DOI: 10.7641/CTA.2014.30069

基于改进快速扩展随机树方法的隐身无人机突防航迹规划

莫 松^{1†}, 黄 俊¹, 郑 征², 刘 伟²

(1. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191; 2. 北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191)

摘要:针对隐身无人机在日趋严密的雷达防御系统下的生存问题,提出了基于改进快速扩展随机树的隐身突防 航迹规划方法.本文首先对隐身突防航迹规划中无人机的动态雷达散射截面积和雷达的发现准则这两个关键问题 进行了分析和建模,然后针对现有算法在解决隐身飞机航迹规划问题时的不足,设计了改进快速扩展随机树算法, 将无人机的雷达散射截面积随姿态变化的情况考虑到新节点生成中,并且结合滚动时域策略计算时域范围内所有 节点的瞬时发现概率均值,以判断新节点可行性.仿真结果和对比研究表明,算法的改进策略能够处理隐身突防航 迹规划的两个特性,并且可在复杂环境下快速生成更优的突防路径.

关键词: 无人机(UAV); 路径规划; 快速扩展随机树(RRT); 雷达散射截面(RCS)

中图分类号: TP273 文献标识码: A

Stealth penetration path planning for stealth unmanned aerial vehicle based on improved rapidly-exploring-random-tree

MO Song^{1†}, HUANG Jun¹, ZHENG Zheng², LIU Wei²

(1. School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191 China;

2. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191 China)

Abstract: Because the air-defense radar net is increasingly dense in the modern warfare, a stealth penetration path planning scheme based on improved rapidly-exploring-random-tree (RRT) is proposed to address the flight survivability problem of the stealth unmanned aerial vehicles (UAV). Firstly, two crucial characters of the stealth penetration path planning, the dynamic radar cross section (RCS) of the aircraft and the radar detection criterion, are analyzed and modeled. Secondly, an improved RRT is proposed to solve the path planning problem of the stealth UAV which has not been well handled by existing methods. When the improved algorithm generates a new vertex, the RCS variation according to different attitude angles is taken into consideration. Lastly, the feasibility of the new vertex is estimated through the average value of the instantaneous detection probability of several vertexes around it. This value is calculated with the receding horizon control strategy. The simulation result and the comparison study show that the two characters of the penetration path planning can be well handled by the proposed algorithm, and a better penetration route can be generated efficiently in complex scenarios.

Key words: unmanned aerial vehicles (UAV); path planning; rapidly-exploring random tree (RRT); radar cross section (RCS)

1 引言(Introduction)

隐身无人机能够凭借其低雷达散射截面(radar cross section, RCS)特性压缩雷达威胁区域进行突防, 实现对敌纵深目标的侦察打击^[1-2]. 然而, 现代防空系 统往往会在隐身无人机的突防走廊区域中提高雷达 部署密度和层次. 因此, 传统突防线路已无法保证突 防飞行的安全^[3].

分析雷达探测目标的原理可知,雷达探测能力与 目标RCS密切相关,而隐身无人机在某些角域上具有 很低的RCS值^[4-5],当这些角域面对雷达时,就能够大 大降低雷达的检测概率^[6].不仅如此,雷达系统只有 在多次扫描所获取的目标信号满足一定准则时,才能够作出发现目标的判决^[3,7].因此,如果在飞行中充分利用无人机隐身设计的特点,采取合适的飞行线路,使得雷达只能得到一些无规律的间断点信号,就能够在雷达威胁区域中实现安全突防^[8].由此可见,对于高密度雷达威胁环境下隐身无人机航迹规划问题,应该同时考虑其周向RCS特点和雷达系统确认发现目标条件这两个因素.

现有大部分航迹规划研究中采用的无人机电磁模型无法反映出飞行器周向RCS的分布特点^[2,9–10].为此,目前已有学者在航迹规划中通过动态RCS模

收稿日期: 2013-01-22; 录用日期: 2013-11-11.

[†]通信作者. E-mail: neomo112@gmail.com.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60904066).

型^[3,11-15]来获取无人机相对雷达的更准确的RCS值, 从而更好反映出无人机所处的威胁状态.此外,现有 航迹规划研究中很少考虑雷达确认发现目标的过程 和条件,而是通常比较保守的根据雷达单次扫描的检 测概率来建立威胁环境模型^[15-16],这种方式显然无法 满足隐身无人机快速突防的需求.目前已有一些研究 机构开始利用雷达工作的机理来进行威胁建模,文 献[17-19]通过模拟防空雷达的搜索程序或策略来建 立雷达威胁模型.文献[3,11,13]则从航迹规划角度, 将现代防空雷达常用的航迹准则进行了概率形式的 描述,用一定扫描周期内的雷达发现概率均值来反映 航迹段上的无人机被确认发现的概率.该模型合理地 描述了防空雷达探测目标的原理,因此,本文将采用 该模型进行威胁建模.

将同时考虑上述两个特点的无人机航迹规划问题称为考虑动态RCS特性和雷达发现准则的航迹规划问题.目前国内外的相关研究还处于起步阶段,现有研究通常采用非线性轨迹生成方法(nonlinear trajectory generation, NTG)方法^[1,6]或最优控制方法^[4,12],这些方法需要解算一系列代价方程和约束方程,计算复杂度较高,不适合复杂雷达威胁场景.此外,上述方法对模型的解析化要求较高,采用高离散性真实RCS数据时会出现所规划航迹严重跳动的现象,因此文献[3,11–13]均采用了椭圆方程来近似飞行器的RCS分布规律.然而,隐身无人机的RCS分布细节正是实施有效突防的要素之一,必须采用真实RCS数据才能进行很好表现,因此上述算法无法较好的应用于隐身无人机的突防航迹规划.

基于采样的规划方法由于方法自身的离散性,因 此可以适应离散化模型[19]. 典型的方法包括基于快速 扩展随机树(rapidly-exploring random tree, RRT)的规 划方法^[20-21]、可视图法(visibility map)^[22]、基于采样 的基于采样的概率路标图(sampling-based probabilistic roadmaps, PRMs)^[23]方法等. 其中, RRT方法通过 随机采样的方式探索未知任务空间,能够快速生成连 接始末点的路径,具有概率完备性和较高的计算效 率^[24-25].因此,本文采用RRT方法进行隐身无人机突 防航迹规划,并根据隐身突防的两个特性进行了改进: 1) 在RRT的节点上加入无人机姿态角的信息, 以充分 反应动态RCS特性对航路生成的影响; 2) 在RRT的节 点生长过程中引入滚动时域策略[26],通过一段航迹上 无人机被确认发现的概率来综合判断新节点可行性; 3) 引入变步长策略, 根据雷达威胁密度调整RRT扩展 步长,加快了树生长速度和航路搜索效率.在仿真实 验中采用某型隐身无人机的真实RCS数据建立电磁 模型,然后通过大量数值仿真验证了改进算法对隐身 突防航迹规划两个特性的处理能力,进而在复杂威胁 场景下,对算法的可行性和优化效果进行了验证,最 后与两种经典方法进行了对比研究.

2 问题分析(Problem analysis)

2.1 任务描述(Mission description)

目前各国防空网的主要雷达部署方式为:在常规 中型骨干单基地雷达基础上,增设一些低成本低性能 雷达进行补盲^[27].这就使得雷达威胁的空域覆盖连续 性和严密性大大提高,隐身无人机必须长距离的保持 隐蔽飞行.同时,隐身设计也通常是针对一些主要飞 行高度来进行的.因此,为了节省燃油以及更好发挥 隐身性能,隐身无人机通常会维持在一些固定高度进 行突防规避飞行,并尽量处于巡航飞行状态,避免做 出大机动动作^[1-2].

针对上述任务需求分析,本文将无人机考虑成一个带有姿态信息的质点,以恒定速度v在固定高度仅 采用等高等速转弯做小机动水平飞行.设X为无人机 的状态集合, $x(t) \in \mathbb{R}^{n_x}$ 为无人机t时刻状态, $u(t) \in \mathbb{R}^{n_u}$ 为无人机t时刻的控制输入, $\dot{\theta}$ 为由u(t)产生的转 弯角速度, x_0 为起始状态, x_f 为目标点状态,系统的运 动学方程为

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t)) = \begin{bmatrix} v\\ \dot{\theta} \end{bmatrix}, \qquad (1)$$

s.t.
$$x(t_0) = x_0, x(t_f) = x_f,$$

其中: t₀为起点时刻, t_f为终点时刻. 根据本文需求改 写为离散时间系统下的离散形式为

$$\dot{x}(t_{i+1}) = f(x(t_i), u(t_i)),$$
s.t. $x(t_0) = x_0, \ x(t_N) = x_f,$
(2)

其中: $x(t_i)$ 为无人机在 t_i 时刻的状态,由无人机的空间位置(p,q)和航向角 θ 构成.通过控制输入 $u(t_i)$ 实现 无人机的状态转移,受隐身无人机的机动性能限制, $u(t_i) \in U. t_N$ 为终点时刻,N为突防航迹上航路点的 总数. 另设在运行空间中存在雷达威胁区域 X_{radar} , 而 X_{free} 为安全区域.因此有

$$x(t_i) \in X_{\text{free}}(t_i), \text{ or } x(t_i) \in X \setminus X_{\text{radar}}(t_i).$$
 (3)

本文中 X_{radar} 由 t_i 时刻实时**RCS**值 $\sigma(t_i)$ (由 $x(t_i)$ 得到)和一段时间内雷达确认发现目标的概率 $P_t(t_i)$ 共同决定:

$$X_{\text{radar}} = F(x(t_i), P_{t}(t_i)).$$
(4)

可见, 雷达威胁X_{radar}不再以固定的威胁区域出现, 而 是由隐身突防的两个特性决定, 这也是隐身无人机航 迹规划问题与经典航迹规划问题的主要区别. 下面将 首先对这两个特性进行分析.

2.2 特性 1: 动态RCS(Character 1: dynamic RCS)

飞机类目标的外形非常复杂,其不同视线方向(本 文采用俯仰角α和方位角θ来表示)上的RCS值具有剧 烈起伏的特点.而且,某一方向上RCS的具体大小还 与入射雷达波的频率,雷达天线的极化方向这两个外 部因素有关.因此,无人机在隐身设计时,通常会在防 空雷达几种常用波段(如S,C波段)以及水平极化(horizontal and horizontal polarization, HH)和 垂 直 极 化 (vertical and vertical polarization, VV)方式下,根据其 任务特点对雷达照射的重点角域进行RCS减缩,例如 对于低空突防的无人机,当主要考虑到S波段地面雷 达水平照射时,在设计中就需要重点减小S波段HH极 化情况下无人机头向±φ_n、侧向±φ_s及尾向±φ_t角域 内的RCS.而对于RCS减缩区域之间的高RCS区域, 隐身设计会使其集中到少数几个方向上,并尽量形成 若干较窄的RCS峰值区域(见图1(a)).图1中显示了隐 身无人机和普通飞机RCS水平周向极坐标曲线对比. 由于这种RCS分布特点,隐身无人机在雷达威胁区 域中飞行时,随着飞行器和各部雷达相对姿态角(θ 和α)的改变,雷达探测到的飞行器RCS值也会不断变 化,即呈现出动态RCS特性.图2为雷达平视照射情况 下的动态RCS原理示意图.













Fig. 2 Dynamic RCS

为了充分利用隐身无人机的动态RCS特性进行高 密防空雷达网快速突防,就需要采用更完整的RCS周 向数据来进行航迹规划.借助于RRT方法的离散特性, 本文直接根据数值计算和微波的实验数据,建立RCS 数据表作为动态RCS模型,其中一条完整的RCS数据 如表1所示(限于篇幅,表中仅显示了S,C波段),其中β 和α的取值范围均为0°~360°,步长由实验数据和使 用需求决定.RCS数据表的规模可以根据具体情况进 行剪裁,例如无人机不进行频繁大机动飞行时,可仅 取水平照射一定俯仰角范围内的数据,于是大大降低 了数据表的规模.

表1 R	CS数据表
------	-------

Table 1	The RCS data sheet	
---------	--------------------	--

序号	$\theta/(^{\circ})$	$\alpha/(^{\circ})$	$S/HH/m^2$	
:	:	:	:	
23	0	22	0.9222	
:	÷	÷	÷	
序号	$C/HH/m^2$	$S/VV/m^2$	$C/VV/m^2$	
序号 :	C/HH/m ² :	S/VV/m ²	C/VV/m ² :	···· :
序号 : 23	C/HH/m ² : 0.6899	S/VV/m ² : 0.2916	C/VV/m ² : 0.1377	···· :

2.3 特性 2: 雷达的发现准则(Character 2: Radar detection criterion)

防空雷达对空监视时会对指定空域进行反复扫描, 每次扫描都会以一定检测概率P_d获取目标信号.雷达 系统要确认发现目标,则要求所获得的目标信息能够 满足一定准则.防空雷达系统通常采用航迹准则,包 含两点:1)在N次扫描中至少有M次检测到目标信 号;2)所获取的这些目标信息的质量能够满足航迹预 测或跟踪需求^[3,7].

结合隐身无人机的动态RCS特性,采取合理飞行 线路,使得该航迹准则无法满足,就能够保证无人机 的突防安全.然而,航迹规划系统无法确切得知每次 扫描中雷达是否检测到无人机信号.因此,利用Pd来 对航迹准则进行概率形式的描述:在一定虚警概率 Pfa下,航迹准则成立的概率Ptrack等于N次检测概率 为Pd的扫描中,没有出现大于等于l次连续目标信号 丢失情况的概率^[3].Ptrack是雷达通过N次扫描能够 确认发现无人机的概率的上界,因此采用Ptrack对雷 达威胁进行建模能够充分保证规划所得航迹的安全 性.

当 P_{fa} , l和N确定时, P_{track} 由以无人机与雷达距离 R及RCS 值 σ 为自变量的函数得到, 该函数可用 Logistic函数来逼近. 设 P_{t} 为 P_{track} 的近似值, 则^[3,11]

$$P_{\rm t} = [1 + (\frac{c_2 R^4}{\sigma})^{c_1}]^{-1}, \tag{5}$$

其中 c_1 和 c_2 是与雷达自身性能和设定相关的参数. 由 于隐身无人机动态**RCS**特性和高速运动特性, 在N次 扫描中, R和 σ 均会不断变化, 而且无人机被扫描到的 具体时刻也无法得知. 因此, 应该在一个时间段上计 算雷达确认发现无人机的概率. 本文采用N次扫描所 经历时段 ΔT 内的 P_t 均值 $P_a^{[3,11,13]}$:

$$P_{\rm a} = \frac{1}{\Delta T} \int_{\Delta T} P_{\rm t}(\tau) \mathrm{d}\tau, \tag{6}$$

改写为离散时间系统为

$$P_{\rm a} = \frac{1}{r} \sum_{k=1}^{r} P_{\rm t}(t_k), \tag{7}$$

 $r 为 \Delta T$ 内的离散节点个数, t_k 为节点k在 ΔT 内出现 的时刻, $P_t(t_k)$ 是节点 t_k 时刻雷达对无人机的瞬时发 现概率,通过该时刻的R和 σ 由式(5)得到.根据对突 防安全性的需求,可设定一个概率阈值 P_{ac} .当 $P_a < P_{ac}$ 时,则表明防空雷达系统在 ΔT 内所获得的隐身无 人机信号无法满足航迹准则的要求,从而无法确认发 现无人机。

3 基于改进RRT算法的路径规划(Improved RRT based path planning algorithm)

本节将引入RRT方法来利用上述两个特性进行隐 身无人机突防航迹规划方法的研究.

3.1 算法描述(Algorithm description)

标准RRT算法的航迹规划过程是^[29]:当扩展RRT 时,首先在任务空间G中选取随机点*x*_{rand},然后在当 前RRT中搜索距离*x*_{rand}最近的节点*x*_{near}:(*p*_{near}, *q*_{near}),最后由控制量*u*按步长λ生成新节点*x*_{new}: (*p*_{new},*q*_{new})以及生长路径.通过不断重复上述过程, 直到新节点和*x*_f重合,最后由*x*_f回退搜索到*x*₀,即可 得到可行路径*T*.然而,采用标准RRT方法生成的路径 只能反映无人机的空间位置,无法体现无人机的飞行 姿态;而且仅通过当前时刻的状态判断新节点的可行 性,无法充分利用雷达的发现准则.因此,对标准RRT 算法进行改进以用于解决隐身无人机航迹规划问题. 图3为改进算法的流程图,算法的基本框架按照标准 RRT方法构造.改进算法的核心是根据隐身突防的两 个特性,对RRT生长的方式、步长及新节点可行性的 判定方式进行了改进.

3.2 面向隐身突防的RRT算法改进(Improvement of RRT algorithm for stealth penetration) 下面将对新算法中的改进策略进行详细说明.

3.2.1 姿态角信息融合(Integration of azimuth)

考虑到隐身无人机航迹规划问题的动态RCS特性, 在RRT节点中加入了姿态角信息.通过控制量 $u(t_i)$ 在 生成($p_{\text{new}}, p_{\text{new}}$)的同时也生成新节点处的航向角 θ_{new} .在等高等速小机动飞行的前提下,可结合相对 父节点航向角 θ_{new} 由式^[30]

$$\phi_{\text{new}} = \cos^{-1}\left(\frac{1}{\sqrt{\left((\theta_{\text{new}} - \theta_{\text{near}})v^2/\lambda g\right)^2 + 1}}\right) (8)$$

得到 X_{new} 处无人机的滚转角 ϕ_{new} ,其中: λ 为树生长的步长,g为当地重力加速度.此外,相邻节点之间的航向角变化还需满足最大转弯角速度 $\dot{\theta}_{\text{max}}$ 的约束,即

$$|\theta_{\text{new}} - \theta_{\text{near}}| \leqslant \frac{||x_{\text{new}} - x_{\text{near}}||}{\dot{\theta}_{\text{max}}}.$$
 (9)

由式(8)-(9)可见,通过设置 $\dot{\theta}_{max}$ 可对小机动飞行条件下的滚转角实现限制.

由此,即得到了 X_{new} 处的无人机飞行姿态(θ_{new} , ϕ_{new}),再结合无人机和雷达的空间相对位置计算雷 达波视线方向(α , θ),通过表1及式(5)计算出节点 X_{new} 该时刻的瞬时发现概率 $P_t(t_k)$.





3.2.2 滚动时域策略(Receding horizon control strategy)

为了利用雷达的发现准则进行隐身无人机航迹规 划,引入滚动时域策略.在对当前节点(p_{ti},q_{ti})进行扩 展时,控制量u(t_i)将连续生成时域范围内的r/2个节 点 $(p_{t_{i+k}}, q_{t_{i+k}})(k=1, 2, \cdots, r/2)$ 及各节点航向角 θ_k ,并计算各节点时刻的发现概率. 然后,结合当前节 点和之前的(r/2-1)个节点的 $P_t(t_k)$,再由式(7)计算 这r个节点的 P_a . 若 $P_a < P_{ac}$,则 $(p_{t_{i+1}}, q_{t_{i+1}})$ 加入RRT 中.因此,新节点的可行性实际上是通过一段航迹上 雷达确认发现无人机的概率来判断的.

3.2.3 变步长策略(Variable-step)

在运行空间中雷达分布较为复杂时,引入变步长 策略.在有多部雷达作用的区域,由各部雷达的发现 概率*P_{ti}*,通过式

$$P_{tz}(t_k) = 1 - \prod_{j=1}^{m} (1 - P_{tj})$$
(10)

得到时刻t_k的综合发现概率P_{tz}(t_k),其中: m为该时 刻探测到无人机的雷达数量, P_{tj}为第j部雷达对无人 机的发现概率,结合无人机的状态,根据该雷达的波 段和极化方式,通过RCS数据表中选取相应的RCS数 据,由式(5)计算得到.

根据雷达分布密度 ρ_R 决定步长 λ . 设 ρ_c 为临界分 布密度, 在 $\rho_R \leq \rho_c$ 的区域, 通过单一RCS值来计算综 合发现概率并采用标准RRT方法扩展RRT. 而在 $\rho_R > \rho_c$ 的区域, 则切换为较短的 λ , 并采用上述两条改进策 略扩展RRT. 采用变步长策略后, 算法能够针对不同 威胁密度合理选择RRT生长方式, 提高了算法效率和 适应性.

4 仿真实验(Simulations)

在Intel 2.0 GHz CPU, 2 G内存的硬件条件下,由 Microsoft Visual Studio C#.net编程进行仿真实验.为 简化计算,设隐身无人机以马赫数0.4,在1000 m高度 做低空突防飞行,敌方雷达均为常规S波段陆基三坐 标防空雷达,并通过限制最大转弯角速度 $\dot{\theta}_{max}$,使得 无人机仅进行小机动飞行.这时,隐身无人机的RCS 曲线受雷达俯仰视线角的影响较小.因此,仿真实验 仅考虑平视照射和HH极化情况^[5],使用RCS数据表 中水平周向的S波段HH极化数据,如图4所示,相应的 单一RCS值 $\sigma_i = 0.1$.所有雷达均采用相同的航迹准 则: $N = 10, l = 3; c_1 \pi c_2$ 根据具体雷达的性能进行 设定^[3];雷达发现目标的概率阈值为 $P_{ac} = 0.1$;另设 定 $P_t \ge 0.05$ 为高发现概率状态,用于评估整条路径 的安全程度.





仿真实验将首先对算法在处理隐身突防航迹规划 特性1和特性2时的有效性进行验证,然后在复杂雷达 威胁场景中进行了航迹规划,并且验证了算法在直接 考虑滚转角情况下的可行性.最后同经典方法进行了 对比研究.

4.1 面向特性1的算法有效性验证(Validity of the algorithm for character 1)

针对特性1,算法通过姿态角融合,以控制节点处 无人机相对雷达的RCS值.本节通过单部雷达布置在 无人机始末点连线上的场景来验证改进策略的效果. 在该场景中,隐身无人机在避让威胁区域时,其周向 至少180°角域均会受到雷达照射,充分体现了其RCS 分布特点,从而可以验证算法处理隐身无人机动态 RCS特性的有效性.

设置 60×60 km的 突防 区域, 雷达坐标为 (30, 30) km, 起始点(30, 5) km, 目标点(30, 55) km, 以 R_{max} = 40 km的圆标定雷达最大探测范围($\sigma_i = 0.1$, $P_{dc} = 0.1$). 分别采用改进RRT方法和采用单一RCS值的标准RRT方法执行了1000次仿真.

图5中的粗实线为1000次仿真的典型航迹.由 图5(a)可见,无人机进入雷达探测区域内之后,不断调 整与雷达的夹角,对照图6(a)可见,虽然 X_{radar} 中航迹 点的 P_t 显著提高,但是未连续出现 $P_d > 0.1$ 的情况. 而采用标准RRT方法时(图5(b)),无人机绕过了 X_{radar} ,但图6(b)显示沿雷达探测区域的航迹持续处 于高发现概率状态($P_t > 0.05$).

由表2中1000次仿真相关数据的统计结果可见,虽 然两种方法都能获得了安全飞行路径,但是采用改进 RRT算法的高发现概率出现的次数更少,均值更低, 因此航迹安全性更高.而且,改进算法所得平均飞行 距离更短.这是因为,当由改进算法树节点 V_{MRRT} 状态 (p,q,θ) 计算得到的雷达方位视线角 θ_{Re} 落在无人机 头向± φ_n ,侧向± φ_s 以及尾向± φ_t 角域内时,相应的 RCS值 $\sigma(\theta_{\text{Re}}) < \sigma_i$,这时 V_{MRRT} 能够存在于雷达威胁 区域 X_{radar} 中。因此由图5(a)可见,改进算法所得航迹 能够从 X_{radar} 中穿过,而不必如标准算法那样必须保 持在 X_{radar} 之外(图5(b)),在概率上减小了规避威胁的 绕行距离.







图 5 单部雷达场景的典型航迹

Fig. 5 The typical routes in the single radar scenario





表 2 单部雷达场景下1000次仿真的统计结果 Table 2 The statistics of 1000 simulations in the single radar scenario

	改进RRT方法	标准RRT方法
平均飞行距离/km	69.324	77.881
平均高发现概率次数	22.643	49.000
高发现概率均值	0.079	0.082

可见,在单部雷达威胁场景下,改进RRT算法通过 控制各节点处飞行姿态,充分利用了隐身无人机的重 点RCS减缩角域,得到了合理的穿越航迹.因此改进 策略很好的体现了特性1.

4.2 面向特性2的算法有效性验证(Validity of the algorithm for character 2)

算法中针对特性2的改进策略是在姿态角融合的 基础上加入了滚动时域策略,以控制一段航迹上雷达 确认发现无人机的概率.两部雷达的重叠探测区域 X_{ol}是高雷达威胁密度区域的典型威胁形式.穿越X_{ol} 时,无人机的周向360°角域均会受到照射,其中高 RCS区域容易受到两部雷达的交替照射,因此必须避 免高发现概率的持续出现.因此,本节通过该场景来 验证算法对特性2的处理能力.

设置 60 × 60 km 的 突防 区 域, 雷 达 坐 标 为(30, 12) km和(30, 48 km, 起 始 点 为(5, 30) km, 目 标 点 为 (55, 30) km, 采用改进RRT方法进行1000次仿真, 并与标准RRT方法以及传统突防路线进行了对比.

图7为所得路径. 由图7(a), 改进的RRT方法能够 在X。1中利用飞行方向调整,使得无人机以两部雷达 发现概率均较小的航向飞行,并在适当位置做出 了3次比较明显的转弯机动切换姿态,得到穿越航迹, 对照图8(a)可见, P_t的3个峰值分别发生在3次转弯时 刻,但持续时间很短,实现了到下一个有利飞行航向 的快速切换.另外两种方式则均未能实现成功穿越; 标准RRT方法的RRT布满了整个左半区域,但未能找 到可行路径(图7(b)); 而采取相对于两部雷达等距穿 越到达目标点的传统突防线路(图7(c)),出现了连 续9次 $P_{t} > 0.1$ 的情况(图8(b)),已满足航迹准则,无 人机已被发现,规划失败.这是由于雷达威胁重叠区 域 $X_{ol} \subset X_{radar}$,因此标准**RRT**方法生成的树节点也 无法存在于X_o中,即无法获得穿越X_o的航迹.而对 于改进RRT方法,由第2.3节,如果采取合适的飞行姿 态,当树节点V_{MBBT}的所在航迹段的发现概率能够满 足条件 $P_a < P_{ac}$ 时, V_{MRRT} 能够存在于 X_{ol} 中, 即 X_{ol} 中具备了存在可行路径的条件,又由于RRT方法具有 概率完备性,因此当X_{ol}中存在贯通区域X_T时,则一 定能够在X_T搜索得到可行路径. 另外,表3中各项数 据说明改进RRT方法的计算结果在1000次仿真中都 具有较好的稳定性.





图 7 两部雷达场景的航迹规划结果







由此可见,两部雷达的威胁场景下,改进RRT算法 能够根据动态RCS模型找到安全的飞行姿态,并能通 过机动避免高发现概率的状态的连续出现,实现穿越,因此,使得特性1和特性2均得到较好处理.

表3	两部雷达场景下1000次仿真的统计结果

Table 3 The statistics of 1000 simulations in the dual radars scenario

	改进RRT方法	标准差
平均飞行距离/km	63.239	4.837
平均高发现概率次数	32.601	3.575
高发现概率均值	0.083	0.009

4.3 复杂场景中算法有效性验证(Validity of the algorithm in highly complex scenarios)

真实战场条件下,防空雷达网构成非常复杂,而且 雷达的分布密度非常不均匀.因此,本节将验证算法 在复杂雷达环境下的可行性.

在200×200 km区域内分别设置了9部和10部雷达的两种场景.这两个场景在大量工作中被用于验证不同航迹规划算法对复杂环境的适应能力^[30-31].起始点(20,20) km,目标点(180,180) km,分别采用加入变步长策略的改进RRT方法和标准RRT方法进行对比.为验证算法对考虑滚转角影响情况的适应性,本部分还采用了水平照射±30°俯仰角范围内的RCS数据,直接对雷达俯仰视线角进行了控制.

图9-11为航迹规划的结果.对比图9和图10可见, 改进RRT方法获得了从雷达布置密度较高的区域中 安全穿越的路径.由表4中的统计结果可见,本文方法 获得的飞行距离更短.图9(a)和图10(a)对RRT节点做 了标记,可以看到,雷达威胁密度较高的区域中的节 点生长步长明显减小,从而使得无人机在高威胁区域 中能够更加精确地调整飞行姿态,控制无人机在航迹 上各位置的RCS值.此外,变步长策略还显著缩小了 RRT树的规模,并且增强了航迹平滑性.

对比图9(a)、图10(a)和图11可见,当直接使用动态RCS模型控制滚转时,航迹更为曲折,这是由于无人机采取了更灵活和细致的飞行姿态变化策略.但是,规划所得航迹的飞行距离也会有所提高(见表4).













由以上复杂场景的仿真结果说明,改进RRT算法 能够根据区域雷达威胁密度切换RRT生长步长,进行 自适应航迹规划,并且飞行距离更短.





Fig. 11 The routes generated considering the pitch angle of radar sight

表 4 复杂环境中1000次仿真的统计飞行距离 Table 4 The statistics distance of 1000 simulations in two complex scenarios

场景	改进RRT (水平RCS)	改进 RRT (考虑滚转)	标准RRT
9部雷达/km	302.84	307.29	335.47
10部雷达/km	316.41	318.45	346.11

4.4 方法对比(Comparison of different methods)

为了进一步验证本文方法在处理隐身突防航迹规 划的两个特性时的优势,本节将改进RRT算法与基于 边界跟踪的A_{2D}路径规划方法和基于采样的PRM方 法进行比较.这两种方法作为经典的路径规划方法, 均可用于实时航路规划应用中.下面进一步在前面提 到的单部,两部和10部雷达的场景中与这两种方法进 行比较,结果见图12-14.

通过与改进RRT方法规划结果比较可见:两种算法均未考虑隐身无人机动态RCS特性,因此,虽然获得了可行路径(见图12,14),但是都只能从标识威胁区域之外通过,无法通过RCS管理来获取更短的突防航迹(见表5).而且,由于未能考虑雷达工作的特点:在

图13(a)中, A_{2D}的航路呈现出跟踪威胁区域边界的特性, 再考虑到 X_{free} 的限制, 未得到可行路径; 图13(b)中, PRM方法无法在X_{ol}中随机采样, 因此连线采样点也无法得到可行路径. 此外, 虽然针对特性1和2的改进策略增加了计算复杂度, 但变步长策略保证了算法效率, 如表5所示, 改进RRT方法所需要的规划时间仍然远远小于PRM和A_{2D}算法.

















5 结论(Conclusion)

本文提出了基于改进RRT方法的隐身突防航迹规 划方法,对隐身无人机在密集雷达威胁场景下如何利 用其自身的隐身性能实现安全突防的问题进行了研 究.充分利用RRT方法的采样特点,并通过引入姿态 角信息融合、滚动时域以及变步长策略对标准RRT 算法进行改进,将动态RCS和雷达的发现准则融入到 树节点的生长中.基于某型无人机的真实RCS数据的 仿真实验结果表明,该改进算法对离散模型具有良好 的适应性,能够有效处理隐身突防航迹规划的两个 特性,并且在复杂环境下能够快速高效生成到达目的 地的安全路径,算法具有实用价值.

表 5 3种方法规划结果对比

Table 5 Planning results generated by three methods

场景	方法	行距离/km	总规划时间/ms
	改进RRT	69.3	0.69
单雷达	$A_{2\mathrm{D}}$	71.7	2.4
	PRM	70.5	5.6
	改进RRT	63.2	0.32
双雷达	$A_{\rm 2D}$	—	
	PRM		—
	改进RRT	304.4	95.9
10雷达	$A_{2\mathrm{D}}$	2312.1	1065.5
	PRM	302.7	410.8

参考文献(References):

- KATHLEEN M, TAMER I, WOHLETZ J, et al. Low-observable nonlinear trajectory generation for unmanned air vehicles [C] //Proceedings of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control. Hawai'i, USA: IEEE, 2003: 3103 – 3110.
- [2] 黄长强. 无人作战飞机精确打击技术 [M]. 北京: 国防工业出版社,
 2011: 10 16.
 (HUANG Changqiang. Precision Strike Technology for UCAV [M].

Beijing: National Defence Industry Press, 2011: 10 – 16.)

- [3] FREDERICK H Z III. UCAV Path planning in the presence of radar guided surface-to-air missile threats [D]. Michigan: The University of Michigan, 2005: 12 – 29.
- [4] LI Y, HUANG J, HONG S, et al. A new assessment method for the comprehensive stealth performance of penetration aircrafts [J]. *Aerospace Science and Technology*. 2011, 15(7): 511 – 518.
- [5] 张考, 马东立. 军用飞行器生存力与隐身设计 [M]. 北京: 国防工业 出版社, 2002: 8 – 14, 193 – 199.
 (ZHANG Kao, MA Dongli. *Military Aircraft Survivability and Stealth Design* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002: 8 – 14, 193 – 199.)
- [6] TAMER I, MEHMET K M, RICHARD M M. A framework for lowobservable trajectory generation in presence of multiple radars [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2008, 31(6): 1740 – 1749.
- [7] MERRILL I S. 雷达系统导论 [M]. 第3版. 左超声, 徐国良, 马林, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2006: 23-67.
 (MERRILL I S. *Introduction to Radar Systems* [M]. 3rd Edition. ZUO Chaosheng, XU Guoliang, MA Lin, et al, translated. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006: 23-67.)
- [8] MYRON H, GARY M. Route planning issues for low observable aircraft and cruise missiles, AD–A282 428 [R]. Washington: United States Air Force, 1994: 6 – 11.
- [9] LI Y, WU Z, HUANG P L, et al. A new method for analyzing the integrated stealth ability of the penetration aircraft [J]. *Chinese Journal* of Aeronautics, 2010, 23(2): 187 – 193.

- [10] 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 Ze. Model 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.)
- [11] PIERRE T K, SEMYON M M, FREDERICK H Z III. Optimal path planning foe unmanned combat aerial vehicles to defeat radar tracking [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2006, 29(2): 279 – 288.
- [12] MCFARLAND M B, ZACHERY R A, TAYLOR B K. Motion planning for reduced observability of autonomous aerial vehicles [C] //Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Control Applications. Hawai'i, USA: IEEE, 1999: 231 – 235.
- [13] 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]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(5): 868 871.)
- [14] FRANK W M. Radar cross-section reduction via route planning and intelligent control [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2002, 10(5): 696 – 700.
- [15] 晏青, 熊峻江, 游思明. 基于行为协同和虚拟目标相结合的无人机实时航路规划 [J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(9): 1115 1121. (YAN Qing, XIONG Junjiang, YOU Siming. Real-time programming method for flight path of unmanned vehicle based on dynamic RCS [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(9): 1115 – 1121.)
- [16] 武善杰,郑征,蔡开元.基于行为协同和虚拟目标相结合的无人机实时航路规划 [J]. 控制理论与应用, 2011, 28(1): 131 136.
 (WU Shanjie, ZHENG Zheng, CAI Kaiyuan. Real-time path planning for unmanned aerial vehicles using behavior coordination and virtual goal [J]. Control Theory & Applications, 2011, 28(1): 131 136.)
- [17] JOHN J III. Search for a stealthy flight path through a hostile radar defense network [D]. California: Naval Postgraduate School, 1995: 24 – 34.
- [18] DANIEL M M. The effect of target location uncertainty in game theoretic solution to optimal trajectory formulations [D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2005: 37 – 49.
- [19] NORBERT J K III. Optimal aircraft routing in a constrained pathdependent environment [D]. California: Naval Postgraduate School, 2007: 19 – 23
- [20] LAVALLE S M. Planning Algorithms [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006: 185 – 309.
- [21] KARAMAN S, WALTER M R, PEREZ A, et al. Anytime motion planning using the RRT* [C] //Proceedings of IEEE International Conference Robotics and Automation. Shanghai: IEEE, 2011: 1478 – 1483.
- [22] SIM'EON T, LAUMOND J P, NISSOUX C. Visibility based probabilistic roadmaps for motion planning [J]. Advanced Robotics, 2000, 14(6): 477 – 493.
- [23] HSU D, LATOMBE J C, MOTWANI R. Path planning in expansive configuration spaces [J]. *International Journal of Computational Geometry & Applications*, 1999, 3(4): 495 – 512.
- [24] STEVEN M L, JAMES J K. Randomized kinodynamic planning [J]. The International Journal of Robotics Research, 2001, 20(5): 378 – 400.
- [25] YOSHIAKI K, GASTON F, EMILIO F. Real-time motion planning with applications to autonomous urban driving [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2009, 17(5): 1105 – 1118.
- [26] 任佳,高晓光,张艳.移动威胁情况下的无人机路径规划 [J]. 控制理 论与应用, 2010, 27(5): 641 – 647.

(REN Jia, GAO Xiaoguang, ZHANG Yan. Path planning based on model predictive control algorithm under moving threat [J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(5): 641–647.)

- [27] 郦能敬, 王被德, 沈齐, 等. 对空情报雷达总体论证——理论与实 践 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 446 454.
 (LI Nengjing, WANG Beide, SHEN Qi, et al. Air Surveillance Radar System Analysis [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2008: 446 454.)
- [28] 杨振起,张永顺,骆永军,等.双(多)基地雷达系统 [M].北京:国防 工业出版社, 1998: 118 – 129.
 (YANG Zhendong, ZHANG Yongshun, LUO Rongjun, et al. *Bistatic* (*Multistatic*) Radar System [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998: 118 – 129.)
- [29] 刘伟,郑征,蔡开元,等. 快速平滑收敛策略下基于QS-RRT的UAV运动规划 [J]. 中国科学: 信息科学, 2012, 42(11): 1403 1422.
 (LIU Wei, ZHENG Zheng, CAI Kaiyuan, et al. QS-RRT based motion planning for unmanned aerial vehicles using quick and smooth convergence strategies [J]. Science China: Information Science, 2012, 42(11): 1403 1422.)
- [30] 顾诵芬. 飞机总体设计 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001: 120-123.

(GU Songfen. *Aircraft Conceptual Design* [M]. Beijing: Beihang University Press, 2001: 120 – 123.)

- [31] KIM Y, GU D W, IAN P. Real-time path planning with limited information for autonomous unmanned air vehicles [J]. *Automatica*, 2008, 44(3): 696 – 712.
- [32] ZHENG Z, WU S J, LIU W, et al. A feedback based CRI approach to fuzzy reasoning [J]. *Applied Soft Computing*, 2011, 11(1): 1241 – 1255.

作者简介:

莫 松 (1982-), 男, 博士研究生, 研究方向为飞行器总体设计、

隐身技术, E-mail: neomo112@gmail.com;

黄 俊 (1964-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为飞行器总体 设计、作战效能分析、隐身技术, E-mail: junh@china.com;

郑 征 (1980-), 男, 副教授, 博士生导师, 研究方向为任务规 划, 路径规划、智能决策、机器学习, E-mail: zhengz@buaa.edu.cn;

刘 伟 (1981-), 男, 博士研究生, 讲师, 研究方向为路径规划、 智能决策, E-mail: weil@asee.buaa.edu.cn.