

基于 RCS 建模的反射式脉冲雷达跟踪预测方法

郑孝天，陈 勇

(太原卫星发射中心，山西 岢岚 036301)

摘要 目标雷达截面积 RCS (Radar Cross Section) 直接影响反射式脉冲雷达的跟踪，应用模型计算，可以预测雷达的跟踪距离。对 RCS 的基本特点与计算模型进行了分析；结合飞行器特点，在飞行器静态 RCS 计算建模中，对头部与主体分别进行了建模计算，并完成了合成建模；结合飞行器实际飞行过程特点，以统计的方法建立了动态 RCS 计算模型。以此模型预测雷达跟踪距离，经实际检验，效果良好。

关键词 雷达；目标雷达截面积；数学建模；跟踪预测

0 引言

某初始段测量雷达作为靶场首区无线电外测设备，担负着靶场首区飞行器的外弹道测量任务，其实时测量数据作为靶场安控系统的信息源，是靶场飞行试验安全的重要保障。但是在执行飞行试验任务的过程中，设备人员对任务弧段的确定缺少定量计算，没有预测雷达最大跟踪距离，对完成任务的风险评估不完善。

此初始段测量雷达为脉冲体制雷达，采用反射式跟踪。在飞行试验中，目标飞行器的雷达截面积 RCS 作为变量直接影响雷达的跟踪距离。本文主要通过对目标飞行器的雷达截面积进行分析，建立数学模型，应用模型进行计算，预测雷达的跟踪距离，对比任务弧段要求的距离值，完善对雷达完成任务的风险评估。

1 RCS 的定义^[1]

1.1 RCS 的定义

反射式雷达是利用目标的散射功率来发现目标。当雷达向一定空域发射电磁波，电磁波遇到障碍物后会被散射回来，雷达接收到该散射信号，就会发现目标。散射功率的大小和目标所在点的发射功率密度 S_1 以及目标特性有关。用目标的散射截面积 σ （其量纲为面积）来表征其散射特性。若假定目标可将接收到的功率无损耗地辐射出来，则可得到由目标散射的功率（二次辐射功率）为：

$$P_2 = \sigma S_1. \quad (1)$$

式中， P_2 为目标散射的总功率。由于二次散射，因而在雷达接收点处单位立体角内散射功率 P_Δ 为：

$$P_\Delta = \frac{P_2}{4\pi} = S_1 \frac{\sigma}{4\pi}. \quad (2)$$

据此，雷达截面积 σ 可以表示为：

$$\sigma = 4\pi \cdot \frac{\text{返回接收机每单位立体角内的回波功率}}{\text{入射功率密度}}. \quad (3)$$

σ 定义为：在远场条件（平面波照射）下，目标处每单位入射功率密度在接收机处每单位立体角内产生的反射功率乘以 4π 。测量目标的 RCS 可按雷达方程定义来完成，式（4）就是收发共用天线雷达方程的通用形式。

$$\sigma = \frac{R^4(4\pi)^3 K T_b B L (S/N)}{P_r G^2 \lambda^2}. \quad (4)$$

式中， R 为雷达作用距离； K 为玻尔兹曼常数； T_b 为系统噪声温度； B 为系统噪声带宽； L 为系统损耗； (S/N) 为对应作用距离的信噪比； P_r 为发射机峰值功率； G 为天线增益； λ 为雷达工作波长。

1.2 影响 RCS 的因素

目标的截面除了与目标本身性能有关外，还与视角、极化和入射波波长有密切关系，其中与波长关系最大。根据波长与截面之间的关系，目标截面可分为 3 个区域：

① 瑞利区。目标尺寸小于雷达波长，即 $2\pi r/\lambda \ll 1$ ，这里 r 为球的半径， λ 为雷达工作波长。当波长变短，即频率升高时，雷达截面积将增大。雨滴处于这一区域。

② 光学区。目标尺寸大于雷达波长，即 $2\pi r/\lambda \gg 1$ 。在这个区域，目标的雷达截面积趋于稳定，不随波长而变化。大部分的雷达目标包括火箭、导弹都处于光学区。

③ 谐振区。它处于以上 2 个区域之间，目标的尺寸与波长相近，在这个区域 RCS 随着波长的变化呈现振荡。

1.3 简单散射体 RCS 数学模型

对于一些复杂目标，例如飞机、舰艇和火箭等，都由简单形状构成。在分析其 RCS 时，可将其分解为许多独立的散射体。表 1 为一些简单目标的 RCS 模型。

表 1 简单散射体 RCS 数学模型

目标类型	雷达波入射角	RCS 模型
半径为 r 的球体	任何角度	πr^2
面积为 A 的大平板	法线方向	$4\pi A^2 / \lambda^2$
边长为 a 的三角形反射器	平行于对称轴	$4\pi a^4 / 3\lambda^2$
长为 L ，半径为 a 的圆柱体	垂直于对称轴	$4\pi aL^2 / \lambda$

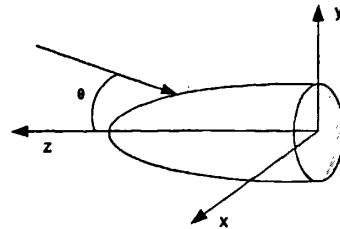


图 1 飞行器头部 RCS 分析坐标

2 RCS 的计算建模

2.1 目标飞行器静态 RCS 计算建模

对于某脉冲雷达的目标飞行器，大部分都由理想导体材料构成，其高频散射特性主要来源于：飞行器表面（如弹头、弹体）的镜面散射；表面不连续性（如边缘、拐角）绕射；相互作用散射。

为了简化计算，采用部件分解法，同时不考虑表面不连续性绕射的影响。根据目标外形建模特点，将飞行器分解为头部、主体 2 个部分的散射体进行计算。对应的散射来源为旋转抛物体的镜面散射、圆柱体的镜面散射。对于镜面散射，采用物理光学法进行处理。

2.1.1 飞行器头部 RCS 计算建模

对于此脉冲雷达的目标飞行器，其头部可用旋转抛物体来表征。为了便于分析，建立如图 1 所示的坐标系。

飞行器头部对雷达电磁波的散射主要表现为旋转抛物体的镜面散射。镜面散射具有很强的方向散射特性，在某一入射方向后向一个很小的立体角范围内散射很强，在其它方向散射较弱。镜面散射 RCS 的大小取决于镜面反射点处表面曲率半径和反射系数。假设飞行器头部母线方程为：

$$\begin{cases} x = \rho(z) \cos \alpha \\ y = \rho(z) \sin \alpha \end{cases} \quad (5)$$

则其对于此脉冲雷达的 RCS 模型为^[2]：

$$\sqrt{\sigma} = \sqrt{\frac{k}{j \sin \theta}} \int_{z_1}^{z_2} \sqrt{\rho} [\sin \theta - \rho'(z) \cos \theta] \exp[-j2k(\rho \sin \theta + z \cos \theta)] dz. \quad (6)$$

式中， k 是自由空间波数 ($k=2\pi / \lambda$)， θ 为入射角。

2.1.2 飞行器主体 RCS 计算建模

对于此脉冲雷达的目标飞行器，其主体可用圆柱体来表征。为了便于分析，建立如图 2 所示的坐标系。

飞行器主体对雷达电磁波的散射主要表现为圆柱体的镜面散射。其散射主要集中在入射角 $\theta=90^\circ$ 附近很小区域，考虑到圆柱形主体是单弯曲几何形体，故采用物理光学法计算 RCS，其对于此脉冲雷达的 RCS 模型为^[3]：

$$\sqrt{\sigma} = jL \sqrt{krsin\theta} \frac{\sin(kLcos\theta)}{kLcos\theta} \exp(j2kcos\theta) \exp(j2krsin\theta) \exp\left(-j\frac{\pi}{4}\right). \quad (7)$$

式中， L 为圆柱体的长度， r 是圆柱体的半径。

2.1.3 飞行器 RCS 合成

采用部件分解法将目标飞行器分解为几个独立的散射体，每一个独立散射体的尺寸仍处于光学区，在各部分没有相互作用的条件下，飞行器总的 RCS 为各小散射体 RCS 的矢量和^[1]，即

$$\sigma = \left| \sum_{n=1}^N \sqrt{\sigma_n} \exp(j2kR_n) \right|^2. \quad (8)$$

式中, σ 为飞行器的 RCS; σ_n 表示第 n 个散射中心的 RCS; R_n 为第 n 个散射中心到雷达的距离。

2.2 目标飞行器动态 RCS 计算建模

对于此脉冲雷达的目标飞行器, 其 RCS 一般来说十分复杂, 随目标姿态角的变化, 各散射源的场或是同相或是反相, 相互干涉, 使得总 RCS 急剧起伏。飞行器的电尺寸越大, 这种起伏变化越显著^[4]。

飞行试验过程中, 由于目标不停运动, 视角随时间不停变化, 飞行环境扰

动影响会造成飞行器姿态的扰动, 目标飞行器对于雷达的姿态以及视角无法精确定量。因此, 用统计的概念来描述雷达截面积最为合适, 所用统计模型应尽量和实际目标雷达截面积的分布规律相同。对于目标飞行器, 其雷达截面积分布接近对数正态分布。其概率密度函数为^[1]:

$$p(\sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} S_d \sigma} \exp \left\{ -\frac{1}{2S_d^2} \left[\ln \left(\frac{\sigma}{\sigma_m} \right) \right]^2 \right\}, \quad \sigma > 0. \quad (9)$$

式中, S_d 为 $\ln \left(\frac{\sigma}{\sigma_m} \right)$ 的标准偏移; σ_m 为 σ 的中值; σ 的值和中值之比均为 $\exp \left(\frac{S_d^2}{2} \right)$ 。

3 RCS 模型应用

对于某脉冲雷达来说, 一次飞行试验, 完成制定任务弧段内的跟踪测量是基本要求, 即雷达的最大跟踪距离要大于任务弧段内的目标飞行器的距离值。对于跟踪预测, 即要求在飞行试验前, 预测出雷达对目标飞行器的最大跟踪距离, 对比任务弧段内的目标飞行器的距离值, 进行任务风险评估。分析雷达方程:

$$R^4 = \frac{P_d G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 K T_s B L (S/N)}. \quad (10)$$

可以得出, 在飞行试验中, R 、 σ 为变量, 其他参数为定量, 或者在飞行试验前通过测量可以确定。根据式(8)计算出雷达截面积 σ 的中值 σ_m , 在发现概率 P_d 和脉冲积累数确定的情况下, 根据目标飞行器动态 RCS 模型查表, 得出雷达检测因子 D_0 , 对应雷达方程中的 $(S/N)_{min}$, 最终计算出雷达作用距离 R 。

对一次飞行试验进行计算, 查表 $(S/N)_{min}$ 对应为 12dB, 计算 σ_m 为 $3m^2$, 将其他参数一并代入式(10), 则

$$R(dB) = [P_d + 2G + 2\lambda + \sigma_m - (4\pi)^3 K T_s B L - (S/N)]/4 = 50.5 \text{ dB}; R = 10^{5.05} = 112.2 \text{ km}.$$

所以, 预测最大跟踪距离 R_{max} 为 112.2 km。在此次飞行试验中, 雷达实际跟踪距离为 118 km。

从预测结果来看, 预测跟踪距离满足任务弧段要求, 同时, 预测距离值与实际跟踪距离值相差不大, 说明预测结果可信, 预测方法可行。

4 结束语

反射式脉冲雷达作为航天靶场的测量设备, 对其完成任务进行风险评估, 对跟踪测量进行预测判断, 有着相当的必要性。本文针对设备完成任务的风险评估不完善、跟踪预测不全面以及对任务弧段的确定缺少定量计算等问题, 通过对雷达目标飞行器的截面积进行分析, 建立了数学模型, 应用模型进行计算, 预测出雷达的跟踪距离, 完善了对雷达完成任务的风险评估。

参考文献

- [1] 丁鹏飞, 耿富录. 雷达原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002.
- [2] 张云飞, 武哲, 陆柱蕙. 导弹 RCS 计算[J]. 北京航空航天大学学报, 2000, (3).
- [3] Michael IA. Equivalent edge currents for arbitrary aspects of observation[J]. IEEE Trans and Propagation, 1984, 32(3): 252-258.
- [4] 赵卫华, 邓发升, 甄蜀春. 飞航导弹雷达截面预估[J]. 雷达与对抗, 2001, (4).

作者简介

郑孝天 男, 助理工程师/学士。主要研究方向: 雷达跟踪技术。

陈 勇 男, 高级工程师/硕士。主要研究方向: 航天测控总体技术。

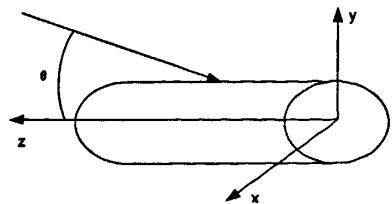


图 2 飞行器主体 RCS 分析坐标

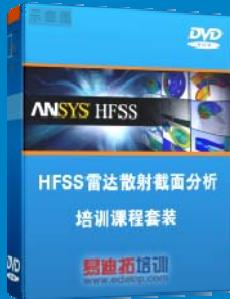
雷达散射截面（RCS）分析培训课程

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养，是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

雷达散射截面（Radar Cross Section，简称 RCS）是雷达隐身技术中最关键的概念，也是电磁理论研究的重要课题，使用 HFSS 软件可以很方便的分析计算各种目标物体的 RCS。

由易迪拓培训推出的《HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装》是从零讲起，系统地向您讲授如何使用 HFSS 软件进行雷达散射截面分析的全过程。该套视频课程由专家讲授，边操作边讲解，直观易学。

HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装



套装包含两门视频培训课程，其中：《两周学会 HFSS》培训课程是作为 HFSS 的入门培训课程，帮助您在最短的时间内迅速熟悉、掌握 HFSS 的实际操作和工程应用；《HFSS 雷达散射截面(RCS)分析》培训课程是专门讲授如何使用 HFSS 来分析计算雷达散射截面，包括雷达散射截面、单站 RCS、双站 RCS 等的定义，实例讲解使用 HFSS 分析单站 RCS、双站 RCS 和宽频 RCS 的相关设置和实际操作等。视频课程，专家讲授，从零讲起，直观易学...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/130.html>

● 更多培训课程：

● **HFSS 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

● **CST 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

● **天线设计培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>