a)$$

$$h_{UE}[n] = \beta_0 d_{UE}^{-2}[n] = \frac{\beta_0}{\|q[n] - q_E\|^2 + H^2}, n = 0, \dots, N \quad (2b)$$

用  $P[n]$  和  $P_n[n]$  分别表示每个时隙中通信信号和人工干扰噪声的发射功率，实际应用中无人机的发射功率一般会受到平均功率  $P_{ave}$  和峰值功率  $P_{max}$  的限制，则无人机的发射功率约束为

$$\sum_{n=1}^N (P[n] + P_n[n]) \leq NP_{ave} \quad (3a)$$

$$0 \leq P[n] + P_n[n] \leq P_{max} \quad (3b)$$

$$P[n], P_n[n] \geq 0, n = 1, \dots, N \quad (3c)$$

在没有窃听端干扰的情况下，第  $n$  个时隙中无人机到地面终端和窃听端的可实现传输速率（比特/秒/赫兹）分别为

$$R_{UG}[n] = B \log_2 \left( 1 + \frac{P[n] h_{UG}[n]}{\delta^2} \right) = B \log_2 \left( 1 + \frac{P[n] \gamma_0}{\|q[n]\|^2 + H^2} \right) \quad (4)$$

$$R_{UE}[n] = B \log_2 \left( 1 + \frac{P[n] h_{UE}[n]}{P_n[n] h_{UE}[n] + \delta^2} \right) = B \log_2 \left( 1 + \frac{\frac{P[n] \beta_0}{\|q[n] - q_E\|^2 + H^2}}{\frac{P_n[n] \beta_0}{\|q[n] - q_E\|^2 + H^2} + \delta^2} \right) \quad (5)$$

其中， $\delta^2$  为信道的加性高斯白噪声功率， $B$  为信道带宽， $\gamma_0 = \beta_0 / \delta^2$  为参考信噪比。

系统在第  $n$  个时隙中的安全容量为

$$R_{\text{sec}}(\{P[n], P_n[n], q[n]\}) = \sum_{n=1}^N [R_{UG}[n] - R_{UE}[n]]^+ \quad (6)$$

其中,  $(x)^+ \triangleq \max(x, 0)$ 。

由于无人机发送和处理信息的能耗远远小于推进能耗, 因此我们只考虑无人机的推进能耗<sup>[11]</sup>。在服务时长内, 固定翼无人机的推进能耗模型如下<sup>[13]</sup>

$$E(\{v[n], a[n]\}) = \sum_{n=1}^N \left( c_1 ||v[n]||^3 + \frac{c_2}{||v[n]||} \left( 1 + \frac{||a[n]||^2 - \frac{(a^\top[n] v[n])^2}{||v[n]||^2}}{g^2} \right) \right) + \frac{\Delta k}{\delta_t} \quad (7)$$

不难看出, 无人机的推进能耗是关于无人机飞行速度  $v[n]$  和加速度  $a[n]$  的函数。其中,  $g = 9.8m/s^2$  是重力加速度,  $c_1$  和  $c_2$  是由无人机的重量和空气密度等因素决定的常数参数,  $\Delta k = 1/2m(||v_F||^2 - ||v_0||^2)$  是无人机动能的变化量,  $m$  是无人机的质量。

在离散状态空间中, 通过一阶和二阶泰勒展开式将无人机在第  $n$  个时隙中的坐标  $q[n]$ 、速度  $v[n]$  和加速度  $a[n]$  之间的关系表示如下<sup>[13]</sup>

$$v[n+1] = v[n] + a[n]\delta_t, n = 0, \dots, N \quad (8a)$$

$$q[n+1] = q[n] + v[n]\delta_t + \frac{1}{2}a[n]\delta_t^2, n = 0, \dots, N \quad (8b)$$

结合公式 (6) 和 (7), 我们定义系统安全能效为<sup>[18]</sup>

$$EE_{\text{sec}}(\{P[n], P_n[n], q[n], v[n], a[n]\}) = \frac{R_{\text{sec}}(\{P[n], P_n[n], q[n]\})}{E(\{v[n], a[n]\})} \quad (9)$$

## 1.2 问题表述

在实际应用中, 无人机的轨迹、速度和加速度都会受到一定的约束。假设满足这些约束条件, 本文研究目标为通过联合优化无人机的轨迹  $q[n]$ 、速度  $v[n]$ 、加速度  $a[n]$  和发射功率  $P[n]$ ,  $P_n[n]$  来最大化系统的安全能效。具体问题表述为

(P1):

$$\max_{\{P[n], P_n[n], q[n], v[n], a[n]\}} \frac{R_{\text{sec}}(\{P[n], P_n[n], q[n]\})}{E(\{v[n], a[n]\})} \quad (10a)$$

$$\text{s.t. } q[0] = q_0, q[N+1] = q_F \quad (10b)$$

$$v[0] = v_0, v[N+1] = v_F \quad (10c)$$

$$||v[n]|| \leq v_{\max}, n = 1, \dots, N \quad (10d)$$

$$||v[n]|| \geq v_{\min}, n = 1, \dots, N \quad (10e)$$

$$||a[n]|| \leq a_{\max}, n = 0, \dots, N \quad (10f)$$

$$(3a), (3b), (3c), (8a), (8b)$$

其中,  $v_{\max}$  和  $v_{\min}$  分别为无人机的最大和最小飞行速度,  $a_{\max}$  表示最大加速度。由于 (10a) 和 (10e) 非凸, 因此不能采用标准的凸优化方法直接求解<sup>[19]</sup>。

## 2 问题求解

本节将问题(P1)分解为功率固定的轨迹设计问题和轨迹固定的功率优化问题两个子问题。使用 CCCP 将子问题近似为凸优化问题, 提出一种基于 SCP 的迭代算法, 通过交替优化子问题得到原问题的解。

### 2.1 功率固定的轨迹设计问题

假设无人机的发送功率  $P[n]$  和  $P_n[n]$  为常数, 在本小节中分别用  $\tilde{P}[n]$  和  $\tilde{P}_n[n]$  表示。问题 (P1) 重新表述为

$$\begin{aligned} & \max_{\{q[n], v[n], a[n]\}} \frac{\sum_{n=1}^N B \left[ \left( \log_2 \left( 1 + \frac{\tilde{P}[n] \gamma_0}{||q[n]||^2 + H^2} \right) - \log_2 \left( 1 + \frac{\frac{\tilde{P}[n] \beta_0}{||q[n] - q_E||^2 + H^2}}{\frac{\tilde{P}_n[n] \beta_0}{||q[n] - q_E||^2 + H^2} + \delta^2} \right) \right) \right]^+}{E(\{v[n], a[n]\})} \\ & \text{s.t. } (8a), (8b), (10b) \sim (10f) \end{aligned} \quad (11a)$$

(11b)

其中  $(x)^+$  可以在不失最优性的前提下去除。

根据 [13], 无人机推进能耗  $E(\{v[n], a[n]\})$  的上界表示为

$$E(\{v[n], a[n]\}) \leq \sum_{n=1}^N \left( c_1 ||v[n]||^3 + \frac{c_2}{||v[n]||} + \frac{c_2 ||a[n]||^2}{g^2 ||v[n]||} \right) + \frac{\Delta k}{\delta_t} \triangleq E_{ub}(\{v[n], a[n]\}) \quad (12)$$

公式 (12) 中  $a^T[n]v[n] = 0, n = 0, \dots, N$  对于匀速飞行是紧的。

引入松弛变量  $\mu_n$  和  $\tau_n$ , 重新表述问题 (P1.1)

(P1.2):

$$\begin{aligned} & \max_{\{q[n], v[n], a[n]\}} \frac{\sum_{n=1}^N B \left( \log_2 \left( 1 + \frac{\tilde{P}[n] \gamma_0}{||q[n]||^2 + H^2} \right) + \log_2 \left( \frac{\tilde{P}_n[n] \beta_0}{||q[n] - q_E||^2 + H^2} + \delta^2 \right) - \log_2 \left( \frac{\tilde{P}[n] \beta_0}{\mu_n} + \frac{\tilde{P}_n[n] \beta_0}{\mu_n} + \delta^2 \right) \right)}{\sum_{n=1}^N \left( c_1 ||v[n]||^3 + \frac{c_2}{\tau_n} + \frac{c_2 ||a[n]||^2}{g^2 \tau_n} \right) + \frac{\Delta k}{\delta_t}} \\ & \text{s.t. } (8a), (8b), (10b) \sim (10d), (10f) \end{aligned} \quad (13a)$$

$$\tau_n \geq v_{\min}, n = 1, \dots, N \quad (13c)$$

$$||v[n]||^2 \geq \tau_n^2, n = 1, \dots, N \quad (13d)$$

$$||q[n] - q_E||^2 + H^2 \geq \mu_n, n = 1, \dots, N \quad (13e)$$

$$\mu_n \geq H^2, n = 1, \dots, N \quad (13f)$$

可以证明, 当且仅当(13d)和(13e)取等号时, (P1.2)取得最优解, 问题(P1.2)等价于问题(P1.1)。显然(P1.2)是(P1.1)的下界, 从而(P1.1)可通过最大化(P1.2)求解。目标函数的分母对于  $\{v[n], a[n], \tau_n\}$  是联合凸的, 分子是非凸的。产生了新的非凸约束(13d)、(13e)。为了解决这些非凸约束约束, 我们采用连续凸近似技术得到了一种有效的局部解。

针对目标函数分子, 第  $j$  次迭代中在点  $q^{(j)}[n]$  处得到一阶泰勒近似的凸下界为 [20]

$$\begin{aligned} R_{lb}[n] & \geq a_j[n] (||q[n]||^2 - ||q^{(j)}[n]||^2) + b_j[n] (||q[n] - q_E||^2 - ||q^{(j)}[n] - q_E||^2) + c_j \\ & - \log_2 \left( \frac{\tilde{P}[n] \beta_0 + \tilde{P}_n[n] \beta_0}{\mu_n} + \delta^2 \right) \triangleq R_{lb}^{(j)}[n], n = 1, \dots, N. \end{aligned} \quad (14)$$

其中  $R_{lb}[n]$  表示目标函数分子, 表示第  $q^{(j)}[n]$  次迭代中无人机的任意可行坐标,  $a_j[n]$ 、 $b_j[n]$ 、 $c_j[n]$  为常数

$$\begin{aligned} a_j[n] & = - \frac{\tilde{P}[n] \beta_0}{\ln 2 \left( ||q^{(j)}[n]||^2 + \tilde{P}[n] \gamma_0 + H^2 \right) (||q^{(j)}[n]||^2 + H^2)} \\ b_j[n] & = - \frac{\tilde{P}_n[n] \beta_0}{\ln 2 \left( \sigma^2 (||q^{(j)}[n] - q_E||^2 + \tilde{P}_n[n] \beta_0) \right) (||q^{(j)}[n] - q_E||^2 + H^2)} \\ c_j[n] & = \log_2 \left( 1 + \frac{\tilde{P}[n] \gamma_0}{||q^{(j)}[n]||^2 + H^2} \right) + \log_2 \left( \frac{\tilde{P}_n[n] \beta_0}{||q^{(j)}[n] - q_E||^2 + H^2} + \delta^2 \right) \end{aligned}$$

同样地, 第  $j$  次迭代中在点  $q^{(j)}[n]$  处得到(13d)、(13e)的一阶泰勒近似凸下界为

$$\psi[n] \triangleq ||v[n]||^2 \geq ||v^{(j)}[n]||^2 + 2(v^{(j)}[n])^T (v[n] - v^{(j)}[n]) \triangleq \psi_{lb}^{(j)}[n], n = 1 \dots, N \quad (15)$$

$$\Phi[n] \triangleq ||q[n] - q_E||^2 + H^2 \geq ||q^{(j)}[n] - q_E||^2 + 2(q^{(j)}[n] - q_E)^T (q[n] - q^{(j)}[n]) + H^2 \triangleq \Phi_{lb}^{(j)}[n], n = 1, \dots, N \quad (16)$$

其中  $v^{(j)}[n]$  表示第  $j$  次迭代中无人机的任意可行速度。

因此, 对于任意可行点  $\{q^{(j)}[n], v^{(j)}[n]\}$ , 重新表述问题(P1.1):

(P1.3):

$$\begin{aligned} & \max_{\{q[n], v[n], a[n]\}} \frac{\sum_{n=1}^N B(R_{lb}^{(j)}[n])}{\sum_{n=1}^N \left( c_1 ||v[n]||^3 + \frac{c_2}{\tau_n} + \frac{c_2 ||a[n]||^2}{g^2 \tau_n} \right) + \frac{\Delta K}{\delta_t}} \end{aligned} \quad (17a)$$

$$s.t. \quad (8a), (8b), (10b) \sim (10d), (10f), (13c), (13f), (15), (16) \quad (17b)$$

显然问题(P1.3)的目标值是问题(P1.1)的下界。因此，问题(P1.1)可通过迭代优化问题(P1.3)解决。

## 2.2 轨迹固定的功率优化问题

假设无人机的轨迹 $q[n]$ 是常数，本小节用 $\tilde{q}[n]$ 表示，问题(P1)重新表述为

(P2.1):

$$\max_{\{P[n], P_n[n]\}} \sum_{n=1}^N B \left[ \left( \log_2 \left( 1 + \frac{P[n]g_{UB}[n]}{\delta^2} \right) + \log_2 (P_n[n]g_{UE}[n] + \delta^2) - \log_2 ((P[n] + P_n[n])g_{UE}[n] + \delta^2) \right) \right]^+ \quad (18a)$$

$$s.t. \quad (3a), (3b), (3c) \quad (18b)$$

其中

$$g_{UB}[n] = \frac{\beta_0}{||\tilde{q}[n]||^2 + H^2}, n = 0, \dots, N$$

$$g_{UE}[n] = \frac{\beta_0}{||\tilde{q}[n] - q_E||^2 + H^2}, n = 0, \dots, N$$

$(x)^+$ 可以在不失最优性的前提下去除。显然，功率优化问题的约束条件是凸的，但它的目标函数仍然是一个非凸问题。

针对目标函数，第 $j$ 次迭代中在点 $\{P^{(j)}[n], P_n^{(j)}[n]\}$ 处得到一阶泰勒近似的凸下界为：

$$\begin{aligned} \hat{R}_{lb}[n] &\geq \log_2 \left( 1 + \frac{P[n]g_{UB}[n]}{\delta^2} \right) + \log_2 (P_n[n]g_{UE}[n] + \delta^2) - \log_2 ((P^{(j)}[n] + P_n^{(j)}[n])g_{UE}[n] + \delta^2) \\ &- \frac{g_{UE}[n]((P[n] + P_n[n]) - (P^{(j)}[n] + P_n^{(j)}[n]))}{\ln 2((P^{(j)}[n] + P_n^{(j)}[n])g_{UE}[n] + \delta^2)} \triangleq \hat{R}_{lb}^{(j)}[n] \end{aligned} \quad (19)$$

其中 $\hat{R}_{lb}[n]$ 表示(P2.1)的目标函数， $\{P^{(j)}[n], P_n^{(j)}[n]\}$ 表示第 $j$ 次迭代中无人机的任意可行发射功率。

因此对于任意可行点 $\{P^{(j)}[n], P_n^{(j)}[n]\}$ ，问题(P2.1)重新表述为：

(P2.2):

$$\max_{\{P[n], P_n[n]\}} \sum_{n=1}^N B(\hat{R}_{lb}^{(j)}[n]) \quad (20a)$$

$$s.t. \quad (3a), (3b), (3c) \quad (20b)$$

显然，问题(P2.2)的目标值是问题(P2.1)的下界，问题(P2.1)可以通过迭代优化问题(P2.2)解决。

## 2.3 交替优化算法

对于问题(P1)，我们通过交替优化(P1.3)和(P2.2)来求解。具体算法如下

---

### 算法 1：安全能效最大化交替优化算法

---

1. 初始化：寻找一个初始可行解 $\{P^{(0)}[n], P_n^{(0)}[n], q^{(0)}[n], v^{(0)}[n], a^{(0)}[n]\}$ ，令  
 $EE_{sec}^{(0)} = f_{(P1)}^{(0)}(\{P^{(0)}[n], P_n^{(0)}[n], q^{(0)}[n], v^{(0)}[n], a^{(0)}[n]\})$ ,  $j = 0$
  2. WHILE  $|EE_{sec}^{(j)} - EE_{sec}^{(j-1)}|/EE_{sec}^{(j)} \geq \epsilon$
  3. 更新： $j = j + 1$
  4. 给定可行点 $\{P^{(j-1)}[n], P_n^{(j-1)}[n]\}$ ，求解问题(P1.3)，最优解表示为  
 $\{q_*^{(j)}[n], v_*^{(j)}[n], a_*^{(j)}[n]\}$
  5. 更新： $q^{(j)}[n] = q_*^{(j)}[n], v^{(j)}[n] = v_*^{(j)}[n], a^{(j)}[n] = a_*^{(j)}[n]$
  6. 给定 $\{q^{(j)}[n], v^{(j)}[n], a^{(j)}[n]\}$ ，求解问题(P2.2)，最优解表示为 $\{P_*^{(j)}[n], P_n^{(j)}[n]\}$
  7. 更新： $P^{(j)}[n] = P_*^{(j)}[n], P_n^{(j)}[n] = P_n^{(j)}[n]$
  8. 令 $EE_{sec}^{(j)} = f_{(P1)}^{(j)}(\{P^{(j)}[n], P_n^{(j)}[n], q^{(j)}[n], v^{(j)}[n], a^{(j)}[n]\})$
  9. end WHILE
- 

其中： $EE_{sec}^{(j)}$  表示第 $j$ 次迭代后的安全能效， $\epsilon$  表示收敛精度。第 $j$ 次迭代得出的解记为 $\{P^{(j)}[n], P_n^{(j)}[n], q^{(j)}[n], v^{(j)}[n], a^{(j)}[n]\}$ 。

## 4 实验设置与结果分析

### 4.1 实验设置

本节将通过仿真来验证本文提出设计方案的有效性。如无特别声明，仿真参数设置如下：无人机的飞行高度设为 $H = 100m$ ，起始和终止的水平坐标分别为 $q_0 = (-1000, 400)$ 和 $q_F = (1000, 400)$ ，离散时隙 $\delta_t = 0.2s$ ，起始飞行速度和终止飞行速度 $v_0 = v_F = 30(q_F - q_0)/||q_F - q_0||$ ，最大飞行速度和最小飞行速度分别为 $v_{\max} = 50m/s$ 和 $v_{\min} = 3m/s$ ，最大加速度 $a_{\max} = 5m/s^2$ 。 $c_1 = 9.26 \times 10^{-4}$ ， $c_2 = 2250$ 。无人机的最大平均噪声功率谱密度 $N_0 = 170dBm/Hz$ ，参考信道功率 $\beta_0 = -60dB$ ，地面终端的水平坐标 $q_G = (0, 0)$ ，地面窃听端的水平坐标 $q_E = (0, 800)$ 。算法1的收敛精度 $\epsilon = 10^{-3}$ 。

### 4.2 结果分析

图2描绘了无人机在不同服务时长（ $T = 100s$ 和 $T = 200s$ ）和不同设计方案（直线飞行、安全容量最大化、安全能耗最小化和安全能耗最大化）下的水平飞行轨迹。（c）对应为安全容量最大化设计，可以看出不同服务时长的轨迹非常相似，无人机在地面终端周围盘旋尽可能长的时间，以保持最佳的通信信道。相比之下，（d）对应的安全能耗最小化设计的轨迹在服务时长不同时变化很大。产生的轨迹主要是直线或转弯半径相对较大的轨迹，因为这通常耗能较少。具体地说，在接近地面终端时，在服务时长 $T = 100s$ 时无人机沿着近似“波浪”形状的轨迹飞行，而在 $T = 200s$ 时则沿着“8”字形的轨迹盘旋。然而，由于大部分时间与地面终端的距离较大，预计这种轨迹产生的信道容量相对较小。对于提出的安全能效最大化设计，无人机在地面终端周围沿近似“花瓣”的形状的轨迹盘旋。与安全能耗最小化设计相比，轨迹的转弯半径更小，而且大部分时间都集中在地面终端附近，这样既能保持足够良好的通信信道，又不会过度耗能。正如预期的那样，平衡了系统的安全容量和能量消耗。

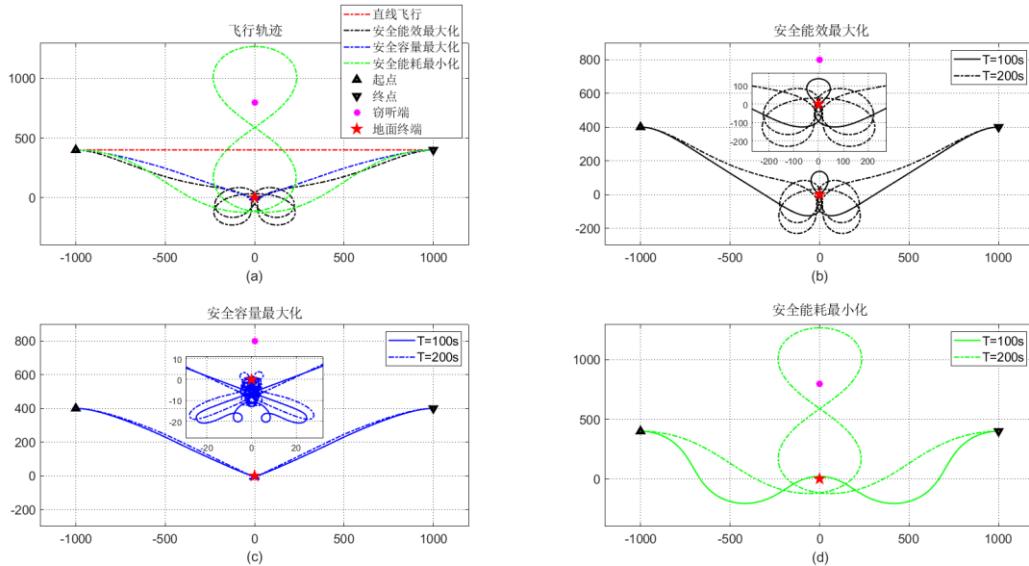


图2 无人机水平飞行轨迹

表1提供了上述四种设计方案分别在 $T = 100s$ 和 $T = 200s$ 时的性能比较。可以看出，相同服务时长下安全容量最大化方案的平均安全容量最高，安全能耗最小化方案的能耗最低，但它的安全能效性能最差。相比之下，本文提出的安全能耗最大化方案在上述两个方案之间实现了良好的平衡，因此其安全能效明显高于单纯的容量最大化和能量最小化设计。另外，在不同的服务时长下，各种设计的安全能效也各不相同。在实际应用中，我们可以根据平均安全容量和能量消耗要求来设置服务时长，以最大限度地提高系统的能量利用率。

表 1 不同方案设计的性能比较

	服务时长	$\bar{v} (m/s)$	$\bar{a} (m/s^2)$	$\bar{R}_{sec} (Mbps)$	$\bar{E} (W)$	$EE (kbits/J)$	$\bar{P} (mW)$	$\bar{P}_n (mW)$
直线 飞行	T=100s	20.00	0.00	1.69	119.91	14.06	90.00	10.00
	T=200s	10.00	0.00	1.69	225.93	7.46	90.00	10.00
安全容量 最大化	T=100s	24.12	4.93	4.64	500.92	9.23	97.46	2.50
	T=200s	13.85	4.88	5.50	668.73	8.23	97.50	2.48
安全能耗 最小化	T=100s	27.76	2.18	2.34	106.41	22.04	97.49	2.47
	T=200s	29.41	1.81	1.22	103.61	11.79	97.73	2.26
安全能效 最大化	T=100s	28.69	2.63	3.43	126.36	27.12	97.49	2347
	T=200s	25.76	2.95	3.92	119.28	32.86	97.73	2.26

## 5 总结

本文通过无人机的轨迹设计和功率优化来解决无人机通信系统的安全性和能效问题。具体来说，我们提出了一种无人机轨迹和功率的联合优化方法，以实现系统安全能效的最大化。由于目标函数非凸，首先将其分解为固定功率下的轨迹设计问题和固定轨迹下的功率分配问题两个子问题，然后使用 CCCP 将子问题近似为凸优化问题，提出了一种基于 SCP 的迭代算法。最后，通过交替优化子问题来得到原问题的解。仿真结果表明，所提出的设计方案能在平均安全容量和能量消耗之间取得良好的平衡，有效提高了系统的安全能效，实现无人机与地面终端的安全节能通信。

## 参考文献：

- [1] Zhan P, Yu K, Swindlehurst A L (2011). Wireless Relay Communications with Unmanned Aerial Vehicles: Performance and Optimization. *Aerospace & Electronic Systems IEEE Transactions on*, 47(3):2068-2085.
- [2] Diffie W, Hellman M (1976). New directions in cryptography. *IEEE Transactions on Information Theory*, 22(6): 644-654.
- [3] HU Xiao-yan, JIN Liang, HUANG Kai-zhi, ZHONG Zhou, ZHANG Sheng-jun (2019). Physical Layer Secret Key Generation Scheme Based on Signal Propagation Characteristics. *Acta Electronica Sinica*, 47(2): 483-488.
- [4] Shannon C E (1949). Communication Theory of Secrecy Systems. *Bell System Technical Journal*, 28(4):656–715.
- [5] Wyner A D (1975). The Wire-Tap Channel. *Bell Labs Technical Journal*, 54(8).
- [6] Csiszar I, Korner J (1978). Broadcast channels with confidential messages. *IEEE Press*.
- [7] Guangchi Zhang, Qingqing Wu, et al. (2019). Securing UAV Communications via Joint Trajectory and Power Control. *IEEE Transactions on Wireless Communications*.
- [8] Li A, Wu Q, Zhang R (2019). UAV-Enabled Cooperative Jamming for Improving Secrecy of Ground Wiretap Channel. *IEEE Wireless Communications Letters*.
- [9] Yan C, Zhang S, Xu S, et al. (2011). Fundamental trade-offs on green wireless networks. *2011*, 49(6):30-37.
- [10] Hasan Z, Boostanimehr H, Bhargava V K. Green Cellular Networks: A Survey, Some Research Issues and Challenges. *Communications Surveys & Tutorials IEEE*.
- [11] Dessel C, Debaillie B, Giannini V, et al. (2012). Flexible power modeling of LTE base stations, 2012 *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. *IEEE*.
- [12] Franco C D, Buttazzo G C (2015). Energy-aware Coverage Path Planning of UAVs Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC), 2015 *IEEE International Conference on*. *IEEE*.

- [13] Zeng Y, Zhang R (2017). Energy-Efficient UAV Communication with Trajectory Optimization. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 3747-3760.
- [14] Zeng Y, Xu J, Zhang R (2019). Energy Minimization for Wireless Communication with Rotary-Wing UAV. (4).
- [15] Goel S, Negi R (2008). Guaranteeing Secrecy using Artificial Noise. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 7(6):2180-2189.
- [16] SHEN Li-hua, LIN Sheng-bin, HUANG Kai-zhi (2017). Analysis of the Artificial Noise Based System Security Performance Under Malicious Pilot Contamination. *Acta Electronica Sinica*, 45(3): 650-655.
- [17] Erdelj M, Natalizio E, Chowdhury K R, et al. (2017). Help from the Sky: Leveraging UAVs for Disaster Management. *IEEE Pervasive Computing*, 16(1):24-32.
- [18] Jiang Y, Zou Y, Ouyang J, et al. (2018). Secrecy Energy Efficiency Optimization for Artificial Noise Aided Physical-Layer Security in OFDM-Based Cognitive Radio Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*.
- [19] Boyd S, Vandenberghe L (2004). Convex Optimization. Cambridge University Press.
- [20] Alejandro Garces (2022). Convex optimization. *IEEE Mathematical Programming for Power Systems Operation*.