

引用格式:章礼玮,李国鑫,陈瑾,等. 主动干扰辅助下的无人机隐蔽通信功率与位置联合优化[J]. 信息对抗技术, 2023, 2(2):28-38.
[ZHANG Liwei, LI Guoxin, CHEN Jin, et al. Joint optimization of power and position of UAV covert communication assisted by active jamming[J]. Information Countermeasure Technology, 2023, 2(2):28-38. (in Chinese)]

主动干扰辅助下的无人机隐蔽通信功率与位置联合优化

章礼玮¹, 李国鑫^{1*}, 陈瑾¹, 王海超¹, 贺文辉¹, 黄育侦²

(1. 陆军工程大学通信工程学院, 江苏南京 210007; 2. 军事科学院国防科技创新研究院, 北京 100091)

摘要 利用友好干扰节点发送人工噪声是无线隐蔽通信中一种常见实现方法, 可以增加监听者做出判断的不确定性, 从而实现隐蔽传输。为此, 考虑在无人机隐蔽通信网络中, 部署一个空中的友好干扰节点, 发射人工噪声干扰地面监听者的检测。对无人机与地面用户之间实现无线隐蔽传输进行了研究, 分析了其有效隐蔽性能, 联合优化了2架无人机的发送功率和位置部署以最大化隐蔽传输速率, 使用粒子群优化算法与功率-位置交替迭代算法2种优化方法得到最优的无人机部署位置及功率分配方案。仿真结果表明, 联合优化方案相比于固定位置只优化功率的基准方案可以显著地提高系统隐蔽传输性能, 且交替迭代算法所得结果要优于粒子群优化算法。

关键词 无人机通信; 隐蔽通信; 隐蔽传输速率; 粒子群优化算法

中图分类号 TP 925

文章编号 2097-163X(2023)02-0028-11

文献标志码 A

DOI 10.12399/j.issn.2097-163x.2023.02.003

Joint optimization of power and position of UAV covert communication assisted by active jamming

ZHANG Liwei¹, LI Guoxin^{1*}, CHEN Jin¹, WANG Haichao¹,
HE Wenhui¹, HUANG Yuzhen²

(1. College of Communications Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China;

2. National Innovation Institute of Defense Technology, Academy of Military Sciences, Beijing 100091, China)

Abstract Using friendly jamming nodes and transmitting artificial noise has been a common method in covert communication, which can increase the uncertainty of the warden's judgment. This paper considered adding a friendly jamming node in the unmanned aerial vehicle (UAV) communication network and transmit artificial noise to interfere with the detection of ground monitors. The realization of wireless covert transmission between UAVs and ground users was studied, and its effective covert performance was analyzed. The transmission power and location deployment of two UAV were jointly optimized to maximize the covert transmission rate. Two optimization methods, particle swarm optimization (PSO) algorithm and power position alternate iteration algorithm, were used to obtain the optimal deployment location and power allocation scheme for UAV. Simulation results have shown that the joint optimization scheme could significantly improve the covert transmission performance of the

system compared to the fixed position power with only optimization benchmark scheme, and the results obtained by the alternating iteration algorithm are superior to those by the particle swarm optimization algorithm.

Keywords UAV communication; covert communication; covert transmission rate; PSO algorithm

0 引言

无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)作为一种机动性强、可按需部署、成本低的无人系统,无论是在军用还是民用领域都有着广泛的应用。在通信领域,UAV同样有着很多不可替代的作用,例如:作为空中基站为一定覆盖区域内的用户提供通信服务;作为辅助中继提供更远程的可靠通信^[1]。但 UAV 与地面之间高概率的视距(line of sight, LoS)信道在带来可靠通信质量的同时,也给予通信安全(相较于传统的地面衰落信道)带来了更多的隐患,尤其是在军事通信中,UAV 与地面用户的通信行为一旦被非法监听者探测到,就会引起敌方的跟踪追查而暴露其位置信息,从而遭到敌方的打击或恶意干扰^[2]。因此如何保证 UAV 空地通信过程中的安全传输显得至关重要,近几年快速发展的低检测概率(low probability of detection, LPD)传输技术可以很好地解决这一问题^[3]。

2013年,BASH等^[4]提出了在加性高斯白噪声信道下以低检测概率可靠传输信息量的平方根法则:即在 n 个信道上,通信方最多能可靠地传输 $o(\sqrt{n})$ 个比特信息,并同时确保被监听者非法检测的概率为任意小。LPD通信又被称为隐蔽通信,通常是在非法监听者处引入一些不确定参数,使其无法正确判断合法接收机之间的通信是否正在发生,从而降低其检测成功的概率,实现一定正速率的隐蔽传输。例如:文献^[5]通过友好干扰节点发送人工噪声,增加监听者的检测错误概率;文献^[6]考虑用户对信道状态信息的不确定性,研究了信道不确定性对隐蔽性能的影响;文献^[7]考虑到噪声不确定性的有界和无界模型,对于每一个模型分别推导了满足隐蔽性约束的通信速率;文献^[8]分析了信道不确定性和噪声不确定性对监听者的平均检测错误概率和隐蔽吞吐量的联合影响;文献^[9]则使用全双工接收机提高隐蔽性,接收机在接收信号的同时产

生人工噪声干扰监听者的检测。

UAV在隐蔽通信网络中可以作为发射机、接收机、空中干扰机、空中中继,通过合理设计其发射功率、飞行轨迹或者悬停位置可以有效提高通信网络的隐蔽性能。文献^[10]研究了 UAV 通信网络中的隐蔽通信,考虑在背景噪声不确定下的 UAV 空地视距通信,通过联合设计 UAV 的轨迹和功率,最大化平均隐蔽传输速率。文献^[11]研究了 UAV 与地面多个用户之间的隐蔽通信,并在隐蔽性约束下联合优化用户时隙分配、发射功率和 UAV 的二维轨迹。文献^[12]通过对 UAV 三维位置和发射功率进行联合优化,在通信质量受到限制的情况下最大化通信隐蔽性,并证明了对于给定的通信质量要求,通信隐蔽性并不总是随着信道使用次数的增加而提高。文献^[13]将 UAV 作为接收机,提出一种由多天线干扰器辅助的 UAV 隐蔽通信方案,对抗区域内几个随机分布的监听者,以最大化地面发射机和 UAV 接收机之间的传输速率。文献^[14]使用空中 UAV 作为干扰机,以辅助地面收发节点之间的隐蔽传输,并对系统隐蔽性能进行了分析。文献^[15]研究了在长距离通信时,基于 UAV 中继有限码长的隐蔽传输方案,降低了机密信息传输行为被监听者检测到的概率。

上述研究中,为实现 UAV 隐蔽通信,大多利用固定干扰节点的辅助,或者使用全双工接收机产生干扰,固定的地面干扰节点无法根据需求实时调整自己的位置,而全双工接收机产生的辅助干扰会对接收机的接收造成很大的影响。空中的干扰机可通过灵活的位置部署,达到更好的辅助干扰效果,同时可与发射机进行联合的功率与位置优化,以提升系统隐蔽性能。因此本文针对双 UAV 的隐蔽通信系统展开研究,其中 1 架 UAV 作为发射机向地面用户秘密传输信息,为避免被地面的非法监听者检测到,另外 1 架 UAV 作为干扰机干扰地面监听者的检测,以辅助 UAV 发射机与地面用户之间实现一定速率的隐

隐蔽通信。本文首先推导了地面监听者的最优检测门限与最小检测错误概率,在此基础上,以最大化 UAV 发射机到地面用户的有效隐蔽速率为目标,在满足隐蔽性约束和其他约束的条件下,提出了 2 种联合功率与位置优化算法,得到最优的功率设计与位置部署方案。

1 系统模型

1.1 考虑的场景和假设

考虑一个双 UAV 的隐蔽无线通信场景,如图 1 所示,1 架 UAV 发射机(UAV-Alice)与地面用户(Bob)进行通信,同时地面存在非法监听者(Willie)检测 UAV-Alice 是否在向 Bob 发送信息,假设 UAV 发射机和用户都只配备了单天线,无法通过冗余天线自身产生人工噪声,此时可以通过另外部署 1 架 UAV 干扰机(UAV-Jammer)作为友好干扰节点,以干扰 Willie 的检测,辅助 UAV-Alice 实现与地面用户之间的隐蔽通信,同时 UAV 在实施通信之前可通过机上配备的摄像头或其他侦察设备获取地面监听者 Willie 的位置。该场景主要应用在军事通信领域,1 架 UAV 为另外 1 架 UAV 与地面空地通信过程中提供干扰信号掩护,干扰地面检测者的监听,从而实现一定隐蔽约束下的有效信息传输。

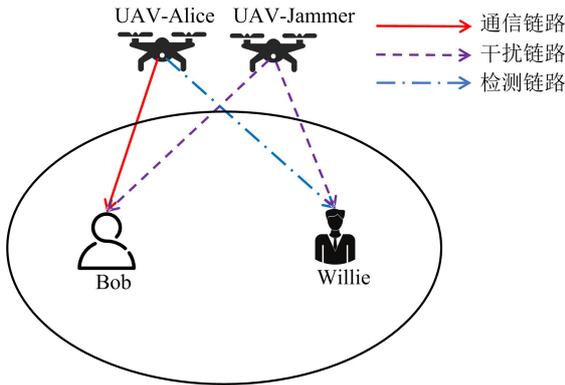


图 1 系统模型

Fig. 1 System model

使用三维笛卡尔坐标系来表示各节点的位置,UAV-Alice、Bob、Willie 和 UAV-Jammer 的水平位置分别表示为: $q_A = [x_A, y_A]$, $q_B = [x_B, y_B]$, $q_W = [x_W, y_W]$, $q_J = [x_J, y_J]$ 。UAV-Alice 和 UAV-Jammer 的高度分别表示为 H_A 和 H_J 。考虑 UAV 到地面的传输信道为 LoS 视距信道^[2],UAV-Alice 到 Bob 和 Willie 的信道功率增

益分别用 h_{AB} 、 h_{AW} 表示:

$$\begin{cases} h_{AB} = \sqrt{\beta_0 / Q_{AB, H_A}} \\ h_{AW} = \sqrt{\beta_0 / Q_{AW, H_A}} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $Q_{AB, H_A} = \|q_A - q_B\|^2 + H_A^2$, $Q_{AW, H_A} = \|q_A - q_W\|^2 + H_A^2$, β_0 表示参考距离为 1 m 时的信道功率增益。

UAV-Jammer 到 Bob 和 Willie 的信道功率增益分别用 h_{JB} 、 h_{JW} 表示:

$$\begin{cases} h_{JB} = \sqrt{\beta_0 / Q_{JB, H_J}} \\ h_{JW} = \sqrt{\beta_0 / Q_{JW, H_J}} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $Q_{JB, H_J} = \|q_J - q_B\|^2 + H_J^2$, $Q_{JW, H_J} = \|q_J - q_W\|^2 + H_J^2$ 。

为提高系统的隐蔽速率,考虑 UAV-Jammer 的干扰功率 P_J 是随机变化的,且服从均匀分布,其概率密度函数为:

$$f_{P_J}(x) = \begin{cases} \frac{1}{P_J^{\max}}, & 0 \leq x \leq P_J^{\max} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中, P_J^{\max} 为干扰节点最大干扰功率,引入随机功率的原因是使得 Willie 在检测时难以判断接收信号功率的变化是来自人工噪声的变化还是隐蔽信号的传输,额外引入的人工噪声有效降低了 Willie 的检测成功概率。

1.2 非法监听者的检测性能分析

在本文的隐蔽通信场景中,Willie 采用能量检测的方法,通过接收信号与预设门限的比较来判断 UAV-Alice 是否发送通信信号。Willie 接收到的信号可表示为:

$$I_W(i) = \begin{cases} h_{JW}s_J(i) + n_W(i), & H_0 \\ \sqrt{P_A}h_{AW}s_A(i) + \sqrt{P_J}h_{JW}s_J(i) + n_W(i), & H_1 \end{cases} \quad (4)$$

式中, $i = 1, \dots, n$ 表示信号中的第 i 个符号; s_A 、 s_J 分别表示 UAV-Alice 和 UAV-Jammer 的发送信号,且满足 $E[s_A(i)s_A^*(i)] = E[s_J(i)s_J^*(i)] = 1$; $n_W(i)$ 表示 Willie 处的背景噪声,且有 $n_W(i) \sim CN(0, \sigma_w^2)$; P_A 表示 UAV-Alice 发射功率; H_1 、 H_0 分别表示 UAV-Alice 有无发送通信信号。

考虑码字长度 $n \rightarrow \infty$ 时,根据强大数定理,Willie 处的平均接收信号功率可以表示为:

$$P_W = \begin{cases} P_J |h_{JW}|^2 + \sigma_w^2, & H_0 \\ P_A |h_{AW}|^2 + P_J |h_{JW}|^2 + \sigma_w^2, & H_1 \end{cases} \quad (5)$$

Willie 通过比较平均功率与预设阈值的大小来判断 UAV-Alice 是否发送通信信号,即:

$$P_W \underset{D_0}{\overset{D_1}{\geq}} \tau \quad (6)$$

式中, τ 为预设的能量检测阈值, D_0 和 D_1 分别表示 Willie 判断结果为 H_0 和 H_1 。

则 Willie 的虚警概率 F 和漏检概率 M 分别为:

$$\begin{aligned} F &= P_r(D_1 | H_0) = P_r(P_W \geq \tau | H_0) \\ &= P_r(P_J | h_{JW} |^2 + \sigma_W^2 \geq \tau) \\ &= P_r\left(P_J \geq \frac{\tau - \sigma_W^2}{|h_{JW}|^2}\right) \\ &= \begin{cases} 1, & \tau < \rho_1 \\ \frac{P_J^{\max} |h_{JW}|^2 + \sigma_W^2 - \tau}{P_J^{\max} |h_{JW}|^2}, & \rho_1 \leq \tau \leq \rho_2 \\ 0, & \tau > \rho_2 \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} M &= P_r(D_0 | H_1) = P_r(P_W \leq \tau | H_1) \\ &= P_r(P_A | h_{AW} |^2 + P_J | h_{JW} |^2 + \sigma_W^2 \leq \tau) \\ &= P_r\left(P_J \leq \frac{\tau - \sigma_W^2 - P_A |h_{AW}|^2}{|h_{JW}|^2}\right) \\ &= \begin{cases} 0, & \tau < \rho_3 \\ \frac{\tau - \sigma_W^2 - P_A |h_{AW}|^2}{|h_{JW}|^2 P_J^{\max}}, & \rho_3 \leq \tau \leq \rho_4 \\ 1, & \tau > \rho_4 \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

式中, $\rho_1 = \sigma_W^2$, $\rho_2 = P_J^{\max} |h_{JW}|^2 + \sigma_W^2$, $\rho_3 = P_A |h_{AW}|^2 + \sigma_W^2$, $\rho_4 = P_A |h_{AW}|^2 + P_J^{\max} |h_{JW}|^2 + \sigma_W^2$ 。

则监听者总的检测错误概率可表示为:

$$\xi = F + M \quad (9)$$

通信隐蔽性要求对于任意小的 ϵ ($\epsilon \geq 0$), 有 $F + M \geq 1 - \epsilon$, 则系统满足隐蔽性。

下面推导最优检测门限 τ^* 以最小化 Willie 的总检测错误概率 ξ 。但是由于 ρ_2 和 ρ_3 的大小未知, 因此分 2 种情况讨论:

1) 当 $\rho_2 < \rho_3$ 时。

根据式(7)~(9), 可以得到总检测错误概率 ξ 为:

$$\xi(\tau) = \begin{cases} 1, & \tau < \rho_1 \\ \frac{P_J^{\max} |h_{JW}|^2 + \sigma_W^2 - \tau}{P_J^{\max} |h_{JW}|^2}, & \rho_1 \leq \tau < \rho_2 \\ 0, & \rho_2 \leq \tau < \rho_3 \\ \frac{\tau - \sigma_W^2 - P_A |h_{AW}|^2}{|h_{JW}|^2 P_J^{\max}}, & \rho_3 \leq \tau < \rho_4 \\ 1, & \tau \geq \rho_4 \end{cases} \quad (10)$$

根据函数单调性可以得到最优门限为 $\tau^* \in [\rho_2, \rho_3]$, 此时 Willie 的最小总检测错误概率为 0, 意味着 Willie 能够准确无误地检测到 UAV-Alice 的传输行为。

2) 当 $\rho_2 \geq \rho_3$ 时。

此时可得到 Willie 的总检测错误概率为:

$$\xi(\tau) = \begin{cases} 1, & \tau < \rho_1 \\ \frac{P_J^{\max} |h_{JW}|^2 + \sigma_W^2 - \tau}{P_J^{\max} |h_{JW}|^2}, & \rho_1 \leq \tau < \rho_3 \\ 1 - \frac{P_A |h_{AW}|^2}{P_J^{\max} |h_{JW}|^2}, & \rho_3 \leq \tau < \rho_2 \\ \frac{\tau - \sigma_W^2 - P_A |h_{AW}|^2}{|h_{JW}|^2 P_J^{\max}}, & \rho_2 \leq \tau < \rho_4 \\ 1, & \tau \geq \rho_4 \end{cases} \quad (11)$$

同样根据函数单调性可得到最优门限为 $\tau^* \in [\rho_3, \rho_2]$, Willie 的最小总检测错误概率为:

$$\xi^{\min} = 1 - \frac{P_A |h_{AW}|^2}{P_J^{\max} |h_{JW}|^2} \quad (12)$$

综合上述 2 种情况得到 Willie 处的最优检测门限为:

$$\tau^* = \begin{cases} [\rho_2, \rho_3], & \rho_2 < \rho_3 \\ [\rho_3, \rho_2], & \rho_2 \geq \rho_3 \end{cases} \quad (13)$$

对应的最小总检测错误概率为:

$$\xi^{\min} = \begin{cases} 0, & \rho_2 < \rho_3 \\ 1 - \frac{P_A |h_{AW}|^2}{P_J^{\max} |h_{JW}|^2}, & \rho_2 \geq \rho_3 \end{cases} \quad (14)$$

从式(14)可以看出, Willie 处的检测性能与 UAV-Alice 和 UAV-Jammer 的发射功率都相关, 当 $P_A \rightarrow \infty$ 时, $\rho_3 \gg \rho_2$, 通过选择最优门限, Willie 能够准确无误地检测到 Alice 的传输, 而当 $P_J^{\max} \rightarrow \infty$ 时, $\rho_2 \gg \rho_3$, 即使 Willie 选择最优门限, 依然有 $\xi^{\min} \rightarrow 1$, 此时 Willie 的检测只能靠猜测判断, 检测结果完全没有说服力。

当 Willie 的检测错误概率为 0 时, 对 UAV-Alice 而言无论采取什么样的策略, 均无法实现隐蔽通信, 因此本文只考虑 $\rho_2 \geq \rho_3$ 的情况, 即 2 架 UAV 需要通过功率和位置的调整, 始终保证 $\rho_2 \geq \rho_3$ 。因此隐蔽性约束可表示为:

$$1 - \frac{P_A |h_{AW}|^2}{P_J^{\max} |h_{JW}|^2} \geq 1 - \epsilon \quad (15)$$

2 隐蔽性能分析与优化

2.1 有效隐蔽传输速率分析

由于 Bob 处同样受到噪声不确定性的影响,通信速率会发生波动性变化,可能会导致通信速率没有达到目标速率 R 从而发生中断,其传输中断概率 U 可表示为:

$$\begin{aligned} U &= P_r \left(\log_2 \left(1 + \frac{P_A |h_{AB}|^2}{P_J |h_{JB}|^2 + \sigma_B^2} \right) < R \right) \\ &= P_r (P_J > \alpha) \\ &= \int_{\alpha}^{\infty} f_{P_J}(x) dx \end{aligned} \quad (16)$$

式中, $\alpha = \frac{P_A |h_{AB}|^2 - (2^R - 1)\sigma_B^2}{|h_{JB}|^2 (2^R - 1)}$ 。

由于 P_J 服从均匀分布,可得到中断概率 U 的闭式表达式为:

$$U = \begin{cases} 0, & R \leq \psi \\ 1 - \frac{\alpha}{P_J^{\max}}, & \psi < R < \varphi \\ 1, & R \geq \varphi \end{cases} \quad (17)$$

式中, $\psi = \log_2 \left(1 + \frac{P_A |h_{AB}|^2}{P_J^{\max} |h_{JB}|^2 + \sigma_B^2} \right)$, $\varphi = \log_2 \left(1 + \frac{P_A |h_{AB}|^2}{\sigma_B^2} \right)$ 。

综合考虑系统的隐蔽性和可靠性,本文采用有效隐蔽传输速率 C 来描述系统整体性能,其定义为:

$$C = \begin{cases} (1-U)R, & \xi^{\min} \geq 1 - \epsilon \\ 0, & \xi^{\min} < 1 - \epsilon \end{cases} \quad (18)$$

有效隐蔽传输速率是在满足隐蔽性约束的条件下的通信速率,当隐蔽性约束未被满足时其值为 0。

2.2 最大有效隐蔽传输速率分析

根据式(17)~(18),可得当满足隐蔽性约束时,有效隐蔽传输速率为:

$$C = (1-U)R = \begin{cases} R, & R \leq \psi \\ \frac{R\alpha}{P_J^{\max}}, & \psi < R < \varphi \\ 0, & R \geq \varphi \end{cases} \quad (19)$$

通过分析上述关于 R 的函数单调性可得,当目标隐蔽速率 R 取 ψ 时,有效隐蔽速率 C 取得最大,表示为:

$$C^{\max} = ((1-U)R)^{\max}$$

$$= \log_2 \left(1 + \frac{P_A \beta_0 Q_{JB,H}}{(P_J^{\max} \beta_0 + \sigma_B^2 Q_{JB,H} Q_{AB,H})} \right) \quad (20)$$

式中, $Q_{JB,H} = \|q_J - q_B\|^2 + H^2$, $Q_{AB,H} = \|q_A - q_B\|^2 + H^2$ 。

通过式(20)可以看出,最大有效隐蔽传输速率受 UAV-Alice 的发射功率、水平位置与高度以及 UAV-Jammer 的最大干扰功率、水平位置与高度的共同影响。通过优化这 6 个变量,可使有效隐蔽传输速率达到最大,因此可构建优化问题如下:

$$\begin{aligned} \max_{P_A, P_J^{\max}, q_A, q_J, H_A, H_J} & \log_2 \left(1 + \frac{P_A \beta_0 Q_{JB,H_J}}{P_J^{\max} \beta_0 + \sigma_B^2 Q_{JB,H_J} Q_{AB,H_A}} \right) \\ \text{s. t.} & C_1: 1 - \frac{P_A Q_{JW,H_J}}{P_J^{\max} Q_{AW,H_A}} \geq 1 - \epsilon \\ & C_2: 0 \leq P_A \leq P_A^{\max} \\ & C_3: 0 \leq P_J^{\max} \leq \bar{P}_J^{\max} \\ & C_4: X_A^{\min} \leq x_A \leq X_A^{\max} \\ & \quad Y_A^{\min} \leq y_A \leq Y_A^{\max} \\ & \quad X_J^{\min} \leq x_J \leq X_J^{\max} \\ & \quad Y_J^{\min} \leq y_J \leq Y_J^{\max} \\ & C_5: H_A^{\min} \leq H_A \leq H_A^{\max} \\ & \quad H_J^{\min} \leq H_J \leq H_J^{\max} \\ & C_6: P_J^{\max} / Q_{JW,H_J} \geq P_A / Q_{AW,H_A} \end{aligned} \quad (21)$$

式中, $Q_{AB,H_A} = \|q_A - q_B\|^2 + H_A^2$, $Q_{AW,H_A} = \|q_A - q_W\|^2 + H_A^2$ 。

在该优化问题中,目标函数为最大有效隐蔽传输速率,决策变量为 UAV-Alice 的发射功率 P_A 和水平位置 q_A 、高度 H_A , UAV-Jammer 的最大干扰功率 P_J^{\max} 和水平位置 q_J 、高度 H_J 。 C_1 和 C_6 分别表示 Willie 检测的隐蔽性约束和功率门限约束, C_2 和 C_3 表示 2 架 UAV 的功率约束,其中 P_J^{\max} 表示最大干扰功率的上限, C_4 和 C_5 表示 2 架 UAV 水平位置部署的范围和高度部署的范围。与现有优化方案相比,本文所构建的优化问题中决策变量与约束条件更多,因为引入了可部署的辅助干扰节点,可实现的有效隐蔽传输速率更大。接下来对该问题进行求解,以验证所提方案的有效性与优越性。

3 优化问题的求解

可以看出上述优化问题属于有约束非线性

优化问题,针对此问题本文提出了 2 种算法:一种是直接使用粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法求解,因为该算法是解决大多数非线性不等式约束的非线性优化问题的一种有效且通用的解决方法^[16];另外一种是针对 UAV 位置与功率之间的耦合关系,设计一种联合功率与位置的交替迭代优化算法。

3.1 基于 PSO 算法的联合功率位置优化

PSO 算法的思想来源于对鸟群捕食行为的研究,其基本思想是通过群体中个体之间相互协作和信息共享与交互来寻找最优解,其优势在于简单、容易实现并且没有太多参数的调节。

3.1.1 约束项的处理

PSO 算法主要解决的是无约束优化或线性约束优化问题,在本文的问题中,约束条件有检测门限约束和隐蔽性约束,从式(15)可看出,当隐蔽性约束满足时一定满足检测门限约束,因此首先要对隐蔽性约束进行处理。常见约束处理的方法有:直接法、拉格朗日乘数法、惩罚函数法。惩罚函数法的应用更为广泛,其基本思想是定义一个惩罚函数,构造出一个新的增广目标函数,使有非线性约束问题转化为线性约束优化问题。对问题(21)中的约束 C_1 改写为以下形式:

$$P_A(Q_{JW,H_J}) - \epsilon P_J^{\max}(Q_{AW,H_A}) \leq 0 \quad (22)$$

定义一个惩罚函数项:

$$f = \max\{0, P_A(Q_{JW,H_J}) - \epsilon P_J^{\max}(Q_{AW,H_A})\} \quad (23)$$

如果隐蔽性约束满足,则 $f=0$,此时没有惩罚;如果隐蔽性约束不满足,则 $f>0$,此时执行惩罚。

定义一个惩罚因子 λ ,则可将式(21)改写为:

$$\begin{aligned} \min_{P_A, P_J^{\max}, q_A, q_J, H_A, H_J} & -\log_2 \left(1 + \frac{P_A \beta_0 Q_{JB,H}}{(P_J^{\max} \beta_0 + \sigma_B^2 Q_{JB,H} Q_{AB,H})} \right) \\ & + \lambda \max\{0, P_A Q_{JW,H} - \epsilon P_J^{\max} Q_{AW,H}\} \\ \text{s. t.} & 0 \leq P_A \leq P_A^{\max} \\ & 0 \leq P_J^{\max} \leq \bar{P}_J^{\max} \\ & q_A^{\min} \leq q_A \leq q_A^{\max} \\ & q_J^{\min} \leq q_J \leq q_J^{\max} \\ & H_A^{\min} \leq H_A \leq H_A^{\max} \\ & H_J^{\min} \leq H_J \leq H_J^{\max} \end{aligned} \quad (24)$$

式中, $Q_{JW,H} = \|q_J - q_W\|^2 + H^2$, $Q_{AW,H} = \|q_A - q_W\|^2 + H^2$ 。

其中, λ 的值越大,惩罚作用越大,本文将其设置为 $10^4 T$, T 为迭代次数,惩罚因子的值随着迭代次数的增加而增加。至此将有非线性约束优化问题转化为了线性约束优化问题,接下来使用 PSO 算法对问题进行求解。

3.1.2 PSO 算法求解

3.1.2.1 算法步骤及流程

首先初始化一群随机粒子,粒子的状态空间包括 2 架 UAV 的水平坐标 ($[x_A, y_A], [x_J, y_J]$), 2 架 UAV 工作功率 (P_A, P_J^{\max}), 2 架 UAV 的高度 (H_A, H_J), 为了使结果更精确,设置粒子群的规模 $N=1000$,这样粒子群的初始状态为 8×1000 矩阵。然后在每次迭代中,每个粒子通过跟踪局部最优值 p_{best} 与全局最优值 g_{best} 来更新自己。直到粒子找到最优的适应度值,并输出最优个体与最优值。

粒子速度 v 和位置 x 的更新公式如下:

$$\begin{cases} v_{i+1} = w_i \times v_i + c_1 \times \text{rand}(\cdot) \times (p_{\text{best},i} - x_i) \\ \quad + c_2 \times \text{rand}(\cdot) \times (g_{\text{best},i} - x_i) \\ x_{i+1} = x_i + v_{i+1} \end{cases} \quad (25)$$

式中, w_i 为惯性权重, c_1 表示个体学习因子, c_2 表示全局学习因子。算法流程如算法 1 所示。

算法 1 联合功率与位置优化的 PSO 算法

输入:接收用户和检测者的位置坐标 q_B, q_W , 隐蔽约束 ϵ 。

输出: UAV-Alice 与 UAV-Jammer 的最优三维部署位置,以及最优发射功率、最优最大干扰功率和最大隐蔽传输速率。

步骤 1 初始化 N 个粒子的位置和速度,设置粒子维度,学习因子 c_1, c_2 , 惯性权重 w , 收敛精度 $\delta=10^{-4}$ 等参数;

步骤 2 初始化个体最优位置和最优值、初始化全局最优位置和最优值;

步骤 3 按照公式依次迭代,循环开始;

步骤 4 更新个体最优位置和最优值;

步骤 5 更新全局最优位置和最优值;

步骤 6 更新粒子位置和速度值;

步骤 7 边界条件处理;

步骤 8 直到适应度函数值的增量小于收敛精度 δ 。

3.1.2.2 算法复杂度与收敛性分析

粒子群规模为 N ,假设达到收敛精度时迭代次数为 T ,则该算法的复杂度可以表示为 $O(n) = O(N \times T)$ 。粒子群算法的优势在于收敛速度较快,但如果参数设置得不好,适应度值容易陷入局部最优,所以该算法的关键就在于选择、优

化和调整参数,使得其在保证收敛速度的前提下可以顺利找到全局最优解。

3.2 联合功率与部署位置交替优化算法

针对 PSO 算法中优化变量较多,初始种群规模较大的问题,以及功率与位置之间高度的耦合关系,我们提出另外一种优化算法:将原问题拆分为 UAV 功率优化与位置优化 2 个子问题,然后进行交替迭代求解。

3.2.1 UAV 功率优化子问题

对于给定的 UAV 部署位置,功率优化问题可以表示为:

$$\begin{aligned} & \max_{P_A, P_J^{\max}} C^{\max} \\ & \text{s. t. } C_1 \sim C_3, C_6 \end{aligned} \quad (26)$$

此时优化变量为 UAV-Alice 的发射功率 P_A 与 UAV-Jammer 的最大干扰功率 P_J^{\max} ,在 UAV-Jammer 最大干扰功率一定时,为提高 UAV-Alice 与地面之间的有效通信,发射功率应尽量大,但太大的发射功率会导致隐蔽性差。在 UAV-Alice 发射功率一定时,若要提高系统隐蔽性,干扰功率应尽量大,但太大的干扰功率又会影响合法节点之间的有效通信,因此需要通过合理设计 2 架 UAV 的功率分配使得系统在隐蔽性与有效性之间找到一个折中,在满足隐蔽性约束的基础上找到最优的有效通信速率。该优化问题包括 2 个非线性不等式约束和 6 个箱子集约束,可以通过使用 Matlab 优化工具箱中的 fmincon 函数求解。

3.2.2 UAV 位置优化子问题

对于给定的 UAV 发射功率,位置优化问题可以表示为:

$$\begin{aligned} & \max_{q_A, q_J, H_A, H_J} C^{\max} \\ & \text{s. t. } C_1, C_4 \sim C_6 \end{aligned} \quad (27)$$

此时优化变量为 2 架 UAV 的三维部署位置,一方面,为了提高通信 UAV 与地面之间的有效通信,UAV-Alice 需要尽可能地靠近 Bob,同时为降低干扰 UAV 对 Bob 接收信号的影响,UAV-Jammer 需要尽可能地远离 Bob;另一方面,为了提高通信的隐蔽性,干扰 Willie 的检测,UAV-Jammer 需要尽可能地靠近 Willie,同时为避免通信信号被 Willie 检测到,UAV-Alice 需要尽可能地远离 Willie。通过联合设计 2 架 UAV 的部署位置,可在系统满足隐蔽性约束的条件下,达到

最优的有效通信速率。该问题的求解方法与上个子问题类似,同样可以通过使用 Matlab 优化工具箱中的 fmincon 函数求解。

3.2.3 UAV 功率位置联合优化

3.2.3.1 整体优化算法

在分别求解 2 架 UAV 功率优化和部署位置优化 2 个子问题后,再进行交替迭代求解。其算法流程如算法 2 所示。

算法 2 联合功率与部署位置交替优化算法

输入:接收用户和检测者的位置坐标 q_B, q_W ,隐蔽约束 ϵ 。

输出:UAV-Alice 与 UAV-Jammer 的最优三维部署位置,以及最优发射功率、最优最大干扰功率和最大隐蔽传输速率。

步骤 1 信道参数初始化,参数初始化 $P_A^n, (P_J^{\max})^n, q_A^n, q_J^n$,设置收敛精度 $\theta=10^{-4}$,迭代次数 $n=0$;

步骤 2 循环开始;

步骤 3 给定 2 架 UAV 部署位置 $q_A^n, q_J^n, H_A^n, H_J^n$,求解优化问题(26),得到此时 2 架 UAV 的最优发射功率 $P_A^{n+1}, (P_J^{\max})^{n+1}$;

步骤 4 更新 $n \leftarrow n+1$;

步骤 5 给定 2 架 UAV 发射功率 $P_A^n, (P_J^{\max})^n$,求解优化问题(27),得到此时 2 架 UAV 的最优部署位置 $q_A^{n+1}, q_J^{n+1}, H_A^{n+1}, H_J^{n+1}$ 以及目标函数值 f^{n+1} ;

步骤 6 直到达到最大迭代次数或目标函数值收敛到规定的精度 $\frac{f^{n+1} - f^n}{f^n} \leq \theta$ 。

3.2.3.2 复杂度与收敛性分析

求解该问题的工具箱在本文的计算中使用的算法是内点法,内点法的算法复杂度为 $O(x^{3.5})\lg(1/\theta)$,其中 x 为变量维度, θ 为目标精度,目标函数收敛时共经过 t 次迭代,则其算法复杂度表示为 $O(tx^{3.5})\lg(1/\theta)$ 。内点法在寻找最优解时,是从给定的函数初值处开始搜索,因此初始值的选取对收敛的速度及结果有一定影响。在不考虑隐蔽性约束以及干扰对通信的影响时,显然 UAV-Alice 功率取最大,位置在 Bob 正上方时通信效果最好,同样 UAV-Jammer 的功率取最大,位置在 Willie 正上方时干扰效果最好,因此我们将此位置与功率值作为搜索的初始值。该算法在每一次迭代的过程中目标函数值都在增加,但由于 UAV 的功率是存在上限的,有效隐蔽速率不会无限增加,因此所提的联合优化算法是收敛的。通过交替迭代的方法,可以得到问题的最优解,该算法相比 PSO 算法稳定性更好。

4 仿真结果与分析

4.1 参数设置

通过仿真实验对所提隐蔽传输方案的性能进行分析。仿真参数设置如表 3 所示。

表 1 仿真参数
Tab. 1 Simulation parameters

参数	数值
Willie 的水平位置坐标/m	$q_w = [300, 400]$
Bob 的水平位置坐标/m	$q_B = [600, 700]$
UAV-Alice 发射功率范围/W	$0 \leq P_A \leq 1$
UAV-Jammer 最大干扰功率范围/W	$0 \leq P_J^{\max} \leq 10$
UAV-Alice 水平位置范围/m	$0 \leq x_A \leq 1\ 000,$ $0 \leq y_A \leq 1\ 000$
UAV-Jammer 水平位置范围/m	$0 \leq x_j \leq 1\ 000,$ $0 \leq y_j \leq 1\ 000$
UAV-Alice 高度范围/m	$500 \leq H_A \leq 1\ 000$
UAV-Jammer 高度范围/m	$500 \leq H_j \leq 1\ 000$
环境背景噪声/dBm	$\sigma_w^2 = \sigma_w'^2 = -120$
参考距离为 1 m 的信道增益/dB	$\beta_0 = -60$

此外,为了验证所提方案的有效性能,我们将固定 2 架 UAV 的位置,而只优化 UAV 功率的方案作为基准方案 1,以及固定干扰 UAV 位置只优化通信 UAV 位置的方案作为基准方案 2,并对所提方案与 2 个基准方案进行对比分析。

4.2 性能分析与对比

图 2 给出了不同方案下最大有效隐蔽传输速率随隐蔽性约束变化的情况,可以看出, ϵ 的值越大,系统对隐蔽性要求越低,可实现的有效隐蔽传输速率就越大。同时可以看到,所提的联合优化 UAV 功率位置的传输方案明显优于固定 UAV 位置、只优化功率的基准方案 1 以及固定干扰 UAV 位置、只优化通信 UAV 位置的基准方案 2,并且随着隐蔽性约束值的增加,优势愈加明显。算法 2 得到的最大有效隐蔽传输速率略大于算法 1 得到的解,这表明使用交替迭代优化的算法得到的计算结果要比直接使用粒子群优化算法得到的结果更理想。第 3 节中分析了 2 种算

法的复杂度,在仿真中所给数据规模下,算法 1 的平均运行时间为 6.9 s,算法 2 的平均运行时间为 32.8 s,可得到算法 1 的时间复杂度比算法 2 要小,且算法 1 收敛速度较快。因此在对算法精度要求不高,但对复杂度要求较高时优先选用算法 1,可快速得到一个较为理想的结果。当对算法精度要求较高,但对复杂度要求不高时则优先选用算法 2,可得到一个更为精确的结果。

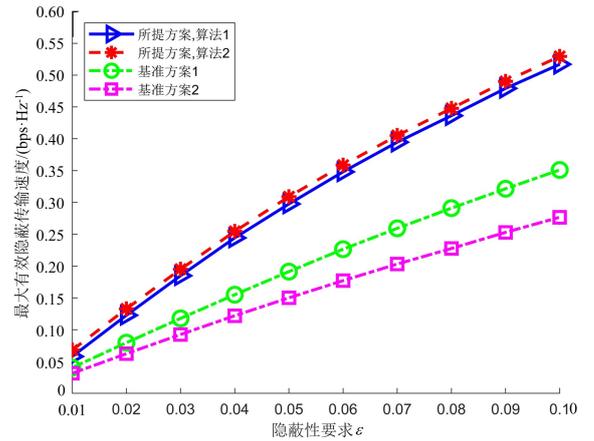


图 2 不同方案及算法下的最大有效隐蔽速率

Fig. 2 Maximum effective covert rate with different schemes and algorithms

图 3 给出了 2 架 UAV 最优的功率分配方案,即 UAV-Alice 的最优发射功率与 UAV-Jammer 的最优最大干扰功率随隐蔽性约束变化的情况,图 3(a)表明随着 ϵ 的增加,隐蔽性要求降低,最优发射功率逐渐增加,直到达到最大发射功率,此时最优发射功率就是允许的最大发射功率。图 3(b)表明当 ϵ 较小也就是隐蔽性要求高的时候,最优的最大干扰功率就是干扰功率范围的最大值,而当 ϵ 增加到一定值时,最优的最大干扰功率开始降低,这是因为随着隐蔽性要求的降低,发射功率又不再增加时,允许 UAV-Jammer 以更小的干扰功率发送,以减少对正常通信的影响。由此可以看出,2 架 UAV 的最优功率需要根据隐蔽性约束以及给出的功率范围来确定,不同的约束和范围得到的最优功率不一样,而不是简单的固定其中一个功率,另一个功率取最大值。

图 4 给出了不同功率下最大有效隐蔽传输速率与 UAV 位置之间的关系,隐蔽性约束 ϵ 取 0.01,此时使用算法 1 或者算法 2 计算出最优发射功率约为 0.25 W,最优的最大干扰功率为

10 W。图 4(a)表明 UAV-Jammer 存在最优位置,通过计算可得最优位置与 Willie 的距离约为 580 m,此外在最大干扰功率范围内,随着最大干扰功率的增加,最大有效隐蔽速率逐渐增加,这是因为干扰功率的增加使得 UAV-Alice 可以更加地靠近 Bob,从而提高有效通信速率。当功率取范围的上界 10 W 时,有效隐蔽速率达到最大。图 4(b)表明 UAV-Alice 同样存在最优位置,通过计算可得最优位置与 Bob 的距离约为

600 m。此外,在发射功率范围内,随着功率增加,有效隐蔽速率逐渐增加,当发射功率为 0.25 W 时达到最大,随后有效隐蔽速率随着发射功率的增加而减少。需要注意的是,发射功率的增加使得 UAV-Jammer 需要更加地靠近 Willie 以达到干扰的目的,而当 UAV-Jammer 与 Willie 的距离比最小高度还要小时,不满足约束条件,视为隐蔽通信失败,此时有效隐蔽传输速率为 0,即图中函数值为 0 的部分。

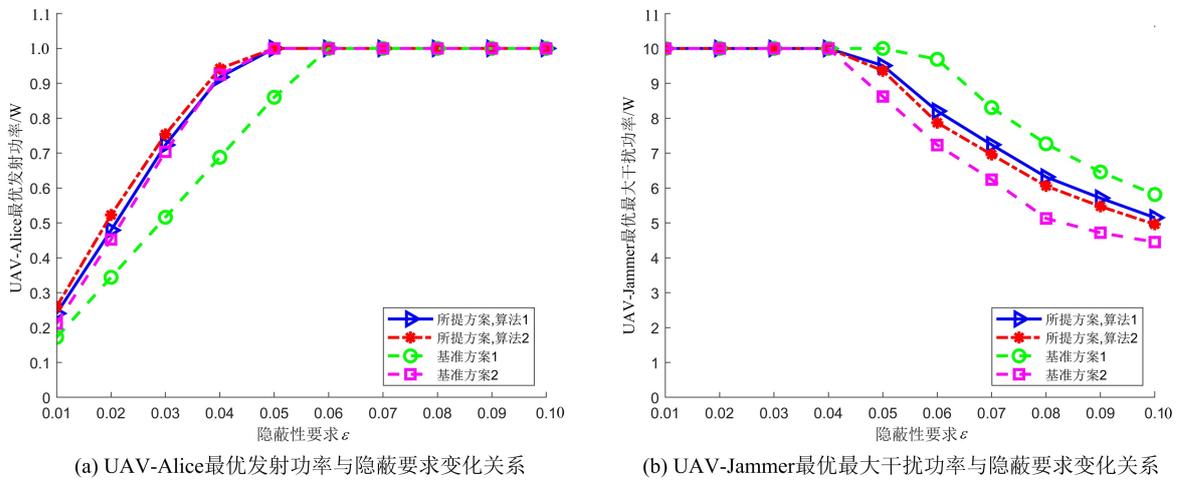


图 3 不同方案下的最优发射功率与最优最大干扰功率

Fig. 3 Optimal transmit power and optimal maximum interference power with different schemes

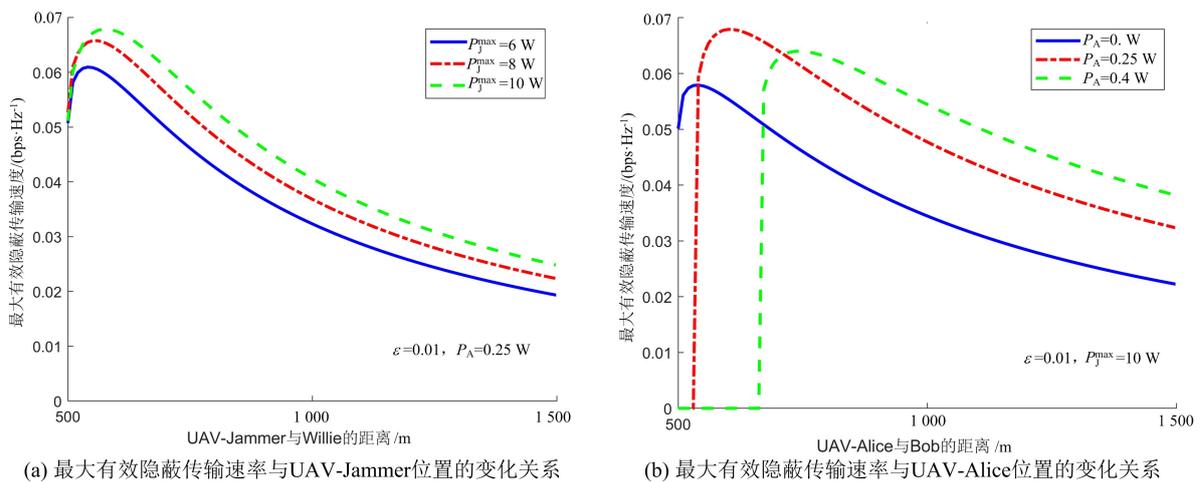


图 4 最大有效隐蔽速率与 UAV 位置的关系

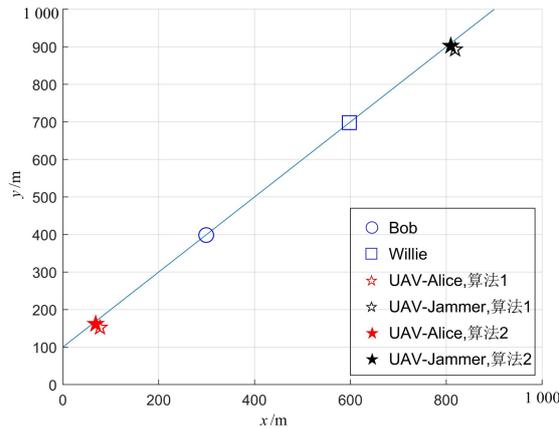
Fig. 4 The relationship between maximum effective covert rate and UAV location

图 5(a)给出了在隐蔽约束 $\epsilon=0.01$ 情况下,2 种算法得到的 UAV 最优部署位置,UAV-Alice 的水平投影位于 Bob 的左下角,UAV-Jammer 的水平投影位于 Willie 的右上角,两架 UAV 的高度通过 2 种算法计算结果相同,均为 500.01 m。

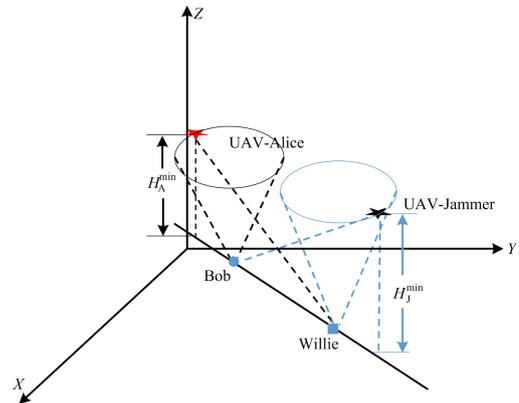
首先,图 4(b)中给出了 UAV-Alice 距离 Bob 的最优距离约为 600 m,也就是说 UAV-Alice 的最优位置位于以 Bob 为顶点,母线长为 600 m,高度为 H_A 的倒圆锥体的底面圆上,如图 5(b)所示。为使 UAV-Alice 尽可能避免被 Willie 检测到,它

需要尽可能远离 Willie,而地面节点连线与圆锥体底面圆水平投影离 Willie 最远的交点满足这一条件,此时 UAV 高度也应是允许的最小高度 H_A^{\min} ,这样正好符合距离 Willie 尽可能地远。同理,对于 UAV-Jammer 的位置同样也具有此规律,因此 2 架 UAV 最优水平位置的连线与地面 2

个节点在同一条直线上,且最优高度为允许高度范围的最小值。此外,从图 5(a)可以看出算法 2 得到的结果更符合实际情况,算法 1 得到的结果没有完全位于 Bob 和 Willie 的连线上,结果略有偏差,对于高度而言,2 种算法得到的结果基本一致,因此总体而言,算法 2 的计算精度要略优于算法 1。



(a) 2架UAV最优部署位置的水平投影



(b) 2架UAV最优部署位置三维示意图

图 5 UAV 的最优部署位置

Fig. 5 The optimal deployment location for UAV

5 结束语

本文研究了空中干扰辅助的 UAV 空地隐蔽通信方案,联合设计了 UAV 功率与位置部署的最优方案,以实现有效隐蔽传输速率最大化。首先推导了 Willie 的最小检测错误概率,并在此基础上推导出隐蔽性约束以及最大有效隐蔽传输速率的闭式表达式,对该场景中的其他约束进行了描述。然后针对问题求解设计了 2 种优化算法:一种是使用 PSO 算法直接解决多变量的非线性约束优化问题,另一种是针对优化变量耦合的特点设计了交替迭代优化的算法。最后给出了仿真结果,在不考虑算法复杂度的情况下,使用交替优化算法的计算性能要略优于 PSO 算法,同时与固定 UAV 位置而只优化 UAV 功率以及固定干扰 UAV 位置而只优化通信 UAV 位置的 2 种基准方案进行对比,所提的联合优化方案具有明显性能增益。仿真结果表明,2 架 UAV 的最优功率需要根据功率范围来确定,并不是简单地取最大值作为最优功率。2 架 UAV 最优位置的水平投影与地面 2 个节点在同一条直线上,UAV 的最优高度则是允许的最小高度。

参考文献

- [1] ZENG Y, ZHANG R, LIM T J. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(5): 36-42.
- [2] 周小波. 无人机通信中无线安全传输技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2020.
ZHOU Xiaobo. Research on wireless security transmission techniques for UAV communications [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
- [3] YAN S, ZHOU X, HU J, et al. Low probability of detection communication: opportunities and challenges [J]. IEEE Wireless Communications, 2019, 26(5): 19-25.
- [4] BASH B A, GOECKEL D, TOWSLEY D. Limits of reliable communication with low probability of detection on AWGN channels[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(9): 1921-1930.
- [5] SOBERS T V, BASH B A, GUHA S, et al. Covert communication in the presence of an uninformed jammer[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(9): 6193-6206.
- [6] SHAHZAD K, ZHOU X, YAN S. Covert communication in fading channels under channel uncertainty

- [C]//Proceedings of the 85th Vehicular Technology Conference. [S.l.]: IEEE, 2017: 1-5.
- [7] HE B, YAN S, ZHOU X, et al. On covert communication with noise uncertainty[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(4): 941-944.
- [8] TA H Q, KIM S W. Covert communication under channel uncertainty and noise uncertainty [C]//Proceedings of 2019 IEEE International Conference on Communications (ICC). [S.l.]: IEEE, 2019: 1-6.
- [9] SHAHZAD K, ZHOU X, YAN S, et al. Achieving covert wireless communications using a full-duplex receiver[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(12): 8517-8530.
- [10] ZHOU X, YAN S, HU J, et al. Joint optimization of a UAV's trajectory and transmit power for covert communications [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2019, 67(16): 4276-4290.
- [11] JIANG X, YANG Z, ZHAO N, et al. Resource allocation and trajectory optimization for UAV-enabled multi-user covert communications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(2): 1989-1994.
- [12] ZHOU X B, YAN S H, NG D W K, et al. Three-dimensional placement and transmit power design for UAV covert communications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(12): 13424-13429.
- [13] CHEN X, ZHANG N, TANG J, et al. UAV-aided covert communication with a multi-antenna jammer [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(11): 11619-11631.
- [14] LIANG W, SHI J, TIE Z, et al. Performance analysis for UAV-jammer aided covert communication[J]. IEEE Access, 2020, 8: 111394-111400.
- [15] 胡锦涛, 吴林梅, 束锋, 等. 无人机中继协助的有限码长隐蔽通信[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(3): 1006-1013.
HU Jinsong, WU Linmei, SHU Feng, et al. UAV-relay assisted covert communication with finite block-length[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2022, 44(3): 1006-1013. (in Chinese)
- [16] HU X, EBERHART R. Solving constrained nonlinear optimization problems with particle swarm optimization [C]//Proceedings of the 6th World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics. [S.l. :s.n.], 2002: 203-206.

作者简介

章礼玮

男,1992年生,硕士研究生,研究方向为隐蔽通信、无人机通信
E-mail:zlwj287@163.com



李国鑫

男,1990年生,博士,副教授,研究方向为空地一体化网络、隐蔽通信等
E-mail:guoxin@aeu.edu.cn



陈瑾

女,1971年生,博士,教授,研究方向为移动通信、认知无线电等
E-mail:chenjin99@263.net



王海超

男,1991年生,博士,副教授,研究方向为无人机通信、异构无线网络传输技术等
E-mail:whcwl0919@sina.com



贺文辉

男,1996年生,博士研究生,研究方向为无线隐蔽通信、无线携能通信
E-mail:lgdxhewenhui@foxmail.com



黄育侦

男,1986年生,博士,副研究员,研究方向为物理层安全、协同通信等
E-mail:yzh_huang@sina.com



责任编辑 钱 静