

DOI: 10.3969/j.issn.2097-180X.2024.01.009

一种航迹欺骗干扰背景下的无人机航迹规划方法

姜玉博^{1,2}, 王广学¹, 何 缓¹, 冷 毅¹

(1.空军预警学院, 武汉 430019; 2.93656部队, 北京 101100)

摘 要:为提高无人机集群实施航迹欺骗干扰的效能,提出一种基于航迹欺骗干扰背景的无人机航迹规划方法。首先,给出了无人机集群对组网雷达实施航迹欺骗干扰的基础数学模型,在无人机和假目标保持相似航迹匀速飞行的前提下,提出了无人机能耗、战场生存概率、通信信道传输损耗评价指标,建立无人机评价函数模型;然后,以评价函数为最优化模型,通过粒子群算法求解距离比值系数,最终获得综合性能最优的航迹规划结果。仿真结果表明,与已有航迹规划方法相比,本文建立了更为全面的评价函数,所规划出的航迹更好地兼顾了安全性和任务完成能力。

关键词:无人机集群;航迹规划;组网雷达;航迹欺骗干扰

中图分类号:V279;TN972

文献标识码:A

文章编号:2097-180X(2024)01-0043-07

在无人机集群的航迹欺骗干扰中,常通过“逆向思维”^[1]来规划干扰无人机航迹,即先设计好假目标航迹,再根据假目标航迹和雷达的相对位置逆推求解出干扰无人机的实际飞行航迹。为无人机集群规划出综合性能较优且实际可飞的航迹是有效实施干扰的关键前提之一。近年来,通过无人机集群对组网雷达实施航迹欺骗干扰的作战样式受到国内外学者的广泛关注,并对确保干扰有效的航迹规划方法进行了不同层次和角度的研究。文献[2]以通过组网雷达“同源检验”为目的,以距离约束为条件在二维平面内从可选航迹群中选择较优的无人机集群航迹,但并未考虑无人机能耗等现实问题;文献[3]针对已有文献的优化函数笼统且局限于运动特征的不足,对无人机航迹进行基于最小推动力的优化,但该研究仅以定高状态为前提,变高情形不能完全适用;文献[4]针对前人进行航迹规划函数单一、规划效果不佳的问题,提出了分步规划、合理避让威胁点的评价函数,通过求解适当距离系数来实现航迹平稳,但该方法局限于二维平面且未考虑协同问题;文献[5]分别以最小无人机能耗和最小航迹曲率为优化目标,得到了2种不同的最优控制模型,但其模型组成因素简单笼统,参数设置并未进行公式推导,规划出的航迹综合性能较低;文献[6]在民用背景下采用了一种局部最优路径离散化(local optimized path discretization, LOPD)算法对无人机航迹进行规划,

所建立的评价函数考虑了无人机空地通信、能耗以及避障等因素,但未考虑航迹欺骗干扰时无人机的机间通信以及战场生存能力需求,且求解较为复杂。

无人机航迹规划时考虑因素越全面,所规划出的航迹综合性能越好,而现有算法构造的评价函数组成因素或有欠缺。为了解决上述问题,本文以干扰无人机与假目标保持相似航迹匀速飞行为前提,首先简化了干扰无人机航迹可实现性问题,而后针对无人机能耗、战场生存概率、通信信道传输损耗3个指标因素分析建立了评价函数模型,结合粒子群算法设计提出了一种新的航迹规划方法。仿真结果表明,与已有算法相比,本文所建立的评价函数更具有全面性,且变量统一便于寻找最优解,所规划出的航迹同时兼顾了安全性和任务完成能力,有利于更好地遂行作战任务。

1 基于无人机集群的组网雷达航迹欺骗干扰基本原理

无人机集群航迹欺骗干扰组网雷达示意图如图1所示。基本原理为:多部无人机干扰多部雷达,在满足假目标-无人机-雷达三点共线的基础上,各无人机通过控制自身携带的干扰机,产生带有时延的欺骗信号并使其进入雷达主瓣,多架无人机产生的多个假目标信号在空间中融

收稿日期: 2023-12-11

基金项目: 湖北省自然科学基金计划项目(2023AFB1028)

作者简介: 姜玉博(1997-), 男, 硕士生, 主要从事信息对抗技术研究。

通信作者: 王广学(1981-), 男, 博士, 主要从事信息对抗技术研究。E-mail: wgxrada@163.com

为一点,即通过组网雷达的“同源检验”,就能在指定位置上产生可靠的假目标点,随着无人机运动,累积的假目标点形成假目标航迹。

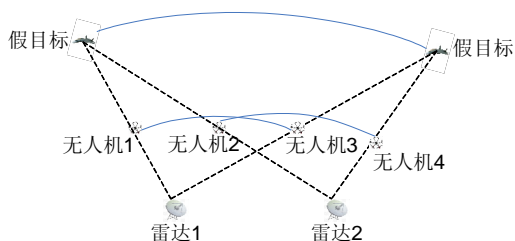


图1 无人机集群航迹欺骗干扰组网雷达示意图

在航迹欺骗干扰模型中,假目标-无人机-雷达三者之间的位置关系如图2所示。其中, v_p 、 α_p 、 β_p 分别为假目标的速度、航迹偏角以及航迹倾角, v_u 、 α_u 、 β_u 分别为无人机的速度、航迹偏角以及航迹倾角, θ 、 φ 分别为假目标/无人机相对于雷达的俯仰角和方位角, R 、 r 分别为假目标和无人机到雷达的距离。在地固坐标系下,假目标、无人机和雷达的位置坐标分别为 (x_p, y_p, z_p) 、 (x_u, y_u, z_u) 、 (x_r, y_r, z_r) 。以假目标、无人机和雷达为原点建立各自直角坐标系(各轴对应平行,位置关系见图2)。

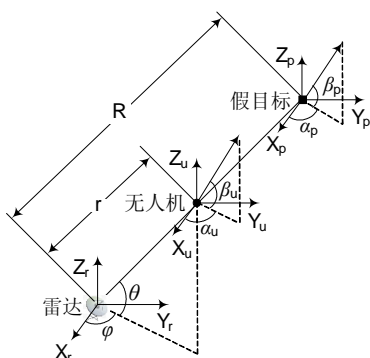


图2 雷达-无人机-假目标位置关系

在直角坐标系中 $O_p X_p Y_p Z_p$, 假目标的运动方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_p = v_p \cos \beta_p \cos \alpha_p \\ \dot{y}_p = v_p \cos \beta_p \sin \alpha_p \\ \dot{z}_p = v_p \sin \beta_p \end{cases} \quad (1)$$

式中, \dot{x}_p 、 \dot{y}_p 、 \dot{z}_p 分别为 x_p 、 y_p 、 z_p 的导数。

假目标在站心球坐标系下的坐标为 (R, θ, φ) , 则假目标位置的直角坐标与球坐标转换关系为

$$\begin{cases} x_p = R \cos \theta \cos \varphi \\ y_p = R \cos \theta \sin \varphi \\ z_p = R \sin \theta \end{cases} \quad (2)$$

对式(2)求导并转化为矩阵形式,可得

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{y}_p \\ \dot{z}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \varphi & -\sin \varphi & -\sin \theta \cos \varphi \\ \cos \theta \sin \varphi & \cos \varphi & -\sin \theta \sin \varphi \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{R} \\ R \dot{\varphi} \cos \theta \\ R \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, \dot{R} 、 $\dot{\theta}$ 、 $\dot{\varphi}$ 分别为假目标相对于雷达距离、俯仰角和方位角的导数, $\theta \neq 0$ 。

由式(3)可得,假目标在以雷达为原点的球坐标系下的运动模型为

$$\begin{bmatrix} \dot{R} \\ R \dot{\varphi} \cos \theta \\ R \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \varphi & \cos \theta \sin \varphi & \sin \theta \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ -\sin \theta \cos \varphi & -\sin \theta \sin \varphi & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{y}_p \\ \dot{z}_p \end{bmatrix} \quad (4)$$

由式(1)和式(4)可得

$$\begin{cases} \dot{R} = v_p [\cos \theta \cos \beta_p \cos(\alpha_p - \varphi) + \sin \theta \sin \beta_p] \\ \dot{\varphi} = v_p \cos \beta_p \sin(\alpha_p - \varphi) / (R \cos \theta) \\ \dot{\theta} = v_p [-\sin \theta \cos \beta_p \cos(\alpha_p - \varphi) + \cos \theta \sin \beta_p] / R \end{cases} \quad (5)$$

$$v_p^2 = \dot{R}^2 + (R \dot{\varphi} \cos \theta)^2 + \dot{\theta}^2 \quad (6)$$

根据假目标-无人机-雷达三点共线原理,同理可以得到无人机的运动模型,在此不做重复推导。

根据几何关系,可得 θ 、 φ 、 $\dot{\theta}$ 、 $\dot{\varphi}$ 表达式如下:

$$\begin{cases} \theta = \arcsin((z_p - z_r) / R) \\ \varphi = \arctan((y_p - y_r) / (z_p - z_r)) \\ \dot{\theta} = R_{xy} \dot{z}_p / R^2 - (z_p - z_r) / R^2 [(x_p - x_r) \dot{x}_p + (y_p - y_r) \dot{y}_p] / R_{xy} \\ \dot{\varphi} = ((x_p - x_r) \dot{y}_p + (y_p - y_r) \dot{x}_p) / R_{xy}^2 \end{cases} \quad (7)$$

式中 $R_{xy} = ((x_p - x_r)^2 + (y_p - y_r)^2)^{1/2}$ 。

根据假目标航迹和雷达位置坐标,可求解得到干扰无人机的位置坐标:

$$\begin{cases} x_u = (x_r - x_p)(z_u - z_p) / (z_r - z_p) + x_p \\ y_u = (y_r - y_p)(z_u - z_p) / (z_r - z_p) + y_p \\ z_u = \eta(z_p - z_r) + z_r \end{cases} \quad (8)$$

式中 $\eta = r/R$ 为距离比值系数。

2 评价函数分析建模

无人机集群对组网雷达实施航迹欺骗干扰的一般流程为:①获取敌方雷达情报,根据作战意图规划出符合运动学约束的假目标航迹;②根据假目标航迹和拟选用的干扰无人机性能参数,规划出实际可飞且性能优的航迹;③通过一定的运载方式将干扰无人机投放至作战区域;④干扰无人机飞至各自航迹起始点,并展开协同飞行,实施航迹欺骗干扰任务。

本文首先在相似航迹约束的前提下,将干扰无人机的航迹是否可实现简化为速度约束问题,而后分析了无人机能耗、战场生存概率以及通信信道传输损耗3个指标因素,并以此为优化目标推导建立了以 η 为自变量的综合评价函数模型。

2.1 航迹可实现性

实施航迹欺骗干扰的无人机集群航迹规划

首先应使其航迹实际可飞,即应满足飞行速度、飞行高度、转弯率、最大爬升角等方面的约束。

1) 无人机飞行速度

无人机速度的最小值 v_{\min} 和最大值 v_{\max} 满足:

$$\left. \begin{aligned} v_{\min} &\leq v_u \leq v_{\max} \\ v_{\min}^h &\leq v_u^h \leq v_{\max}^h \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中 v_u^h 、 v_{\min}^h 、 v_{\max}^h 分别为无人机垂直方向上的分速度、分速度的最小值和最大值。

2) 无人机飞行高度

由几何关系可得

$$\frac{v_u}{v_p} = \frac{(r^2 + (r \cos \theta \cdot \dot{\varphi})^2 + \dot{\theta}^2)^{1/2}}{(\dot{R}^2 + (R \cos \theta \cdot \dot{\varphi})^2 + \dot{\theta}^2)^{1/2}} = \frac{r}{R} = \frac{h_u - h_r}{h_p - h_r} \quad (10)$$

式中, h_r 为雷达海拔高度, h_u 为无人机海拔高度, h_p 为假目标海拔高度。

3) 转弯率

转弯率 W 是指飞机飞行航向的瞬时改变或者稳态改变率,即相邻航迹点的偏航角变化率,反映了飞机的方向机动性。根据三角函数可得假目标第 k 个航迹点转弯率 W_{pk} :

$$W_{pk} = (180^\circ - \arccos((l_{1k}^2 + l_{1k+1}^2 - l_{2k}^2)/(2|l_{1k}| \cdot |l_{1k+1}|)))/\Delta t \quad (11)$$

式中, Δt 为第 k 个航迹点与第 $k+1$ 个航迹点的时间间隔, l_{1k} 代表假目标第 k 个航迹点与第 $k+1$ 点间的距离, l_{2k} 代表假目标第 k 个航迹点与第 $k+2$ 点间的距离,即

$$\left. \begin{aligned} l_{1k} &= ((x_{pk+1} - x_{pk})^2 + (y_{pk+1} - y_{pk})^2 + (z_{pk+1} - z_{pk})^2)^{1/2} \\ l_{2k} &= ((x_{pk+2} - x_{pk})^2 + (y_{pk+2} - y_{pk})^2 + (z_{pk+2} - z_{pk})^2)^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

则式(8)可进一步表示为

$$\left. \begin{aligned} x_u &= \eta x_p + (1 - \eta)x_r \\ y_u &= \eta y_p + (1 - \eta)y_r \\ z_u &= \eta z_p + (1 - \eta)z_r \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

由式(11)一式(13)可得干扰无人机第 k 个航迹点转弯率 $W_{uk} = W_{pk}$ 。

转弯率与飞行器转弯半径成反比,当转弯率满足约束条件时,即代表此时的转弯半径大于(或等于)最小转弯半径。

4) 最大爬升角/俯冲角

飞行器的最大爬升角/俯冲角是在垂直方向的约束,如果飞行器在单次爬升/俯冲的角度过大极易导致飞行器的失速。假目标第 k 个航迹点的爬升角/俯冲角为

$$\beta_{pk} = \arctan((z_{pk+1} - z_{pk})/((x_{pk+1} - x_{pk})^2 + (y_{pk+1} - y_{pk})^2)^{1/2}) \quad (14)$$

同理,由转弯率求解部分可得干扰无人机第 k 个航迹点的爬升角/俯冲角 $\beta_{uk} = \beta_{pk}$ 。

由上述可知,当假目标航迹转弯率和最大爬升角/俯冲角确定后,干扰无人机航迹转弯率和最大爬升角/俯冲角也随之确定,当无人机的性能参数优于此结果时,航迹可实现性问题可简化为速度约束。由式(9)和式(10)可知,为使飞行高度满足约束,干扰无人机飞行速度需满足 $[v_{\min}, v_{\max}]$ 约束。

2.2 无人机能耗

无人机能耗主要分为通信能耗以及运动能耗,以旋翼无人机为例进行分析,其运动能耗又可分为移动能耗以及悬停能耗,由于通信能耗相较于移动能耗很小^[7],故本文仅讨论运动能耗问题。

能耗问题需要从投放点至航迹起始点和按照规划航迹飞行2个阶段来考虑。

1) 投放点至航迹起始点能耗

干扰无人机集群在投放点分别以 v_{\min} 匀速直线飞至各自起始点。此时需要考虑无人机匀速飞到航迹起始点的能耗和先到达的无人机悬停能耗。

① 匀速运动能耗

第 i 架无人机飞到航迹起始点所需时间 T_{1i} 内,第 i 架无人机的匀速飞行能耗^[8]为

$$E_{fi}^1 = \int_0^{T_{1i}} P_f(v_{\min}) dt_i \quad (15)$$

式中, P_f 为无人机速度为 v_u 时运动的总功率,表达式为

$$P_f(v_u) \approx P_0(1 + 3v_u^2/U_{tip}^2) + P_1 v_0/v_u + d\rho s A v_u^3/2 \quad (16)$$

式中, P_0 和 P_1 分别表示悬停状态下的叶型功率和诱导功率; U_{tip} 为旋翼的叶边速度; v_0 为悬停状态下旋翼的诱导速度; d 为机身阻力比; s 为转子稳定性; ρ 和 A 分别表示空气密度和旋翼旋转的面积,假设 ρ 为定值。 P_0 和 P_1 表达式分别为

$$P_0 = \delta \rho s A \Omega^3/8 \quad (17)$$

$$P_1 = (1 + K)((mg)^3/(2\rho A))^{1/2} \quad (18)$$

式中, δ 为剖面阻力系数, Ω 为叶片旋转角速度, K 为功率的增量修正系数, m 为无人机质量, g 为当地重力系数。

② 悬停能耗

第 i 架无人机需要等待的时间 T_{2i} 内,第 i 架无人机悬停能耗为

$$E_{xi} = (P_0 + P_1)T_{2i} \quad (19)$$

③ 高度变化能耗

第 i 架无人机高度变化能耗^[9]为

$$E_{hi}^1 = mg(\eta_i h_{p1} - h_1)/\gamma \quad i \geq 2 \quad (20)$$

式中, h_{p1} 为假目标起始点高度, h_1 为投放点高度, γ 为能量转化率.

故 D 架无人机由投放点至航迹起始点的总能耗 E_1 可以表示为

$$E_1 = \sum_{i=1}^D (E_{fi}^1 + E_{xi} + E_{hi}^1) \quad (21)$$

2) 按照规划航迹飞行能耗

设定无人机在运动状态下即可完成信号转发, 故在此阶段无需考虑悬停能耗, 仅讨论移动能耗, 包括匀速运动能耗、高度变化能耗以及转角能耗.

① 匀速运动能耗

无人机实施航迹欺骗干扰的时间 T_3 内, 第 i 架无人机匀速运动总能耗为

$$E_{fi}^2 = \int_0^{T_3} P_f(v_u(t_3)) dt_3 = \int_0^{T_3} P_f(\eta_i v_p(t_3)) dt_3 \quad (22)$$

② 高度变化能耗

第 i 架无人机高度变化总能耗为

$$E_{hi}^2 = \gamma^{-1} \sum_{i=1}^n mg\eta_i (\Delta h_{pi}) \quad (23)$$

式中, n 为假目标航迹划分的总段数, Δh_{pi} 为第 i 段高度变化值.

③ 转角能耗

假定无人机在两段航迹连接点处进行一次转弯, 故无人机转角能耗公式^[10]为

$$E_{zi} = \sum_{j=1}^{n-1} 2.17\theta_{i,j}^z \quad (24)$$

式中, $\theta_{i,j}^z$ 为第 i 架无人机第 j 个转弯角, 同式(11)和式(12)求解方式类似.

故 D 架无人机按照规划航迹飞行能耗的总能耗 E_2 可以表示为

$$E_2 = \sum_{i=1}^D (E_{fi}^2 + E_{zi} + E_{hi}^2) \quad (25)$$

D 架无人机运动总能耗 E 为

$$E = E_1 + E_2 \quad (26)$$

2.3 通信信道传输损耗

由于组网雷达的“同源检验”准则和优越的数据融合特性, 要达到实施航迹欺骗干扰的目的, 集群内的无人机之间需要进行多维度协同和信息交互, 而距离是影响信道传输损耗的关键因素. 假设在实施干扰期间无人机的通信信号在自由空间中传播, t_3 时刻无人机 1 和无人机 2 间通信信号传输损耗 $l_{1,2}(t_3)$ ^[11]为

$$l_{1,2}(t_3) = 32.44 + 20 \lg f + 20 \lg (\|q_1(t_3) - q_2(t_3)\|_2) \quad (27)$$

式中, f 为无人机通信信号频率, q_1 为无人机 1 位置坐标, q_2 为无人机 2 位置坐标, $\|\cdot\|_2$ 表示求 2-范数.

自由空间传播损耗 $L_{1,2}$ 可以表示为

$$L_{1,2} = \int_0^{T_3} l_{1,2}(t_3) dt_3 \quad (28)$$

2.4 生存概率

1) 无人机之间的安全距离

为了避免出现因无人机之间距离过小而产生互扰的情况, 需要限制无人机之间的最小距离.

2) 雷达发现概率

通常雷达都会使用特定的虚警概率来计算恒虚警条件下的雷达检测概率, 但由于检测概率公式中包含的零阶修正贝塞尔函数计算较为复杂, 故一般采用近似算法计算雷达检测概率^[12], 第 i 架无人机在某一时刻被雷达 j 发现的概率为

$$P_{di} \approx 0.5 \operatorname{erfc}((-\ln P_{fa})^{1/2} - (SNR_i + 0.5)^{1/2}) \quad (29)$$

式中, $\operatorname{erfc}(\cdot)$ 为互补误差函数, P_{fa} 为虚警概率, SNR_i 为第 i 架无人机回波在雷达接收机前端信噪比, 即

$$SNR_i = \frac{P_{Li} G_t \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 k_b T_0 B F r^4} = \frac{P_{Li} G_t \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 k_b T_0 B F (\eta_i R)^4} \quad (30)$$

式中, P_{Li} 为雷达发射峰值功率, G_t 为雷达收发天线增益, λ 为雷达发射信号的波长, σ 为干扰无人机的散射截面积, k_b 为玻尔兹曼常数, T_0 为热力学温度, B 为雷达接收机带宽, F 为雷达接收机噪声系数.

对于安全性指标而言, 本文主要考虑实施航迹欺骗干扰的 D 架无人机各自被敌方雷达发现的概率之和 P_d . 假定单架无人机仅会被其对应实施干扰的雷达发现, 且由于单架无人机在不同航迹点处被雷达探测到的概率不同, 而其能被发现应参考整条航迹所对应的发现概率集合中的最大值, 则 P_d 可表示为

$$P_d = \sum_{i=1}^D \max P_{di}^s \quad (31)$$

式中 P_{di}^s 为第 i 架无人机被雷达 i 发现概率的集合.

2.5 评价函数模型

1) 数据处理

由于生存概率与能耗、通信信道传输损耗之间数量级相差较大, 需对数据进行标准化处理, 以总能耗 E_{norm} 为例, 其表达式为

$$E_{\text{norm}} = E/E_{\text{max}} \quad (32)$$

式中 E_{max} 为 D 架无人机总能耗最大值.

2) 权重分配

采用专家打分的方式,得到任务完成能力和安全性2个一级指标的权重分别为0.8、0.2,任务完成能力包含无人机能耗以及通信信道传输损耗2个二级指标,权重分别为0.2、0.6,安全性包含生存概率一个二级指标.

3) 评价函数构建

综上所述,可得评价函数 Y 表达式:

$$Y = 0.2E_{\text{norm}} + 0.6L_{\text{norm}} + 0.2P_{\text{dnorm}} \quad (33)$$

式中, E_{norm} 为标准化后的总能耗, P_{dnorm} 为标准化后的雷达发现概率, L_{norm} 为标准化后的总信道传输损耗.

由于假目标航迹已知,根据相似航迹约束和几何关系可得,当 η_i 一定时,各干扰无人机的航迹及坐标位置确定,进而式(15)、式(19)、式(22)和式(23)中的 T_{1i} 、 T_{2i} 、 T_3 、 h_{p1} 、 Δh_{p1} 、 n 均可直接求解,故评价函数 Y 中仅有 $\eta_i (i=1, 2, \dots, D)$ 一组变量.

3 航迹欺骗干扰背景下的航迹规划方法

无人机航迹规划的目的是得到符合使用方需求的最优航迹,根据建立的评价函数模型 Y ,采用标准粒子群寻优算法得到评价函数模型最小值,即粒子适应度 Y_{\min} ,最后将其对应的 $\eta_i (i=1, 2, \dots, D)$ 代入式(13)即可求解出对应的无人机航迹.

3.1 PSO 算法

假设 D 架无人机干扰 D 部雷达,由 N 个粒子组成一个种群,每个粒子 $i (i=1, 2, \dots, N)$ 的空间位置可以表示为 $\mathbf{X}_i = (X_{i,1}, X_{i,2}, \dots, X_{i,D})$,其物理意义表示为 η 数组的一种取值,粒子 i 的速度可以表示为 $\mathbf{v}_i = (v_{i,1}, v_{i,2}, \dots, v_{i,D})$,第 i 个粒子搜索到的最优位置为个体极值,记为 $\mathbf{p}_{\text{best}} = (p_{i,1}, p_{i,2}, \dots, p_{i,D})$,而整个粒子群搜索到的最优位置为全局极值,记为 $\mathbf{g}_{\text{best}} = (p_{g,1}, p_{g,2}, \dots, p_{g,D})$.在更新到第 $t+1$ 代时,粒子 i 速度和位置为

$$\begin{aligned} v_{i,D}(t+1) &= wv_{i,D}(t) + c_1r_1[p_{i,D}(t) - X_{i,D}(t)] + \\ &\quad c_2r_2[p_{g,D}(t) - X_{i,D}(t)] \end{aligned} \quad (34)$$

$$X_{i,D}(t+1) = X_{i,D}(t) + v_{i,D}(t+1) \quad (35)$$

式中, w 为非负惯性权重, c_1 、 c_2 为学习因子, r_1 、 r_2 为区间 $[0, 1]$ 之间的2个随机数, $p_{i,D}(t)$ 表示当前粒子 i 的历史最优位置, $p_{g,D}(t)$ 表示当前代种群的全局历史最优位置.

为防止粒子在算法进化的过程中越过最大搜索边界,需要规定粒子速度与位置的取值范

围,并在进化的过程中进行边界吸收.同时为了提高算法性能,避免陷入局部最优,采用一种非线性惯性权重和异步线性变化的学习因子^[13],权重计算公式为

$$w_t = w_{\min} + (w_{\max} - w_{\min})e^{-(t/T)^2} \quad (36)$$

式中, w_{\min} 为惯性权重 w 的最小值, w_{\max} 为惯性权重 w 的最大值, t 为当前进化次数, T 为最大进化次数.学习因子 c_1 、 c_2 计算公式为

$$\left. \begin{aligned} c_{1t} &= c_{1\max} + (c_{1\min} - c_{1\max})t/T \\ c_{2t} &= c_{2\min} + (c_{2\max} - c_{2\min})t/T \end{aligned} \right\} \quad (37)$$

式中, $c_{1\max}$ 、 $c_{2\max}$ 分别为学习因子 c_1 、 c_2 的最大值, $c_{1\min}$ 、 $c_{2\min}$ 分别为学习因子 c_1 、 c_2 的最小值.

3.2 航迹规划步骤

无人机航迹规划步骤如下.

Step 1 根据任务需求生成欺骗干扰的虚假航迹 $\{(x_p, y_p, z_p)\}_0^{T_3}$.

Step 2 综合考虑无人机能耗、生存概率以及通信信道传输损耗构建航迹评价函数模型 Y .

Step 3 选取比值系数 η 作为 PSO 的粒子,在虚假航迹已经明确的前提下,根据比值系数即可求解出无人机的飞行高度、飞行速度以及空间坐标,进而代入模型计算 Y .

Step 4 给定 PSO 的初始种群 X 、初始速度 V ,并根据式(36)和式(37)优化惯性权重和学习因子.

Step 5 根据式(33)计算粒子适应度 Y_{\min} ,获取粒子个体极值、群体极值;而后根据式(34)和式(35)更新粒子的进化速度和位置,并进行边界吸收处理,使单个粒子的位置符合给定的无人机飞行速度与假目标速度比值范围.

Step 6 判断是否达到最大进化次数.若是,输出最优适应度值和所对应的粒子位置(比值系数) $\eta_i (i=1, 2, \dots, D)$;若否,返回 Step 3.

Step 7 将粒子群算法输出的 $\eta_i (i=1, 2, \dots, D)$ 代入式(13),即可得到最终的无人机航迹规划结果.

4 仿真实验

4.1 航迹可实现性验证

设定假目标航迹^[14]为

$$\left. \begin{aligned} x_p &= 80\,000 + 300T_3 \\ y_p &= 1000 \sin(0.01\pi(T_3 + 1)) + 20\,000 \\ z_p &= 8000 + 10T_3 \end{aligned} \right\} \quad (38)$$

式中, T_3 为实施航迹欺骗干扰的时间,取值为 $0 \sim s$

至 100 s, 间隔 1 s 为一个航迹点, 由式(6)和式(7)可计算得到 $v_p \approx 300$ m/s.

由式(11)和式(14)分别计算该航迹的转弯率以及爬升角, 得到的结果如图3、图4所示. 通过计算得到, 假目标航迹最大转弯率为 $0.188\ 375^\circ/\text{s}$ 、最大爬升角为 $1.909\ 15^\circ$, 当所用无人机的性能满足此结果时, 只要飞行速度在约束范围内, 规划出的无人机航迹便符合动力学约束条件.

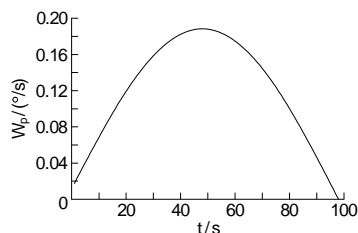


图3 假目标航迹转弯率

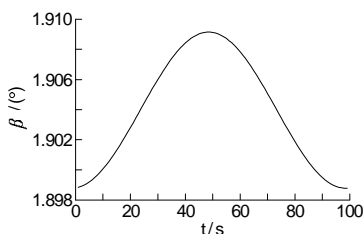


图4 假目标爬升角

4.2 仿真参数设置

1) 粒子群算法参数设置: 种群个数 N 为 1000, 进化代数 T 为 100, 粒子速度 V 取值范围为 $[-0.1, 0.1]$, 粒子位置 X 取值范围为 $[0.05, 0.2]$, 惯性权重 ω 取值范围为 $[0.4, 0.9]$, 学习因子 c_1 、 c_2 取值范围为 $[1, 2]$; 无人机架数为 3. 由式(10)可知, 当无人机速度限制在一定范围内, 可得到 $\eta = r/R$ 的取值范围, 即种群临界值. 假设无人机的飞行速度取值为 $[15, 60]$ m/s.

2) 干扰无人机性能参数设置^[8]: 无人机重量 $mg=30$ N, 能量转化率 $\gamma=0.5$, 叶片角速度 $\Omega=300$ rad/s, 旋翼个数 $b=4$, 功率的增量修正系数 K 为 0.1, 剖面阻力系数 δ 为 0.012, 无人机通信

信号带宽 B_l 为 10^6 Hz, 无人机通信信号频率 f 为 400 MHz, 通信信号发射功率 P_l 为 5 W, 散射截面积 σ 为 0.5 m², 叶片角速率 $U_{\text{tip}}=120$ m/s, 转子稳定性 $s=0.05$, 旋翼旋转面积 $A=0.5$ m², 机身阻力比 $d=0.6$, 悬停时旋翼平均诱导速度 $v_0=(mg/(2\rho A))^{1/2}$.

3) 雷达性能参数设置: 3 部雷达发射峰值功率分别为 5×10^5 、 10^5 、 10^6 W, 收发天线增益分别为 30、15、20 dB, 发射信号的波长分别为 0.3、0.2、0.1 m, 接收机噪声系数 F 均为 2 dB, 接收机带宽 B 均为 10^6 Hz, 虚警概率 P_{fa} 均为 10^{-6} .

4) 环境参数设置: 空气密度 ρ 为 1.225 kg/m³, 玻尔兹曼常数 k_b 为 1.38×10^{-23} J/K, 热力学温度 T_0 为 290 K.

4.3 仿真结果

为验证本文所建立的评价函数有效性, 分别基于 3 种评价函数进行航迹规划. 这 3 个评价函数分别是仅考虑能耗指标因素的 f_1 、考虑能耗和战场生存概率 2 个指标因素的 f_2 和本文所建评价函数 f_3 .

场景设置: 已知 3 部雷达的位置坐标为 $(0, 0, 0)$ 、 $(50, 10, 0)$ 、 $(30, 50, 0)$ km, 由 3 架干扰无人机分别对其进行航迹欺骗干扰, 为了尽量减少无人机悬停能耗, 设无人机投放点坐标为 3 架干扰无人机开始实施干扰时的航迹点坐标平均值. 结合 PSO 算法, 基于 3 种评价函数所规划出的航迹参数 η_i ($i=1, 2, 3$) 如表 1 所示.

表 1 3 种评价函数所规划出的航迹参数

评价函数类型	η_1	η_2	η_3
f_1	0.0670	0.0500	0.0500
f_2	0.1334	0.1275	0.1096
f_3	0.1469	0.1402	0.1198

3 组干扰无人机实施航迹欺骗干扰阶段的航迹与假目标航迹位置如图 5 所示.

基于 3 种评价函数得到的各组航迹所对应的无人机能耗、战场生存概率以及通信信道传输损

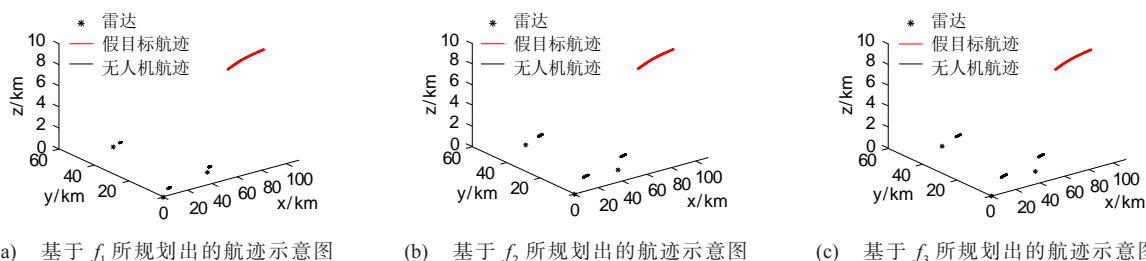


图5 基于 3 种评价函数的干扰无人机与假目标航迹位置

耗 3 个指标因素真实值如表 2 所示. 被雷达发现的概率以及通信信道传输损耗的变化情况分别如图 6、图 7 所示.

基于 3 种评价函数规划出的无人机集群航

迹位置关系俯视图如图 8 所示.

由图 6—图 8 可以看出, 随着比值系数 η 增大, 无人机飞行高度和飞行速度增加, 与雷达之间的距离变远, 导致无人机之间的距离减少, 所以 f_1

所规划出的航迹虽然耗能少,但被敌方雷达发现的概率和通信信道传输损耗较高;而 f_2 中加入战场生存概率指标后,被敌方雷达发现概率有所降低. 本文在此基础上加入通信信道传输损耗因素建立了 f_3 , 虽然规划出的航迹能耗指标有所提高,但被雷达发现概率和传输损耗均达到最佳,为实施航迹欺骗干扰提供了前提条件和可靠保证.

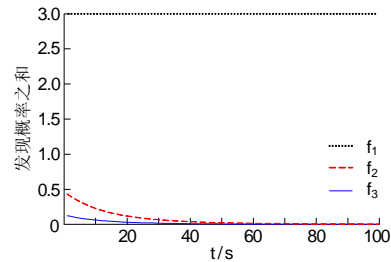


图6 发现概率变化曲线

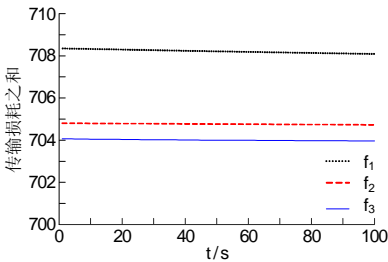


图7 传输损耗变化曲线

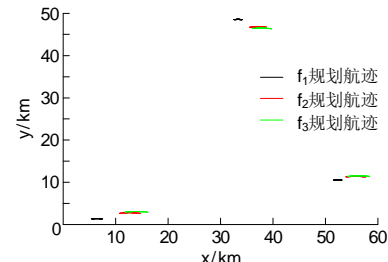


图8 航迹位置关系俯视图

5 结束语

针对无人机航迹规划算法中评价函数简单而导致所规划的航迹存在性能短板的现象,本文在相似飞行前提下,首先将无人机性能参数满足一定条件时的航迹可实现性问题简化为速度约束问题;然后针对无人机能耗、战场生存概率以及通信信道传输损耗3个指标因素,分析建立了评价函数;最后利用粒子群算法完成航迹寻优. 仿真结果表明,本文所建立的评价函数更具有全面性,所规划出的航迹同时兼顾了安全性和任务完成能力.

参考文献:

[1] 柏鹏,王玉冰,梁晓龙,等.无人机对雷达组网航迹欺骗综述[J].航空学报,2020,41(10):6-21.
[2] FAN Zhe,GAO Xiaojing,JIN Yi,etal.Research on route planning of group UAV cooperation for deception jamming to radar network[C]//Proceedings of the 4th Information Technology,Networking,Electronic and Automation Control Conference(ITNEC).Chongqing,China,2020:1966-1969.
[3] 李小波,孙琳,周青松,等.多机协同的组网雷达欺骗干扰航迹优化[J].现代防御技术,2016,44(6):43-49.
[4] 孙琳,李小波,毛云祥,等.基于多机协同的组网雷达欺骗干扰策略[J].电子信息对抗技术,2016,31(3):51-54.

表2 各航迹对应指标因素真实值

评价函数类型	E	P_d	L
f_1	2.693×10^7	1.000 0	$7.082 1 \times 10^4$
		1.000 0	
		0.150 9	
f_2	3.549×10^7	0.192 9	$7.047 7 \times 10^4$
		0.001 0	
		0.042 0	
f_3	3.893×10^7	0.056 7	$7.040 1 \times 10^4$
		0.000 3	
		0.000 3	

[5] 马露露.无人机集群视角下对组网雷达的航迹欺骗干扰研究[D].桂林:桂林电子科技大学,2022:16-33.
[6] 徐亚伦.联合无人机避障和能耗最低条件下的轨迹优化及其3D扩展[D].南昌:南昌大学,2022:17-22,48-50.
[7] 刘泽原,赵文栋,李艾静,等.基于信息共享的低能耗多无人机协同侦察方法[J].计算机仿真,2022,39(12):38-43.
[8] ZENG Yong,XU Jie,ZHANG Rui.Energy minimization for wireless communication with rotary-wing UAV[J].IEEE Transactions on Wireless Communications,2019,18(4): 2329-2345.
[9] ZHOU Zhuayang,MA Zimo,ZHAO Mingyue,et al.E-Cube: energy-efficient UAV trajectory scheduling with height and speed optimization[C]//Proceedings of 2021 International Conference on Space-Air-Ground Computing (SA-GC).Huizhou,China,2021:12-17.
[10] 张石磊.基于路径规划的旋翼无人机能耗优化研究[D].昆明:云南大学,2022:16-21.
[11] 徐仪华,周生奎,朱秋明,等.基于飞行轨迹的无人机通信信道仿真[J].电讯技术,2013,53(5):656-660.
[12] 叶魏涛,张蔚.基于雷达威胁的路径距离最小航路规划算法[J].火力与指挥控制,2022,47(1):121-124.
[13] 屈力刚,蒋帅,杨野光,等.基于改进粒子群算法的线缆路径规划方法研究[J].机床与液压,2023,51(15):173-177.
[14] 郭淑芬,余国文,熊鑫,等.基于无人机协同的航迹欺骗干扰方法研究[J].空军预警学院学报,2018,32(1):44-47.

(下转第56页)

- 标跟踪[J].自动化学报,2011,37(12):1483-1494.
- [13] ZHAN Xinrui,LIU Yueran,ZHU Jianke,et al.Homography decomposition networks for planar object tracking[C]//Proceedings of AAAI Conference on Artificial Intelligence. AAAI,2022:3234-3242.
- [14] LI Yang,ZHU Jianke,HOI S C H.Reliable patch trackers: robust visual tracking by exploiting reliable patches[C]//Proceedings of IEEE Computer Vision and Pattern Recognition.IEEE,2015:353-361.
- [15] KIERITZ H,BECKER S,HÜBNER W,et al.Online multi-person tracking using integral channel features[C]//2016 13th IEEE International Conference On AVSS.IEEE,2016: 122-130.
- [16] LIU Ting,WANG Gang,YANG Qingxiong.Real-time part-based visual tracking via adaptive correlation filters[C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition.IEEE,2015:4902-4912.
- [17] 王法胜,鲁明羽,赵清杰,等.粒子滤波算法[J].计算机学报,2014,37(8):1679-1694.
- [18] ZHANG Kaihua,ZHANG Lei,YANG M H.Real-time compressive tracking[C]//Proceedings of European Conference on Computer Vision (Vol. 7574).Springer,2012:864-877.
- [19] ORON S,BAR-HILLEL A,LEVI D,et al.Locally orderless tracking[J].International Journal of Computer Vision,2015, 111(2):213-228.

Robust visual tracking algorithm based on peak characteristics to determine model updating

FAN Shunyi¹, NI Lei², LIU Binbin¹, PING Zongwei¹, JIA Hangchuan¹

(1.No.94028 Unit, the PLA, Xianyang 712000, China; 2.Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

Abstract: In order to solve the problem that the traditional model updating algorithm has poor robustness in the case of occlusion, illumination change and self-rotation in visual tracking, this paper proposes a robust visual tracking algorithm of using peak characteristics to selectively update the model. In this algorithm, the target position is first determined through particle filtering tracking, then the current model is used to conduct a local exhaustive search near the result location of the current frame tracking, and the detected peak distribution is also used to determine the numerical matrix of target confidence. Finally, the peak-to-sidelobe ratio threshold judgment method is employed to decide whether or not to update the current model. Simulation results show that the proposed algorithm can effectively update the target model, and that compared with the contrast algorithm, it can achieve a better tracking effect on the whole in dealing with the situation of usual occlusion, illumination change, self-rotation, etc. in visual tracking.

Key words: visual tracking; particle filter; peak characteristics; peak-to-sidelobe ratio; degree of confidence; robust optimization

~~~~~  
(上接第 49 页)

## Method of UAV track planning under the background of track deception jamming

JIANG Yubo<sup>1,2</sup>, WANG Guangxue<sup>1</sup>, HE Huan<sup>1</sup>, LENG Yi<sup>1</sup>

(1.Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China; 2.No.93656 Unit, the PLA, Beijing 101100, China)

**Abstract:** In order to improve the efficiency of UAV cluster implementing track deception jamming, a UAV track planning method based on track deception jamming background is proposed. First, the basic mathematical model of UAV cluster implementing track deception jamming on the netted radar is presented. On the premise that the UAV and the false target keep similar track at constant speed, the evaluation indexes of UAV energy consumption, battlefield survival probability and communication channel transmission loss are proposed, and the evaluation function model of UAV is established. Then, the evaluation function is used as the optimization model, the distance ratio coefficient solved by particle swarm optimization algorithm, and the final track planning result with the best comprehensive performance is obtained. The simulation results show that compared with the existing track planning methods, this paper establishes a more comprehensive evaluation function, which can be used to plan the track with a better balance between safety and mission accomplishment ability.

**Key words:** UAV cluster; track planning; netted radar; track deception jamming