

基于改进粒子群算法的目标航迹模拟及 RCS 仿真

马艳艳^{1,2}, 林 强¹

(1. 空军预警学院防空预警装备系, 武汉, 430019; 2. 93502 部队, 呼和浩特, 010051)

摘要 针对雷达运动目标轨迹模拟逼真度问题和 RCS 特征, 提出一种基于嵌入式粒子算法的目标航迹模拟和 RCS 仿真方法。首先, 分析了无人机模拟运动目标航迹的基本原理, 以及无人机和模拟目标之间的运动模型和耦合关系, 确定了耦合因子和控制量。然后, 分析了目标运动轨迹模拟的约束条件, 并结合无人机性能和能耗等因素给出了目标优化适应度函数, 建立了目标航迹模拟的最优控制模型。其次, 为提高模型解算的针对性和实用性, 将粒子群算法进行改进, 并嵌入到模型求解中, 实现了对目标航迹的有效模拟。最后, 基于模拟目标航迹, 利用飞行力学原理和坐标系转换计算得到模拟飞行目标的姿态角, 通过电磁计算软件仿真得到模拟飞行目标的 RCS。仿真结果表明, 该方法对实现运动目标轨迹模拟和 RCS 仿真具有广泛适用性。

关键词 无人机; 雷达目标; 运动轨迹; 粒子群算法; RCS 特性

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2024.04.009

中图分类号 TN955 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2024)04-0058-08

A Simulation of Target Tracking and RCS Based on Improved Particle Swarm Optimization Algorithm

MA Yanyan^{1,2}, LIN Qiang¹

(1. Air Defense Early Warning Equipment Department, Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China; 2. Unit 93502, Hohhot 010051, China)

Abstract In view of the fidelity issue of moving target tracking simulation and RCS characteristics, a target tracking and RCS simulation method is proposed based on the improved particle swarm algorithm (PSO). Firstly, the basic principle of simulating the tracking of moving targets is analyzed by unmanned aerial vehicles (UAV), the motion model and coupling relationship between UAVs and simulated targets are discussed, and the coupling factors and control quantities are determined. And then, the constraint conditions for simulating the target tracking are analyzed, and the target optimization fitness function is given in consideration of UAV performance and energy consumption, and an optimal control model is established for simulating the target tracking. To improve the accuracy and practicality of the model solution, the particle swarm optimization algorithm is improved and embedded in the model solution, achieving an effective simulation of the target tracking. Finally, based on the simulated target tracking, the angle of altitude in simulating flight target is calculated through flight dynamics principles and coordinate system transformation, and the RCS of the simulated flight target is simulated by the electromagnetic cal-

收稿日期: 2023-09-14

作者简介: 马艳艳(1991—), 女, 甘肃天水人, 博士生, 研究方向为预警装备性能评估与验证。E-mail: ma163email@163.com

通信作者: 林 强(1971—), 男, 福建浦城人, 教授, 博士生导师, 研究方向为预警装备运用。E-mail: linqiang_wuhan@163.com

引用格式: 马艳艳, 林强. 基于改进粒子群算法的目标航迹模拟及 RCS 仿真[J]. 空军工程大学学报, 2024, 25(4): 58-65. MA Yanyan, LIN Qiang. A Simulation of Target Tracking and RCS Based on Improved Particle Swarm Optimization Algorithm[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2024, 25(4): 58-65.

culation software. The simulation results show that this method is wide applicable for achieving tracking simulation of moving targets and RCS simulation.

Key words UAV; radar target; moving tracking; PSO; RCS characteristics

大量新理论、新技术在雷达设计的广泛应用,使得雷达技术得到快速充分发展,极大地提升了雷达的反应速度、工作效益、作战效能和生存能力等,进一步加快了雷达更新迭代的速度。同时,新型雷达的出现也给雷达调试和性能测试提出了新要求。当前,雷达性能检测主要通过飞机外场检飞为雷达提供测试信号来完成,不仅要投入大量人力、财力、物力,还需要考虑很多随机因素,如环境条件、天气等的影响,实施起来成本高、难度大^[1-2]。针对这一问题,通过使用无人机挂载相关设备,在近距离按照一定的模型模拟动态目标运动轨迹,并对接收到的雷达信号进行延时转发,能够在不具备飞机外场检飞的情况下,实现对雷达性能测试的需求。利用无人机模拟发射目标回波时,还需要考虑目标雷达散射截面(radar cross section, RCS),这直接关系到延时信号的转发功率。

文献[3]针对无人机产生雷达虚假目标问题建立了多机协同生成模拟目标航迹数学模型,并基于目标分解和叠加策略进行了求解。文献[4]提出一种基于目标运动特征分段合成的航迹模拟方法,分别对匀速直线、匀加速直线、匀速转弯和不规则航迹进行了模拟。文献[5]针对电子战飞机协同干扰组网雷达问题,建立了最优控制模型和协同干扰策略,进而形成虚拟目标航迹。文献[6]研究了飞行器和模拟假目标航迹的动态耦合关系,并建立了模拟目标的航迹控制模型。文献[7]针对无人机在假目标航迹模拟时的飞行任务优化问题,提出了基于群体智能算法的假目标航迹模拟方法。以上航迹模拟方法,都以航迹点是关联度小的离散点为背景,随机性大,且模拟内容多为目标速度、加速度等运动参数,缺少对角度和角速度的解算,模拟要素不完整,逼真度有限。文献[8]提出一种基于多无人机的目标模拟轨迹生成策略,并进行了空间姿态解算。文献[9]通过分析无人机运动模型,建立了无人机定高飞行模拟目标航迹模型,并利用蚁群算法求解无人机最优航迹。文献[10]建立了无人机在定高飞行模式下与假目标的运动模型,并将假目标航迹以方程的形式进行了规划。以上方法实现了无人机航迹飞行路径的优化求解,但对无人机和假目标的高度进行了限制,即只能在规定的高度飞行,灵活性和实用性有限。文献[11]基于空中目标的动态 RCS 特性,根据

目标的运动特征,利用电磁计算软件 FEKO 对典型空中目标的动态 RCS 进行了仿真。文献[12]通过对典型飞行状态下雷达照射姿态角的电磁计算和统计分析,得到了 4π 立体角内的动态目标 RCS,为雷达目标散射特性研究提供了技术支持。在此基础上,本文基于改进粒子群算法,建立了一种目标航迹模拟及 RCS 仿真方法。

1 目标航迹模拟控制模型

雷达、无人机和模拟目标的空间位置见图 1,相对雷达而言,无人机与模拟目标的方位角和俯仰角始终是相等的^[13],三者在空间三维直角坐标系中的位置坐标可以表示为 (x_i, y_i, z_i) ,其中 o、e、p 分别表示雷达、无人机、模拟目标。雷达与无人机之间的径向距离为 r_e ,与模拟目标之间的径向距离为 r_p , φ 和 θ 为无人机和模拟目标的方位角及俯仰角, v_e 和 v_p 分别为无人机和模拟目标飞行速度的大小, α_e 、 α_p 和 β_e 、 β_p 为航迹倾斜角和航迹偏转角。

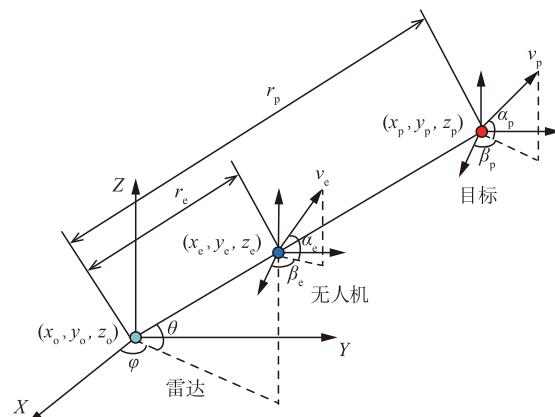


图 1 雷达、无人机和模拟目标动态关系

1.1 耦合因子

由图 1 看出,无人机位于雷达和模拟目标的连线上,因此方位角 φ 和俯仰角 θ 可以用模拟目标位置参数表示为:

$$\varphi = \arctan \frac{y_p - y_o}{x_p - x_o} \quad (1)$$

$$\theta = \arcsin \frac{z_p - z_o}{r_p} \quad (2)$$

对式(1)和式(2)分别求微分,得到方位角和俯仰角速度 $\dot{\varphi}$ 、 $\dot{\theta}$ 分别为:

$$\dot{\varphi} = \frac{(x_p - x_o) \dot{y}_p - (y_p - y_o) \dot{x}_p}{(x_p - x_o)^2 + (y_p - y_o)^2} \quad (3)$$

$$\dot{\theta} = \frac{\sqrt{(x_p - x_o)^2 + (y_p - y_o)^2} \dot{z}_p}{r_p^2} - \frac{(z_p - z_o) [(x_p - x_o) \dot{x}_p + (y_p - y_o) \dot{y}_p]}{r_p^2 \sqrt{(x_p - x_o)^2 + (y_p - y_o)^2}} \quad (4)$$

式中: φ 、 θ 、 $\dot{\varphi}$ 、 $\dot{\theta}$ 为连接无人机和模拟目标耦合关系的变量,即耦合因子。

1.2 运动模型

根据无人机和模拟目标的位置关系,无人机与模拟目标之间的运动模型可表示为:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = v_i \cos \alpha_i \cos \beta_i \\ \dot{y}_i = v_i \cos \alpha_i \sin \beta_i \\ \dot{z}_i = v_i \sin \alpha_i \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \dot{v}_i = u_{i1} \\ \dot{\alpha}_i = u_{i2} \\ \dot{\beta}_i = u_{i3} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $i = \begin{cases} e, \text{无人机} \\ p, \text{模拟目标} \end{cases}$; \dot{v}_i 为加速度; $\dot{\alpha}_i$ 、 $\dot{\beta}_i$ 分别为航迹倾斜角速度和航迹偏转角速度。

将无人机和模拟目标的坐标由直角坐标转换到球坐标,则有:

$$\begin{cases} x_i = r_i \cos \theta \cos \varphi \\ y_i = r_i \cos \theta \sin \varphi \\ z_i = r_i \sin \theta \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)可得到无人机与模拟目标在球坐标系下的运动模型:

$$\begin{bmatrix} \dot{r}_i \\ r_i \dot{\varphi} \cos \theta \\ r_i \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \varphi \cos \theta \sin \varphi \sin \theta \\ -\sin \varphi \cos \varphi 0 \\ -\sin \theta \cos \varphi -\sin \theta \sin \varphi \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \\ \dot{z}_i \end{bmatrix} \quad (8)$$

将式(5)代入式(8)整理可得:

$$\dot{r}_i = v_i (\cos \theta \cos \alpha_i \cos(\beta_i - \varphi) + \sin \theta \sin \alpha_i) \quad (9)$$

$$\dot{\varphi} = \frac{v_i \cos \alpha_i \sin(\beta_i - \varphi)}{r_i \cos \theta} \quad (10)$$

$$\dot{\theta} = \frac{v_i}{r_i} (-\sin \theta \cos \alpha_i \cos(\beta_i - \varphi) + \cos \theta \sin \alpha_i) \quad (11)$$

由式(10)和式(11)可以推导出航迹倾斜角的表达式为:

$$\tan \alpha_i = \frac{\dot{\varphi} \sin \theta \cos \theta \cos(\beta_i - \varphi) + \dot{\theta} \sin(\beta_i - \varphi)}{\dot{\varphi} \cos^2 \theta} \quad (12)$$

将式(12)和式(10)代入式(9)可得:

$$\dot{r}_i = A_i r_i \quad (13)$$

$$\text{式中: } A_i = \dot{\varphi} \left(\frac{\cos^2 \theta}{\tan(\beta_i - \varphi)} + \frac{\tan \alpha_i \sin \theta \cos \theta}{\sin(\beta_i - \varphi)} \right)。$$

由式(10)~式(13)可推导出无人机和模拟目标的飞行速度为:

$$v_i = r_i \sqrt{A_i^2 + \dot{\varphi}^2 \cos^2 \theta + \dot{\theta}^2} \quad (14)$$

1.3 控制量

通过上述分析可知,在目标航迹模拟过程中,无人机与模拟目标的各参数之间并非独立,而是存在一定制约关系。观察式(9)~式(14)可以看出,上述参数都可以通过偏转角 β_i 表示,即通过控制 β_e 和 β_p 可以分别控制无人机和模拟目标的其他运动参数。而无人机与模拟目标之间的位置关系除耦合因子以外,还有它们与雷达径向距离之间的关系,可以假设无人机和模拟目标与雷达的径向距离 r_e 、 r_p 满足以下比例关系:

$$r_e = r_p \sigma \quad (15)$$

式中: $0 < \sigma \leq 1$ 。

综上所述,无人机在模拟目标轨迹时,受到 β_e 、 β_p 和 σ 的制约,将这 3 个参数称为控制量。在模拟目标航迹给定的条件下,无人机和模拟目标的位置及运动参数都可以通过这 3 个参数表达出来。因此,目标轨迹的模拟过程可以视为通过确定 β_e 、 β_p 和 σ 进而求解其他运动参数的过程,而 β_e 、 β_p 和 σ 的确定可以转化为多维优化问题,可通过智能优化算法进行求解。本文采用针对目标航迹模拟问题改进的嵌入式粒子群算法进行求解。

2 求解模型

无人机模拟目标航迹的关键任务就是求解第 1 节提出的目标运动轨迹控制模型,本文提出嵌入式粒子群算法对其进行求解。求解时应当使无人机在航迹模拟过程中既满足模型的约束条件,又能使适应度函数值最小,此时得到的解即为最优解,也是无人机飞行的最优运动参数。

2.1 约束条件

在目标航迹模拟过程中,无人机和模拟目标的飞行速度、加速度和角速度应当满足相应的限制条件:

$$\begin{cases} v_{i\min} \leq v_i \leq v_{i\max} \\ u_{1\min} \leq u_1 \leq u_{1\max} \\ u_{2\min} \leq u_2 \leq u_{2\max} \end{cases} \quad (16)$$

同时,在实际模拟时,为兼顾成本和模拟效果,

无人机与雷达、模拟目标之间的距离也应有合理的取值范围,即 σ 的取值应在一定范围内:

$$\sigma_{\min} \leq \sigma < \sigma_{\max} \quad (17)$$

2.2 适应度函数

通过上述分析可知,无人机模拟目标航迹的关键在于寻找产生目标模拟航迹的控制量 β_e 、 β_p 和 σ ,也就是在已有运动模型和约束条件下求解最优解问题。根据无人机飞行实际情况,适应度函数的建立应考虑以下因素:

1) 无人机在飞行过程中补能不便,因此应使其能耗相对较小,可表示为:

$$f_1 = v_e^2 \quad (18)$$

2) 为保持无人机正常工作,飞行中应当相对平稳,即角度变化率应当尽可能小,表示为:

$$f_2 = u_{\dot{\varphi}}^2 \quad (19)$$

3) 无人机从当前位置飞到下一位置的路径应尽可能短,表示为:

$$f_3 = (\dot{r}_e \cos \theta \cos \varphi - r_e \dot{\theta} \sin \theta \cos \varphi - r_e \dot{\varphi} \cos \theta \sin \varphi)^2 + (\dot{r}_e \cos \theta \sin \varphi - r_e \dot{\theta} \sin \theta \sin \varphi + r_e \dot{\varphi} \cos \theta \cos \varphi)^2 + (\dot{r}_e \sin \theta + r_e \dot{\theta} \cos \theta)^2 \quad (20)$$

最终的适应度函数为:

$$F = l_1 f_1 + l_2 f_2 + l_3 f_3 \quad (21)$$

式中: l_1 、 l_2 、 l_3 为加权系数,且 $l_1 + l_2 + l_3 = 1$,即各因素对无人机的影响程度,可根据无人机的性能有倾向性地确定加权系数的大小。

综上所述,无人机模拟目标航迹问题可以简化为函数优化问题: $\min F(\beta_e, \beta_p, \sigma)$ 。

3 改进粒子群算法

粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 是一种基于种群智能的优化算法,通过粒子个体之间的竞争与协作实现从局部到全局的迭代搜索,适用于复杂优化问题的最优值求解问题,其特点是求解精度高且易于实现,广泛应用于函数优化、神经网络训练、多目标优化等领域^[14-19]。

在算法优化过程中,为防止粒子跳出搜索范围,需要对粒子位置和速度进行限制^[20],即 $[X_{\max}, X_{\min}]$ 、 $[V_{\max}, V_{\min}]$ 。从 1.3 节的分析可知,目标航迹模拟的解空间为 $X = (\beta_e, \beta_p, \sigma)$ 。其中, σ 的取值范围已通过式(17)进行了限定, β_e 和 β_p 的取值范围理论上是 $[0, 2\pi]$,但观察式(13)、式(15)和式(6)可以看出, α_i 、 v_i 和 u 是以 β_i 为因变量的,这些参数的取值范围通过式(17)得到限定,因此,以因

变量 β_i 的理论取值范围内的值求得的上述参数很可能超出式(17)所给出的范围,即 β_i 的取值范围是隐形的,需要根据 β_i 的取值求解到的 α_i 、 v_i 和 u 判断其取值是否合理。针对这一问题,本文对粒子群算法进行了改进,在求解过程中,将 β_i 的取值用其求解出来的 α_i 、 v_i 和 u 进行筛选,得到的参数符合取值范围时,保留 β_i 的取值,否则将其剔除并重新取值,直到算法迭代结束。具体求解步骤如下:

Step 1 设定雷达所在位置,并根据任务计划设定模拟目标的飞行航迹。

Step 2 根据设定的雷达位置和模拟目标飞行航迹,解算式(1)~式(4),得到耦合因子 φ 、 θ 、 $\dot{\varphi}$ 、 $\dot{\theta}$ 的表达式。

Step 3 将耦合因子代入式(12)~式(14),得到无人机和模拟目标的飞行速度 v_i 及航迹倾斜角 α_i 的表达式。

Step 4 对式(12)和式(14)求微分,得到无人机和模拟目标的加速度 \dot{v}_i 及航迹倾斜角速度 $\dot{\alpha}_i$ 的表达式。

Step 5 将目标在航迹中的位置信息代入耦合因子表达式得到耦合因子的实际取值。

Step 6 初始化粒子位置 $X = (\beta_e, \beta_p, \sigma)$ 。

Step 7 将粒子当前位置和 Step 5 求得的耦合因子的值代入 Step 3 和 Step 4 得到的参数表达式,得到无人机和模拟目标的速度 v_i 、倾斜角 α_i 、加速度 \dot{v}_i 以及倾斜角速度 $\dot{\alpha}_i$ 的值。

Step 8 根据式(16)判断速度 v_i 、倾斜角 α_i 、加速度 \dot{v}_i 以及高低角速度 $\dot{\alpha}_i$ 是否满足约束条件,若是则转到 Step 9,否则返回 Step 6。

Step 9 根据适应度函数计算粒子的适应度值;保存粒子的当前位置为个体最优位置,保存全局最优适应度值和全局最优位置。

Step 10 更新粒子速度和位置,产生新一代种群,将得到的粒子位置返回到 Step 7。

Step 11 比较当前适应度值与个体最优适应度值,若当前适应度值优于个体最优适应度值,则更新个体最优位置为当前粒子位置;比较粒子个体最优适应度值与全局最优适应度值,若当前粒子个体最优适应度值优于全局最优适应度值,则更新全局最优位置。

Step 12 迭代次数 $k = k + 1$,判断是否满足终止条件,若满足则停止迭代,输出最优解;否则转至 Step 6 直至满足终止条件。

Step 13 模拟目标进入下个航迹点,转至 Step

5, 重复上述流程, 直至目标航迹模拟结束。

4 目标动态 RCS 建模

目标 RCS 起伏本质上是由姿态角的实时变化引起的, 在不同姿态角下的 RCS 有很大差异^[21-22]。利用坐标系变换可将目标在雷达坐标系下的角度信息转换为机体坐标系下的目标姿态角。

4.1 坐标系变换

求解目标的姿态角需要将雷达的位置坐标从雷达坐标系转换到机体坐标系。雷达坐标系 $O-XYZ$ 和机体坐标系 $O-X_pY_pZ_p$ 见图 2。其中, 以雷达位置作为雷达坐标系的原点, OX 向正东方向, OY 向正北方向, OZ 垂直于 OXY 平面向上; 机体坐标系以飞行目标质心为原点, OX_p 在对称平面指向目标正前方, OZ_p 在对称平面内垂直于 OX_p 向上, OY_p 按右手规则确定。在雷达坐标系转换为机体坐标系时还需要用到航迹坐标系 $O-X_kY_kZ_k$, 原点位于目标质心, OX_k 指向速度方向, OZ_k 在 OX_k 所在的铅垂面内垂直于 OX_k 指向上方, OY_k 按右手规则确定。目标姿态角为雷达照射方向在机体坐标系下的方位角和俯仰角^[12]。

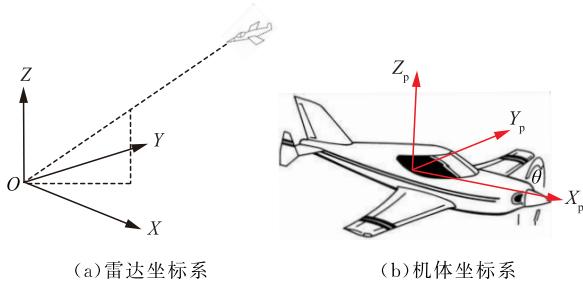


图 2 雷达坐标系和机体坐标系示意图

除航迹模拟过程中解算得到的航迹倾斜角 α_p 和航迹偏转角 β_p 外, 在分析目标的飞行姿态时, 还需要用到以下角度: 速度滚转角 η , 即包含速度矢量的铅垂面与飞机对称平面的夹角; 侧滑角 ψ , 即飞行速度与飞机对称平面的夹角; 迎角 γ , 即飞行速度在飞机对称平面的投影与 OX_p 的夹角。由坐标系变换原理可知, 任意 2 个坐标系的变换都可以通过不同基元变换组合实现^[12, 23-24], 各个坐标系相互关系及基元变换组合见图 3。



图 3 坐标系变换关系示意图

因此, 从雷达坐标系到机体坐标系的变换矩阵

B_p 为:

$$B_p = R_Y(\gamma)R_Z(\phi)R_X(\eta)R_Y(\alpha_p)R_Z(\beta_p) \quad (22)$$

式中:

$$\begin{aligned} R_Z(\beta_p) &= \begin{bmatrix} \cos \beta_p & \sin \beta_p & 0 \\ -\sin \beta_p & \cos \beta_p & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \\ R_Y(\alpha_p) &= \begin{bmatrix} \cos \alpha_p & 0 & -\sin \alpha_p \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha_p & 0 & \cos \alpha_p \end{bmatrix}; \\ R_X(\eta) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \eta & \sin \eta \\ 0 & -\sin \eta & \cos \eta \end{bmatrix}; \\ R_Z(\psi) &= \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \\ R_Y(\gamma) &= \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

4.2 姿态角解算

航迹倾斜角 α_p 和航迹偏转角 β_p 在第 3 节中通过算法算出, 速度滚转角 η 、侧滑角 ψ 、迎角 γ 的求解需要用到飞行动力学原理。假设目标飞行方向始终位于飞机对称平面, 即 $\psi \equiv 0$, 则航迹坐标系下目标质心的运动方程为^[25]:

$$\begin{cases} \dot{m}v_p = T - D + mg \sin \alpha_p \\ mv_p \cos \alpha_p \dot{\beta}_p = -L \sin \eta \\ -mv_p \dot{\alpha}_p = L \cos \eta - mg \cos \alpha_p \end{cases} \quad (23)$$

式中: m 为目标质量; g 为重力加速度; T 为发动机推力; L 和 D 分别为升力和阻力。由式(23)可得:

$$\eta = \arctan \frac{v_p \cos \alpha_p \dot{\beta}_p}{v_p \dot{\alpha}_p - g \cos \alpha_p} \quad (24)$$

$$L = \frac{mg \cos \alpha_p - mv_p \dot{\alpha}_p}{\cos \eta} \quad (25)$$

则机翼面积为 S 的飞行目标在大气密度为 ρ 时, 升力系数 C_L 为:

$$C_L = \frac{2L}{\rho v_p^2 S} \quad (26)$$

在升力系数 C_L 已知的条件下, 迎角 γ 可以通过查升力系数曲线得到。

雷达照射方向在机体坐标系上的姿态角如图 4 所示, 雷达照射方向方位角 $\varphi_p \in [0, 2\pi]$, 即雷达照射方向在 OX_pY_p 平面上的投影与 OX_p 的夹角; 雷达照射方向俯仰角 $\theta_p \in [0, \pi]$, 即雷达照射方向与 OZ_p 的夹角。

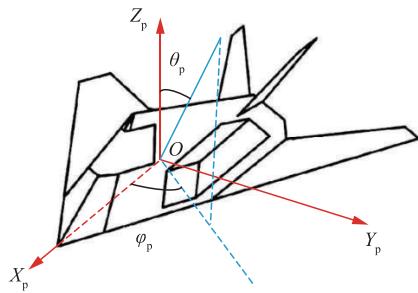


图4 目标姿态角

设目标在雷达坐标系的位置坐标为 $(X(t), Y(t), Z(t))$, 则任意一点 (X, Y, Z) 从雷达坐标系到机体坐标系的坐标为:

$$\begin{bmatrix} X_p(t) \\ Y_p(t) \\ Z_p(t) \end{bmatrix} = \mathbf{B}_p \begin{bmatrix} X - X(t) \\ Y - Y(t) \\ Z - Z(t) \end{bmatrix} \quad (27)$$

将雷达位置坐标 $(0, 0, 0)$ 代入式(27), 得到雷达在机体坐标系的位置坐标 $(X_p^0(t), Y_p^0(t), Z_p^0(t))$, 由图5所示雷达照射方向与飞机的几何关系可得:

$$\varphi_p(t) = \arctan \frac{Y_p^0(t)}{X_p^0(t)} \quad (28)$$

$$\theta_p(t) = \arccos \frac{Z_p^0(t)}{\sqrt{(X_p^0(t))^2 + (Y_p^0(t))^2 + (Z_p^0(t))^2}} \quad (29)$$

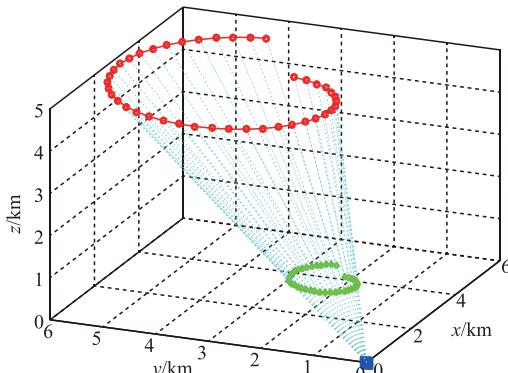


图5 无人机模拟目标航迹效果图

5 模拟仿真

5.1 航迹模拟

设定雷达位置为坐标原点, 无人机模拟环形航迹飞行的目标, 约束条件见表1。目标起始位置为 $(3000, 4000, 5000)$, 航迹持续时间40 s, 模拟目标航迹为:

$$\begin{cases} x_p = 2000\cos(0.15t) + 3000 \\ y_p = 2000\sin(0.15t) + 4000 \\ z_p = 5000 - 20t \end{cases} \quad (30)$$

表1 约束条件

约束	$v_e/(m/s)$	$v_p/(m/s)$	$u_1/(m/s^2)$	$u_2/(rad/s)$	σ
最大值	100	400	30	0.4	0.50
最小值	10	200	-30	-0.4	0.25

得到的无人机飞行轨迹和模拟目标运动航迹见图6。无人机和模拟目标的速度及加速度变化见图7。目标方位角、俯仰角及角速度的变化见图8。航迹倾斜角和角速度变化见图9。

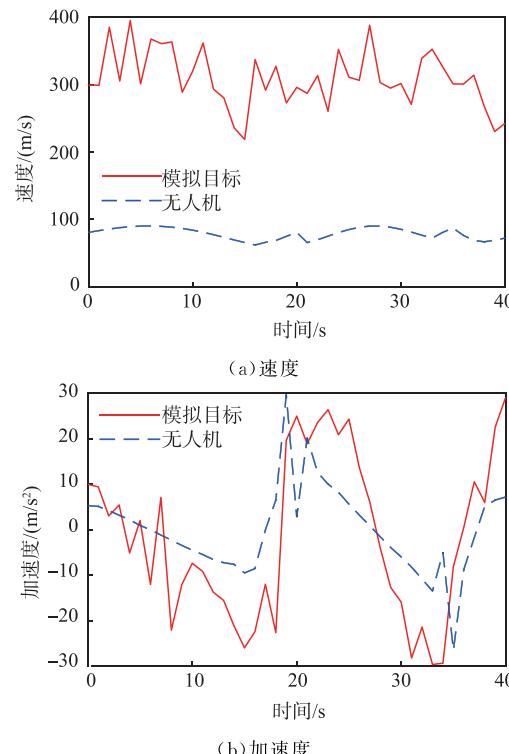


图6 速度和加速度变化

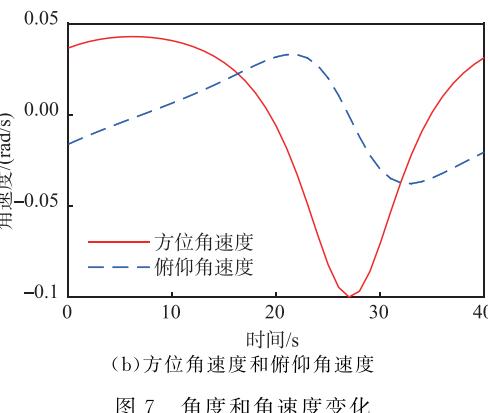
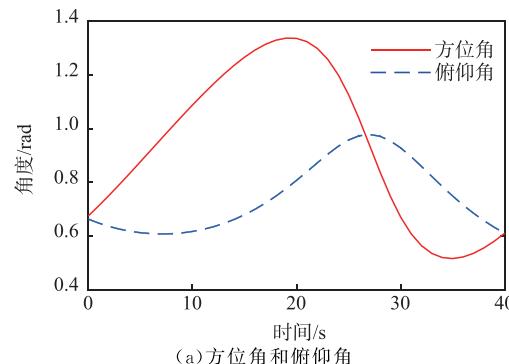


图7 角度和角速度变化

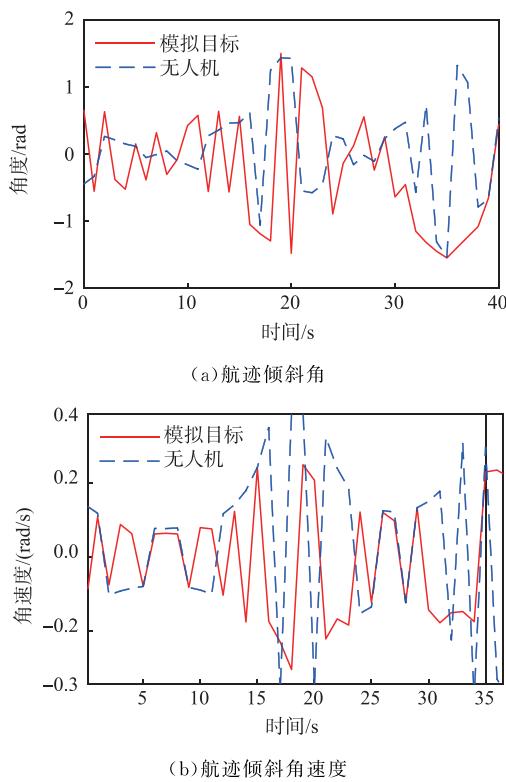


图 8 倾斜角和倾斜角速度变化

从图 6 可以看出,无人机处于雷达和模拟目标的连线上,其运动轨迹形态与模拟目标的航迹相似,离雷达距离是模拟目标到雷达距离的 σ 倍,相当于通过近距离的无人机实现对远距离模拟目标的“映射”,并且这种“映射”是与时间相关的,任意时刻的模拟目标位置都有与之实时对应的无人机位置。同时,采用嵌入式粒子群算法对模型进行求解,得到的无人机运动轨迹较为平滑,没有出现跳跃的情况,因此对无人机的性能和能耗要求不高。由此可见,通过对无人机和模拟目标运动模型的分析和建模,能够实现动态雷达目标航迹的模拟。

表 2 为速度、加速度以及角速度的最大值和最小值。从表 2 可以看出,参数的变化范围均在给出的约束范围以内,表明用无人机模拟的目标航迹具有真实的运动特征,可用于雷达探测性能的测试。

表 2 参数最大值和最小值

参数	最大值	最小值
$v_p/(m/s)$	394.679 7	218.487 0
$v_e/(m/s)$	90.180 3	62.058 7
$\dot{v}_p/(m/s^2)$	29.117 6	-29.668 8
$\dot{v}_e/(m/s^2)$	29.723 0	-26.565 3
$\dot{\alpha}_p/(rad/s)$	0.250 1	-0.303 4
$\dot{\alpha}_e/(rad/s)$	0.395 5	-0.381 5

5.2 RCS 仿真

在电磁计算软件 FEKO 输入目标参数及机体

坐标系下的姿态角,经软件电磁计算模块计算即可输出目标在设定航迹下的实时 RCS 数据。本文以某型战机为例,飞机全长 20 m,高 3.8 m,翼展 13 m。将该机已建立并网格剖分好的 3D 网格模型导入到 FEKO 软件,采用 MLFMM 方法,在软件中设置工作频率为 3 GHz,输入姿态角即可解算 RCS 值。图 9 为 RCS 仿真结果。表 3 为电磁仿真得到的主极化通道 RCS 数据统计参数。

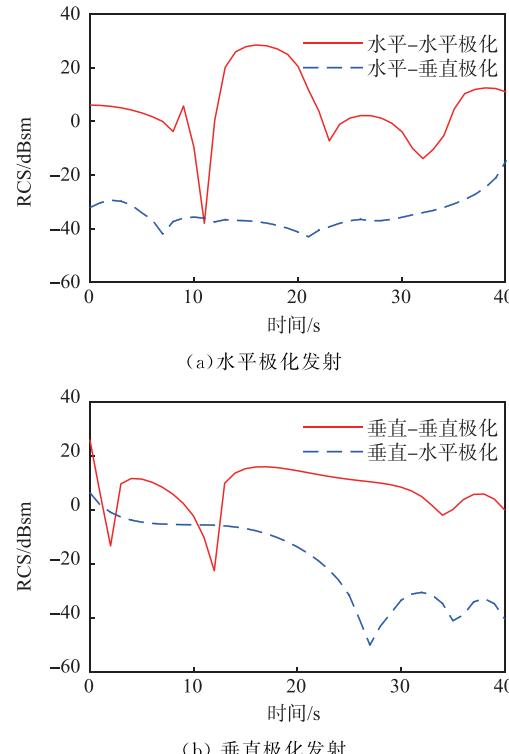


图 9 RCS 特性仿真结果

表 3 主极化通道 RCS 统计参数 dBsm

极化方式	最大值	最小值	均值	中值	标准差
水平-水平极化	28.530 3	-37.938 9	5.455 0	4.286 1	13.359 5
垂直-垂直极化	26.111 4	-22.564 0	7.374 1	13.024 7	8.692 5

从图 9 可以看出,模拟飞行目标的 RCS 随航迹和姿态角的变化而起伏。仿真结果与 RCS 特性理论基本一致,验证了该方法的有效性。

6 结语

针对无人机模拟目标航迹逼真性问题,以及在此基础上的 RCS 特性仿真,本文提出了基于改进粒子群算法的目标航迹模拟方法,通过分析运动无人机和模拟目标的运动特征建立了运动模型,并根据模型特点,对粒子群算法进行了针对性改进,将算法嵌入到模型求解过程中,实现了算法互补与过程模拟,利用坐标系变换飞行动力学原理,基于模拟航迹对目标 RCS 特性进行了分析。仿真结果表明,该方

法在利用无人机模拟目标航迹时,能够实现对模拟目标飞行速度、角度、角速度以及飞行路线的全要素模拟,具有较高逼真性和实用性,且 RCS 的仿真也能够很好体现出目标的散射特性。

参考文献

- [1] NAM J H, KOH I S, PARK S H, et al. Target Detection and Tracking Simulation of Air Defense Radar in High-Density Clutter Environments Using a Real-Time Simulator[J]. The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, 2020, 31(8):738-745.
- [2] 吴鹏. 基于 DRFM 技术的雷达飞行目标模拟及评估方法研究[D]. 成都:电子科技大学, 2022.
- [3] 郭中会, 李松松, 张宸宸, 等. 多机协同对组网雷达欺骗干扰的航迹优化[J]. 电子信息对抗技术, 2020, 35(1):46-50, 59.
- [4] 王军, 刘冬利. 一种基于目标运动特性的航迹模拟方法[J]. 电声技术, 2021, 45(5):66-69.
- [5] 何嘉, 奚峥皓, 阚秀, 等. 多无人机对组网雷达的协同干扰控制策略研究[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(7):48-51, 59.
- [6] 李飞, 周中良, 苟新禹, 等. 基于多机协同航迹欺骗的组网雷达突防技术[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(11):2309-2313.
- [7] 束坤, 刘宇蕊, 李迪, 等. 多无人机协同航迹欺骗群体智能算法研究[J]. 现代雷达, 2022, 44(11):18-23.
- [8] 原忠虎, 焦乐乐, 雷莹. 无人机在组网雷达中的虚假轨迹生成策略[J]. 电子信息对抗技术, 2022, 37(1):1-6, 11.
- [9] 霍跃珍, 杨象驰, 李杭蔚. 多无人机协同干扰组网雷达的优化研究[J]. 计算机仿真, 2021, 38(7):50-54.
- [10] 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, 54.
- [11] 温包谦, 王涛, 成坤, 等. 典型空中目标动态 RCS 特性仿真研究[J]. 弹箭与制导学报, 2020, 40(2):5-9.
- [12] 戴崇. 雷达目标动态 RCS 特性建模方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2013.
- [13] 袁天, 陶建锋, 李兴成. 飞行器编队协同的虚假航迹产
生仿真研究[J]. 计算机仿真, 2017, 34(8):100-104.
- [14] POLI R, KENNEDY J, BLACKWELL T. Particle Swarm Optimization[J]. Swarm Intelligence, 2007, 1(1):33-57.
- [15] SHI Y, EBERHART R. A Modified Particle Swarm Optimizer [C]//1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings. IEEE World Congress on Computational Intelligence. Anchorage, AK: IEEE, 69-73.
- [16] CLERC M. The Swarm and the Queen: Towards a Deterministic and Adaptive Particle Swarm Optimization [C]// Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation-CEC99. Washington, D. C.: IEEE, 1999: 1951-1957.
- [17] CLERC M, KENNEDY J. The Particle Swarm-Exploration, Stability, and Convergence in a Multidimensional Complex Space[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(1):58-73.
- [18] 李明. 标准粒子群算法的收敛性分析及改进研究[D]. 锦州:渤海大学, 2017.
- [19] 倪庆剑, 邢汉承, 张志政, 等. 粒子群优化算法研究进展[J]. 模式识别与人工智能, 2007, 20(3):349-357.
- [20] MA Y Y, JIN H B, LI H, et al. Adaptive Opposition-Based Particle Swarm Optimization Algorithm and Application Research [C]// 2019 IEEE 4th International Conference on Signal and Image Processing. Wuxi: IEEE, 2019: 518-523.
- [21] 黄培康, 殷红成, 许小剑. 雷达目标特性[M]. 北京:电子工业出版社, 2005.
- [22] 徐明志. 雷达目标特性及 MATLAB 仿真[M]. 北京:电子工业出版社, 2021.
- [23] 戴崇, 徐振海, 肖顺平. 非合作目标动态 RCS 仿真方法[J]. 航空学报, 2014, 35(5):1374-1384.
- [24] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 飞行力学 概念、量和符号 第 1 部分: 坐标轴系和运动状态变量: GB/T 14410. 1-2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [25] 徐明友, 丁松滨. 飞行动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.

(编辑:杜娟)