基于动态 RCS 的无人机航迹实时规划

晏 青 熊峻江 游思明

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 传统的无人机航迹规划主要采用仅考虑无人机与雷达距离的简化雷达威胁模型,未充分考虑无人机雷达散射截面 RCS(Radar Cross-Section)随自身姿态角改变而产生的动态变化. 据此,提出了无人机周向动态 RCS 模型,并建立了综合考虑无人机动态 RCS 与雷达距离的探测概率模型,利用遗传算法进行了基于动态 RCS 的航迹实时规划,计算结果与传统航迹规划结果进行了对比. 仿真结果表明该模型的可行性和有效性,能充分利用无人机自身的优势规避威胁,满足无人机的航迹实时规划的要求.

关 键 词: 雷达探测概率; 遗传算法; 动态雷达散射截面; 航迹实时规划

中图分类号: V 258

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2011)09-1115-07

Real-time programming method for flight path of unmanned vehicle based on dynamic RCS

Yan Qing Xiong Junjiang You Siming

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Simplified radar detection models are applied in conventional flight path programming of unmanned vehicle, in which only the distance between unmanned vehicle and radar has been taken into account, but the dynamic variation of radar cross-section (RCS) with attitude angle of unmanned vehicle has not been considered. New dynamic RCS model was presented to characterize the RCS distribution nature of unmanned vehicle, radar's detection probability model was developed to involve dynamic RCS and the distance between radar and unmanned vehicle. From genetic algorithm (GA) and dynamic RCS, real-time programming for flight path of unmanned vehicle was conducted and compared with conventional models. From verification examples, it is demonstrated that the models presented are feasible and valid to avoid the detection of radar.

Key words: detection probability of radar; genetic algorithm; dynamic radar cross-section(RCS); real-time programming of flight path

飞行器航迹规划是在特定约束条件下,寻找运动体从初始点到目标点,满足某种或多种性能指标的满意航迹[1],可以划分为静态航迹规划和实时航迹规划. 静态航迹规划是通过准确地获取战时地形以及威胁等全局环境信息,在飞行器起飞前一次性地规划出一条从起点到终点的优化航迹;但是,实际需要飞行器在飞行过程中根据战时情况,实时地进行航迹规划.

无人机作为重要的作战武器平台,担负着进入战场纵深活动的危险任务,因此,需要对无人机的飞行航迹进行合理的规划,以提高无人机的生存力和作战效能. 国内外研究学者采用蚁群算法、遗传算法[2]、模拟退火法、启发式算法[3]、Voronoi 图法[4-5]等对无人机航迹规划进行了大量研究,其中遗传算法因其利用参变量集的某种编码,无需导数或其他辅助信息,在搜索过程中不容易陷入局部最优等优点,越来越广泛地应用于航迹规划.

收稿日期: 2010-04-27

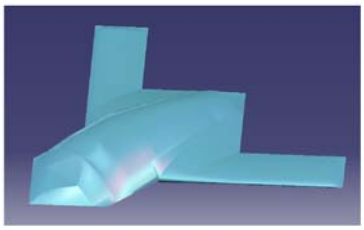
基金项目: 航空科学基金资助项目(05A51011)

作者简介: 晏 青(1986 -),男, 江西南昌人, 硕士生, yanqbad2008@126.com.

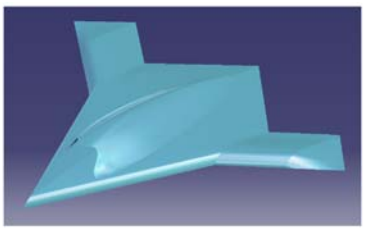
目前,在遗传算法航迹优化的目标函数中,普遍采用简化的雷达威胁模型,然而会导致雷达实际探测概率的计算误差. 另外,现有的大部分研究工作都局限于静态航迹规划,同时,考虑到目前可用于计算雷达探测概率的飞行器 RCS(Radar Cross-Section)动态模型在航迹规划中存在一定的局限性,因此,本文提出一种适合于无人机航迹规划,并结合无人机周向 RCS 分布特点的模型,利用面劈模型法计算三型无人机模型的周向动态 RCS 散射特性,建立了考虑无人机 RCS 动态变化的目标函数,采用遗传算法对无人机的航迹进行了规划,并与相关模型的规划结果进行了对比,结果表明基于动态 RCS 特征信号的概率威胁模型的可行性,对无人机实时航迹规划具有一定意义.

1 周向动态 RCS 特性

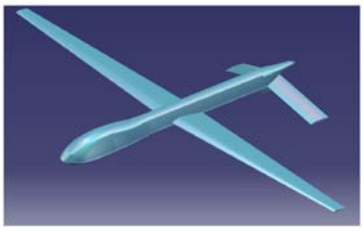
为研究无人机目标的周向 RCS 的动态特性,选用包括飞翼布局(无人机模型 1 和 2)和常规布局(无人机模型 3)在内的 3 种无人机模型,如图 1 所示.



a 无人机 1



b 无人机 2



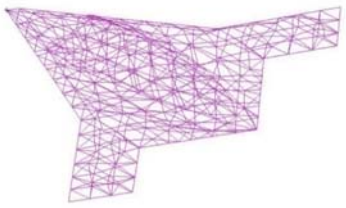
c 无人机 3

图 1 无人机表面模型图

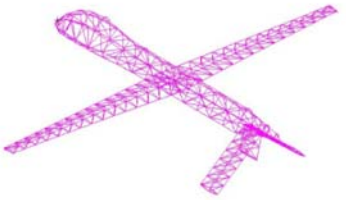
采用面劈模型描述目标的几何外形,利用有限元 MSC Patran 软件,建立了 3 种模型的表面模型与劈边模型(如图 1 和图 2 所示);采用物理光学法 PO 计算模型的表面散射,然后,利用等效电磁流 PTD-MEC 法计算模型的劈边散射,再将两者叠加,即得到目标的总 RCS 值.



a 无人机 1



b 无人机 2



c 无人机 3

图 2 无人机劈边模型

表面散射电场的物理光学表达式[6]为

$$\boldsymbol{E}_{\mathrm{s}} = -\mathrm{j}kE_0\frac{\exp(\mathrm{j}kR)}{2\pi R}\times \int_S \boldsymbol{s}\times[\boldsymbol{s}\times(\boldsymbol{n}\times\boldsymbol{h}_i)]\exp(\mathrm{j}k\boldsymbol{w}\cdot\boldsymbol{r})\mathrm{d}S \quad (1)$$

式中,S 是目标受到雷达照射的部分表面;$\boldsymbol{r}$ 是局部原点到表面单元 $\mathrm{d}S$ 的矢量;$\boldsymbol{w}=\boldsymbol{i}-\boldsymbol{s}$. 将式(1)代入到 RCS 平方根表达式,可得多边形平板的 RCS 计算公式:

$$\sqrt{\sigma_{\mathrm{f}}} = -\frac{\boldsymbol{n}\cdot(\boldsymbol{e}_{\mathrm{r}}\times\boldsymbol{h}_i)}{\sqrt{\pi}T}\exp(\mathrm{j}k\boldsymbol{r}_0\cdot\boldsymbol{W})\times \sum_{m=1}^{M}(\boldsymbol{p}\cdot\boldsymbol{a}_m)\exp(\mathrm{j}k\boldsymbol{r}_m\cdot\boldsymbol{w})\frac{2\sin\left(\frac{1}{2}k\boldsymbol{a}_m\cdot\boldsymbol{w}\right)}{k\boldsymbol{a}_m\cdot\boldsymbol{w}} \quad (2)$$

式中,σ_{f} 是平板的双站 RCS;$\boldsymbol{n}$ 为被照射平板表面的法向单位矢量;$\boldsymbol{e}_{\mathrm{r}}$ 为远场接收天线电极化方向单位矢量;$\boldsymbol{a}_m$ 为描述平板第 m 个边缘的长度和取向的矢量,这些边缘从头到尾沿周界分布;$\boldsymbol{r}_m$ 为第 m 个边缘中点的位置矢量;T 是 $\boldsymbol{w}$ 在平板平面上的投影长度;$\boldsymbol{p}=\boldsymbol{n}\times\boldsymbol{w}/|\boldsymbol{n}\times\boldsymbol{w}|$ 是垂直于 $\boldsymbol{w}$ 的平板平面上的单位矢量;M 为平板边缘的数目;$\boldsymbol{r}_0$ 是局部原点.

按照等效电磁流理论,采用 PTD-MEC 法,计算劈边散射的等效电磁流散射场[6]为

$$\boldsymbol{E}_{\mathrm{d}} = -\mathrm{j}k\psi_0 \times \int [Z_0 I_{\mathrm{e}} \boldsymbol{s} \times (\boldsymbol{s} \times \boldsymbol{t}) + I_{\mathrm{m}} (\boldsymbol{s} \times \boldsymbol{t})] \exp(\mathrm{j}k \boldsymbol{r}_{\mathrm{c}} \cdot \boldsymbol{s}) \mathrm{d}t \tag{3}$$

式中,$\psi_0 = \dfrac{\exp(\mathrm{j}kR)}{4\pi R}$是自由空间的格林函数;$I_{\mathrm{e}}$ 和 I_{m} 为等效电磁流;$\boldsymbol{r}_{\mathrm{c}}$ 是劈边中点的位置矢量. 将式(3)代入 RCS 的定义,得到劈边的 RCS 公式:

$$\sqrt{\sigma_{\mathrm{s}}} = \frac{L}{\sqrt{\pi}} \frac{(\boldsymbol{e}_{\mathrm{i}} \cdot \boldsymbol{t})(\boldsymbol{e}_{\mathrm{s}} \cdot \boldsymbol{t}) f + (\boldsymbol{h}_{\mathrm{i}} \cdot \boldsymbol{t})(\boldsymbol{h}_{\mathrm{s}} \cdot \boldsymbol{t}) g}{\sin^2 \beta} \times \frac{\sin(kL\cos\beta)}{kL\cos\beta} \exp(2\mathrm{j}k\boldsymbol{i} \cdot \boldsymbol{r}_{\mathrm{c}}) \tag{4}$$

式中,L 是劈边的长度.

最后,目标总的 RCS 是所有 m 个面片和 n 个劈边的 RCS 之和:

$$\sigma = \left[\sum_{i=1}^{m} (\sqrt{\sigma_{\mathrm{f}}})_i + \sum_{j=1}^{n} (\sqrt{\sigma_{\mathrm{s}}})_j \right]^2 \tag{5}$$

计算得到的 3 种模型周向 RCS 值分布如图 3 所示. 从图中可以看到,无人机周向的 RCS 值是变化的,在不同的周向角域范围差异较大,尤以侧向和头向一定角域内最大,并且在一些非前、后、侧向方向的角度内也出现了较大的 RCS 峰值,因此,无人机在突防的过程中,如果能够适当地调整目标与雷达之间的相对位置,则会对无人机规避威胁产生积极的影响,有助于无人机在复杂的战场环境下,充分发挥自己的隐身性能,对其进行实时躲避.

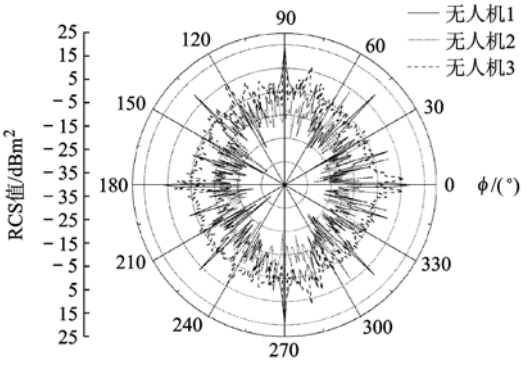


图 3　无人机周向雷达散射截面积

2　雷达探测概率模型

2.1　简化的雷达威胁模型

威胁模型的建立是无人机航迹规划的先决条件之一,一般包括地形因素威胁、雷达探测威胁及防空火力威胁,其中雷达探测威胁成为影响无人机突防、生存力的重要因素,也是各种航迹规划算法中重点考虑的因素之一;在以遗传算法为代表的航迹规划中,雷达威胁模型往往采用仅考虑距离因素的简化模型,主要分为 3 类:

1) 利用无人机与雷达之间的距离 R 构造威胁函数[7-9]:

$$P_1 = \sum K/R^4 \tag{6}$$

式中,K 和 R 分别为威胁强度(或系数)和飞行器与雷达之间的距离.

2) 利用飞行器与雷达之间的距离 R 以及雷达的最大探测距离 $R_{\max}$,构造威胁函数[10]:

$$P_2 = \mathrm{e}^{-\left(k+\frac{R^4}{R_{\max}^4}\right)} \tag{7}$$

式中,k 为飞行器飞行高度的相关系数.

3) 利用飞行器与雷达之间的距离 R 以及雷达的最大探测距离 $R_{\max}$,构造雷达探测概率模型[10]:

$$P_3 = \begin{cases} 0 & R > R_{\max} \\ \dfrac{R_{\max}^4}{R^4 + R_{\max}^4} & R \leqslant R_{\max} \end{cases} \tag{8}$$

以上 3 类模型是目前无人机航迹中常用的传统雷达威胁模型,可以缩短无人机规划的时间,提高规划的效率. 但是,这些模型没有考虑无人机周向 RCS 的动态变化,即假定飞行器的雷达截面积保持恒定,显然,这与实际情况不符. 因此,上述传统的简化模型会导致计算结果和航迹规划的误差. 另外,由于实际条件的限制,全局环境信息很难获得,因而,基于动态 RCS 的无人机航迹实时规划就成为必要.

2.2　基于动态 RCS 的雷达威胁模型

基于动态 RCS 的雷达威胁模型的关键在于建立一个合理而有效的动态 RCS 模型,此模型应能够反映无人机 RCS 的分布特性,文献[11]提出了动态 RCS 计算模型:

$$\delta = \frac{k_1}{(k_2 \sin^2\lambda + \cos^2\lambda)^2} \tag{9}$$

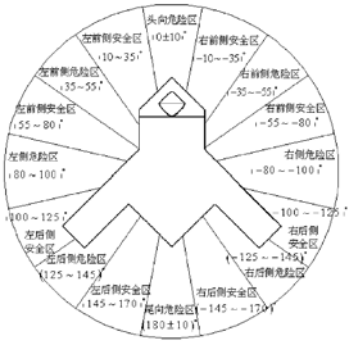
式中,k_1 和 k_2 为常数;λ 为无人机和雷达之间的连线与无人机速度矢量的夹角. 式(9)模型将无人机 RCS 值与 λ 之间的关系固定,显然不能反映无人机由于各自外形布局而具有不同 RCS 分布这一特性,因而,对不同布局无人机的使用效果有限;同时,RCS 数值计算结果也可能与真实无人机偏差较大,从而,使基于动态 RCS 的无人机航迹规划失去意义;另外,RCS 值以连续函数形式表示,势必会造成航迹规划时,过早地陷入局部最优而影响规划结果.

文献[12 - 13]提出了基于 8 特征信号建模

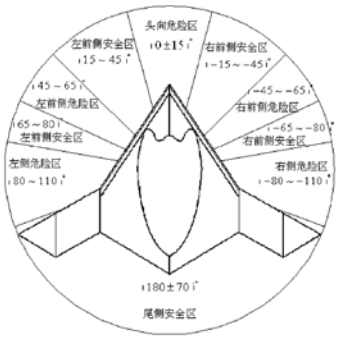
的雷达探测概率计算方法,将无人机周向动态 RCS 划分为 8 个特征信号重点探测区域,并分别以区域内的 RCS 平均值作为该区域的目标 RCS 值.这种方式对雷达探测概率的计算较为保守[12].而且,8 特征信号模型并不适合于航迹规划中的动态 RCS 建模,因为无人机作为雷达的目标,这种保守的处理对无人机的航迹规划则会带来负面影响,因为它忽略了无人机周向 RCS 中可能存在的尖峰区域,另外,该模型对各个重点探测区域的 RCS 进行平均,很可能出现各个区域的 RCS 平均值相差无几,从而,相当于把无人机周向的 RCS 值当作定值处理.

针对无人机自身周向 RCS 的动态本质,为反映其周向 RCS 分布尖峰区域特性,本文依据无人机的周向 RCS 分布计算结果,发现 RCS 尖峰区域,即发现某 RCS 峰值及其周边(10° ~30°)区域内的 RCS 值,明显大于区域外的 RCS 值,并且,若此区域的 $\sigma_{\max} \geqslant 5 \sim 10\ \mathrm{dBm}^2$(该值以 F-117 侧向 RCS 平均值为参考),则定义为 RCS 危险区,并以该区域中的最大 RCS 值表示该区域的 RCS 分布,此区域是无人机航迹规划中,无人机应该重点规避的区域;其余区域为 RCS 安全区,并以各区域中的 RCS 平均值作为该区域的 RCS 值分布.经计算分析,得到 3 种无人机模型的危险区域、安全区域如图 4 所示.以无人机模型 3 为例,根据该无人机 RCS 周向分布特点,动态 RCS 模型分为:头向危险区 $\phi_n = (0 \pm 10)°$,尾向危险区 $\phi_n = (180 \pm 10)°$,左侧危险区 $\phi_n = (65 \sim 125)°$,右侧危险区 $\phi_n = (-65 \sim -125)°$,左前侧安全区 $\phi_n = (10 \sim 65)°$,右前侧安全区 $\phi_n = (-10 \sim -65)°$,左后侧安全区 $\phi_n = (125 \sim 170)°$,右后侧安全区 $\phi_n = (-125 \sim -170)°$.上述动态 RCS 建模特点在于:较为准确地反映了无人机周向 RCS 动态特性;将周向 RCS 划分区域的方式可以减少航迹规划时硬件的储存,提高实时规划的效率.

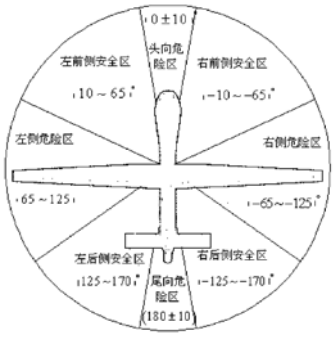
本文的周向动态 RCS 建模与文献[11 -12]模型计算结果,及无人机实际 RCS 周向分布如图 5 所示.从图 5 中可以看到,文献[11]中的动态 RCS 模型与 3 种无人机模型的实际 RCS 周向分布之间都存在较大差别,不能反映无人机模型的实际分布特性;文献[12]中的模型,在无人机模型 1 中出现了各重点探测区域内 RCS 值相近的情况,此时,航迹规划中的雷达模型将退化成简化模型,而在无人机模型 2 和 3 中与本文模型存在一定程度上的相似,但是,各个区域间的 RCS 值对比不明显,可能会导致雷达探测概率的计算值接近而影响规划效果.



a 无人机 1



b 无人机 2



c 无人机 3

图 4 无人机动态 RCS 模型

2.3 雷达探测概率估算

雷达探测概率 P_{d} 和虚警概率 P_{fa} 与信噪比的关系[12-13]为

$$(S/N)_{P_{\mathrm{d}}} = \frac{\ln P_{\mathrm{fa}}}{\ln P_{\mathrm{d}}} - 1 \tag{10}$$

单部雷达最大探测距离方程[14]为

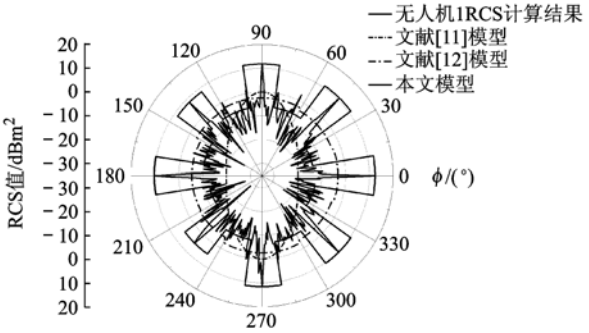
$$R_{\max}(\alpha) = \left[\frac{P_{\mathrm{t}} G^2 \lambda^2 \sigma(\alpha) D}{(4\pi)^3 k T_0 B F_{\mathrm{n}} (S/N_0)_1} \right]^{\frac{1}{4}} \tag{11}$$

式中,P_{t} 为发射功率;G 为天线增益;λ 为雷达波长;D 为脉冲压缩比;k 为波尔兹曼系数;T_0 为标准室温;B 为频带宽;F_{n} 为噪声系数;$(S/N_0)_1$ 为最小信噪比;α 为雷达观测目标的方位角;$\sigma(\alpha)$ 则表示在不同的方位角下目标的 RCS.

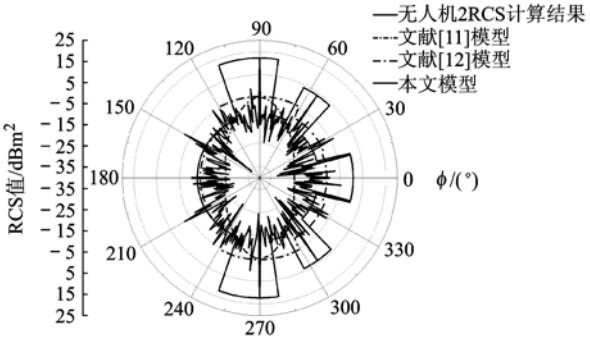
基于式(10)和式(11),文献[12]给出了单部雷达对目标的探测概率与目标的 RCS、虚警概率等的关系式:

$$P_{\mathrm{d}} = \exp\left\{\frac{[r/r_{\mathrm{d0}}(\alpha)]^4 \cdot \ln P_{\mathrm{d0}} \cdot \ln P_{\mathrm{fa}}}{\ln P_{\mathrm{fa}} - \ln P_{\mathrm{d0}} + [r/r_{\mathrm{d0}}(\alpha)]^4 \cdot \ln P_{\mathrm{d0}}}\right\} \tag{12}$$

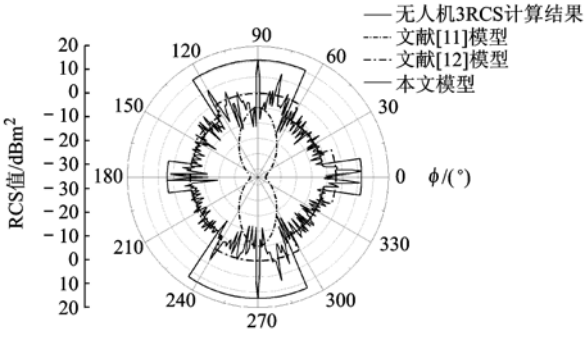
式中,r 为单部雷达与目标之间的距离;P_{d0} 为最大探测距离处的探测概率;r_{d0} 为与 P_{d0} 对应的最大探测距离. 因此,式(12)表示的探测概率是目标与雷达的距离 r 以及调整姿态角 α 的函数,根据本文提出的模型,当 $r=6\,000$ m 时,无人机安全区与危险区所对应的雷达探测概率如图 6 所示,从图中可以看到,距离相同时,各无人机危险区、安全区的雷达探测概率区别较大,这有利于提高航迹规划效率,也说明考虑周向动态 RCS 特性对雷达探测概率影响的必要性.



a　无人机 1

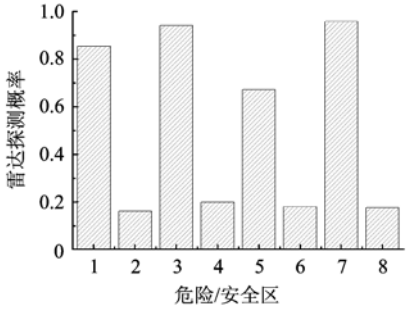


b　无人机 2

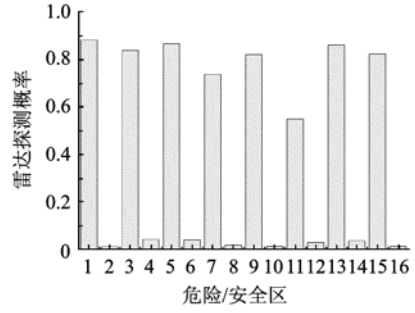


c　无人机 3

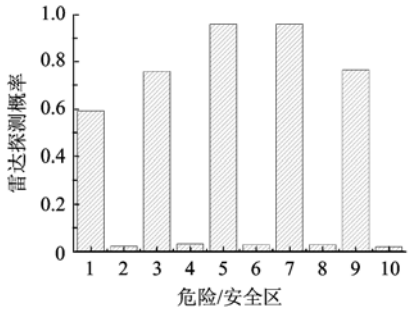
图 5　各模型与无人机实际 RCS 分布比较图



a　无人机 1



b　无人机 2



c　无人机 3

图 6　无人机危险/安全区对应雷达探测概率

3　基于动态 RCS 航迹实时规划

在航迹实时规划中,将无人机航路分成若干航迹段,运用遗传算法依次对各航迹段进行规划. 规划每一航迹段 S_i(S_i 为从第 $i-1$ 次改变无人机姿态角到第 i 次改变姿态角间的航迹段),设(x_i, y_i)为该段起点,通过同时考虑无人机与主要雷达的距离以及其姿态角,优化该航迹段,找到该航迹段终点(x_{i+1}, y_{i+1});规划下一航迹段时,再以(x_{i+1}, y_{i+1})为起点进行规划,直至无人机到达整条航迹的终点,形成一条优化的航迹.

要将“雷达探测”和“目标动态 RCS”这两个基本理论相结合,进行基于动态 RCS 的无人机航迹实时规划. 不仅要考虑增加无人机与雷达的距离 r 来规避威胁,而且要通过适当地改变无人机的姿态角 α,使得主要雷达的雷达波入射方向位于其 RCS 值较小的角度区域,如左、右前侧安全区,或左、右后侧安全区,将会使雷达的探测概率降低,从而有效地提高无人机的生存力,在无法改

变与雷达距离 r 的情况下,姿态角 α 的调整会使无人机被探测的概率迅速降低,提高了无人机适应战场的能力.

应用 4 种遗传算子:适应度尺度转换算子、选择算子、交叉算子和变异算子,并采用十位二进制编码表示染色体,通过变步长的方式,将染色体编码的信息反映为各航迹段 S_i "终点"的(x_{i+1}, y_{i+1})坐标,结合"起点坐标"(x_i, y_i)构成该航迹段,便于进行目标函数的计算,其中步长与每一航迹段"起点"与整条航迹"终点"之间的 x、y 方向距离差别有关. 整条航迹的起点和终点固定,各航迹段优化的初始种群随机产生,航迹的遗传算法流程如图 7 所示.

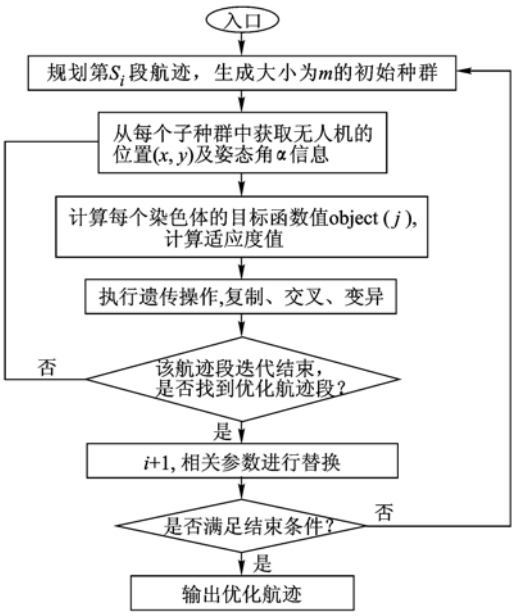


图 7 遗传算法流程图

目标函数对无人机航迹规划至关重要,往往需要考虑航迹长度、最大拐转角、障碍威胁、地形高度等因素,本文将飞行器高度作为定值(即常量)处理,从而使问题简化为平面航迹规划问题,并且在目标函数中考虑雷达威胁、航迹长度及最大拐转角因素,此目标函数为

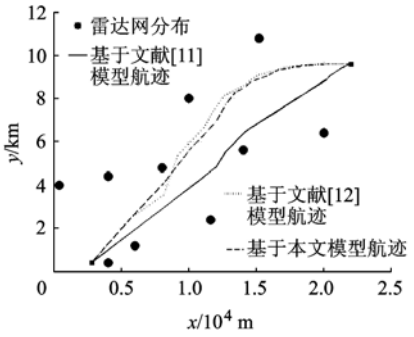
$$F(j) = K_{1j}/I_{1j} + K_{2j}/(I_{2j} + 0.1) + K_{3j}/I_{3j} \tag{13}$$

式中,j 表示第 j 条航迹段;K_{nj}(n = 1,2,3)表示相应的权重系数,可以根据不同的需要选取,在本文算法中强调雷达探测该率的重要性,相应的系数取值较大;I_{1j}为航迹段长度,使每段的航迹尽可能短;I_{2j}为该航迹段与整条航迹起点和终点连线的夹角,通过它限制相邻两条航迹段间的拐转角,从而,使整条航迹光滑,为了避免出现除零而使算法失效,采取 I_{2j} + 0.1 的方式;I_{3j}为雷达威胁,为所有雷达对该航迹段的最大探测概率 $P_{d,max}$,调整与雷达的距离和自身的姿态角,保证每一条航迹段达到最小探测概率,为了使最大探测概率尽可能小,算法中加入惩罚函数,当 $P_{d,max} > 0.2$ 时,进行惩罚.

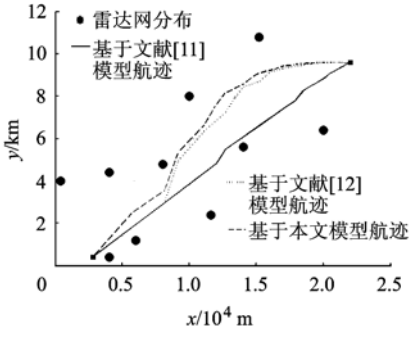
4 算 例

在 Xeon 2.8 GHz PC 机上进行仿真试验,运行环境为 Windows Xp,编程环境为 Matlab 6.5.1. 运用本文算法,进行了航迹规划. 种群大小设定为 100,交叉概率 P_c = 0.6,变异概率 P_m = 0.015,各航迹段优化最大代数为 50,整条航迹优化最大代数为 150,仿真中雷达任意分布.

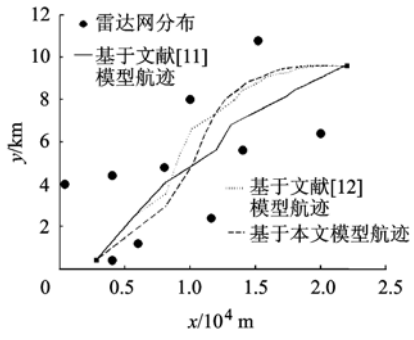
仿真结果如图 8 所示. 可以看出,基于文献[11]动态 RCS 模型的规划航迹较为平坦,这是因为相对于无人机实际 RCS 值,该模型的 RCS 值小很多. 在模型的 RCS 具有较小值情况下,偏离起、



a 无人机 1



b 无人机 2



c 无人机 3

图 8 无人机航迹规划结果

终点连线的较小角度点,能够满足每段航迹终点最大雷达探测概率 $P_{d,max}<0.2$ 的条件,规划过程即进入收敛. 由于遗传算法中采用随机生成初始种群,因此,在采用文献[11]模型规划的 3 种无人机模型的航迹时,虽然各种参数未变,但同样由于模型的 RCS 明显较小,而导致规划的结果略不相同.

基于文献[12]动态 RCS 模型的各无人机航迹规划结果较为相似,这是因为该模型在 3 种无人机模型上均采用相同重点探测区域划分,并且各无人机模型的重点探测区域 RCS 平均值的相对大小分布较为一致.

基于本文动态 RCS 模型的各无人机航迹规划结果之间有较大差别,这是因为各无人机模型自身周向 RCS 的动态分布及峰值分布不同,且相互差别较大,另外,各无人机模型周向动态 RCS 的安全区与危险区的划分也很不相同,使得在规划时,各无人机都尽可能地调整姿态,以使最近距离的雷达波入射角度位于安全区域内.

5　结 束 语

本文提出了表征无人机自身周向 RCS 动态特性的动态 RCS 模型,并利用遗传算法和雷达探测概率模型,对其航迹实时规划进行了研究,并与相关模型进行了对比,仿真结果表明,该模型有效可行,能充分利用无人机自身的隐身特点,提高其战场生存力,并且为实际无人机的突防提供了一定的参考意义. 考虑更为复杂的地形环境、防空火力等因素的航迹规划模型有待进一步探讨.

参考文献（References）

[1] 徐正军,唐硕. 基于改进遗传算法的飞行航迹规划[J]. 宇航学报,2008,29(4):1541 – 1545
Xu Zhengjun, Tang Shuo. Flight path planning based on improved genetic algorithm [J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(4):1541 – 1545(in Chinese)

[2] Eun Y, Bang H. Cooperative task assignment/path planning of multiple unmanned aerial vehicles using genetic algorithms[J]. Journal of Aircraft, 2009, 46(1):338 – 343

[3] Rapajic P B, Vucetic B S. Adaptive receiver structures for asynchronous CDMA systems [J]. IEEE J Sel Areas Commun, 1994, 12(5):685 – 697

[4] McLain T W, Beard R W. Trajectory planning for coordinated rendezvous of unmanned air vehicles [R]. AIAA Paper 2000-4369, 2000

[5] Bortoff S A. Path planning for UAVs[C]//Proceedings of the American Control Conference, American Automatic Control Council. Chicago:[s. n.], 2000:364 – 368

[6] 叶少波,熊峻江. 直升机旋翼桨叶动态 RCS 特性研究[J]. 航空学报,2006,27(5):816 – 822
Ye Shaobo, Xiong Junjiang. Dynamic RCS behavior of helicopter rotating blades [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2006, 27(5):816 – 822(in Chinese)

[7] 郑昌文,李磊,徐帆江,等. 基于进化算法的无人飞行器多航迹规划[J]. 宇航学报,2005,26(2):223 – 227
Zheng Changwen, Li Lei, Xu Fanjiang, et al. Multiple routes planning for unmanned air vehicle based on evolutionary computation[J]. Journal of Astronautics, 2005, 26(2):223 – 227(in Chinese)

[8] 熊建国,李杰,翟崎. 基于自适应遗传算法的无人机航路规划[J]. 河南大学学报,2007,37(6):635 – 638
Xiong Jianguo, Li Jie, Zhai Qi. Path planning for UAV based on adaptive genetic algorithm [J]. Journal of Henan University, 2007, 37(6):635 – 638(in Chinese)

[9] 严江江,丁明跃,周成平. 基于进化算法的多飞行器四维航迹规划方法[J]. 系统仿真学报,2009,21(4):1125 – 1129
Yan Jiangjiang, Ding Mingyue, Zhou Chengping. 4D route planning for multi-UAV based on evolutionary algorithm [J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(4):1125 – 1129(in Chinese)

[10] 阮颖铮. 雷达截面与隐身技术[M]. 北京:国防工业出版社,1998
Ruan Yingzheng. Radar cross-section and stealth technology [M]. Beijing; National Defense Industry Press, 1998(in Chinese)

[11] 丁晓东,刘毅,李为民. 基于动态 RCS 的无人机航迹实时规划方法研究[J]. 系统工程与电子技术,2008,30(5):868 – 871
Ding Xiaodong, Liu Yi, Li Weimin. Dynamic RCS and real-time based analysis of method of UAV route planning [J]. System Engineering and Electronics, 2008, 30(5):868 – 871(in Chinese)

[12] 李莹,黄沛霖,武哲. 隐身飞行器突防仿真的特征信号新建模方法[J]. 北京航空航天大学学报,2009,35(1):40 – 43
Li Ying, Huang Peilin, Wu Zhe. New method of modeling stealth aircraft signal based on emulator [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(1):40 – 43(in Chinese)

[13] 李莹,黄沛霖,武哲. 基于不同角域 RCS 均值的雷达探测模型[J]. 北京航空航天大学学报,2008,34(6):627 – 629
Li Ying, Huang Peilin, Wu Zhe. New method of radar network detection based on average RCS value of different angle territory [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(6):627 – 629(in Chinese)

[14] 中航雷达与电子设备研究所. 雷达系统[M]. 北京:国防工业出版社,2006:79 – 88
Radar and electronic equipment institute of China aviation. Radar system [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006:79 – 88(in Chinese)

(编　辑:李　晶)