

# 典型目标 RCS 的初步估算及仿真

李晓东, 白桂明, 谭晓晨

(中国人民解放军 63961 部队, 北京 100012)

**摘要:** 利用几何分解法将复杂目标分解为有限个独立的、简单的散射体, 进行目标 RCS 的初步估算; 并以 AGM-109H 战斧巡航导弹为典型目标进行仿真, 与其 1:1 物理模型外场实测 RCS 数据进行对比分析。分析表明, 利用几何分解法估算复杂目标 RCS, 可以获得比较准确的并能满足工程实用的结果。

**关键词:** 雷达; 巡航导弹; RCS 估算; 仿真

中图分类号: TN951      文献标识码: A      文章编号: 1672-2337(2006)06-0332-03

## Preliminary Estimation and Simulation of RCS of Typical Object

LI Xiao-dong, BAI Gui-ming, TAN Xiao-chen

(PLA 63961 troops, Beijing 100012, China)

**Abstract:** In order to perform the preliminary estimation of target RCS, a complex object can be disassembled to several independent and simple scatters by using geometry disassemble method. Then we make simulation, taking AGM 109H battle-axe cruise missile as typical object. Finally, we compared and analyzed the simulation result with the measured outfield RCS data of the AGM 109H battle-axe cruise missile's 1:1 physical model. The analysis indicates that the method is more accurate and can meet the need of paractical engineering.

**Key words:** radar; cruise missile; RCS estimation; simulation

### 1 引言

雷达对目标的探测能力与目标 RCS 的大小有直接关系。预先估计出目标的 RCS 值, 对预测雷达性能、进行雷达系统设计至关重要。然而, 实际的目标不仅具有复杂的结构外形, 而且为了尽可能减小自身的 RCS, 通常都采用多种隐身措施。再之 RCS 还是目标姿态角的敏感函数。因此, 精确估算目标的 RCS 非常困难。尽管可以从理论上利用经典的积分方程解法、物理光学法等等进行精确估计, 但其前提是首先要知道物体外形结构的精确解析描述, 以及各种边界条件等, 这在实际应用中仍有很大的难度。

本文提出, 对于复杂目标 RCS 的粗略估算, 采用简化的办法, 即首先将其复杂结构划分为有限个 RCS 可以定量描述的、独立的简单形体, 而后利用矢量叠加原理进行 RCS 合成。实验表明, 此方

法适用于几何外形可以分解, 而且每个独立散射体具有一个散射中心的复杂目标。

### 2 进行目标 RCS 估计的基础

#### 2.1 典型金属目标的 RCS

飞机和导弹类目标, 据其外形特点通常可分解为圆柱体、球(或球冠)体、平板、角反射器等独立的散射体。这些简单散射体的 RCS 的数学模型如表 1 所示(其中,  $k = 2\pi/\lambda$ , 为周波数)。

表 1 金属类目标的 RCS 模型

目标序号	目标几何形状	雷达波入射视角	RCS 模型
1	长为 $L$ 、半径为 $a$ 的圆柱体	$\epsilon$ 为入射波与对称轴法线方向的夹角	$\frac{2\pi a L^2}{\lambda} f_1(\epsilon)$
2	半径为 $a$ 的球体	任何角度入射	$\pi a^2$
3	几何面积为 $A$ 的平板	$\epsilon$ 为入射波与平板法线方向的夹角	$\frac{k^2 A^2}{\pi} f_2(\epsilon)$
4	长边为 $a$ 、短边为 $b$ 的两块平板组成的直两面角体	$\phi$ 为在平面内入射波与轴线法线方向的夹角, $\theta$ 为垂直轴平面内入射波与角分线方向的夹角	$\frac{k^2 a^2 b^2}{\pi} f_3(\theta, \phi)$

## 2.2 非金属类目标的 RCS

目标 RCS 值的大小主要取决于两个因素:一是目标的几何尺寸及外形结构,外形结构决定了雷达入射电磁波将以何种方式产生散射,即散射信号与物体几何尺寸及雷达波入射角的函数关系;二是目标的材料特性,材料特性决定了散射量的大小,即表面散射强度与材料电磁特性的函数关系。

物体表面的电磁反射特性用反射系数  $\rho$  表示,金属材料的反射系数为 1,即金属表面对电磁波产生全反射。而一般目标为了减小 RCS,均采用各种复合非金属材料,这类介质材料的表面电磁反射系数可由式(1)~式(3)导出:

$$\rho = |\Gamma| = \left| \frac{\sin\vartheta - \sqrt{\epsilon_c - \cos^2\vartheta}}{\sin\vartheta + \sqrt{\epsilon_c - \cos^2\vartheta}} \right| \quad (1)$$

式中,  $\vartheta$  为入射波与反射表面的夹角,  $\epsilon_c$  为复介电常数:

$$\epsilon_c = \epsilon_r - j60\lambda\mu \quad (2)$$

$$\mu = 2\pi f\epsilon_r\epsilon_0 \tan\delta_e \quad (3)$$

式中,  $\epsilon_r$  为相对介电常数,  $\lambda$  为雷达波长,  $\mu$  为导电率,  $\epsilon_0$  为真空介电常数,  $f$  为雷达频率,  $\tan\delta_e$  为材料损耗正切。

非金属材料的表面反射系数降低,致使非金属反射体反射电磁信号减少,非金属反射体的 RCS 与金属反射体 RCS 的关系可近似表示为

$$\sigma_{\text{非}} = \rho^2 \sigma_{\text{金}} \quad (4)$$

## 2.3 复杂目标的 RCS

大型复杂目标可分解为若干独立简单目标散射体的组合,而每个小散射体的尺寸仍处于光学区且相互独立,故总的 RCS 为各个小散射体 RCS 的矢量和,即

$$\sigma = \left| \sum_n \sqrt{\sigma_n} \exp(j2kd_n) \right|^2 \quad (5)$$

式中,  $\sigma$  为复杂目标的 RCS,  $\sigma_n$  为第  $n$  个散射体的 RCS,  $d_n$  为第  $n$  个散射体到雷达的距离,  $k$  为周波数 ( $k = 2\pi/\lambda$ )。

根据定义, RCS 是目标对平面入射波电磁散射的度量,因而其大小与距离无关。若假定目标以其中一个主散射体为散射中心,则只要求得其他各散射体在入射波视线方向与主散射体的距离

差,即可求得各个散射体 RCS 的矢量和。

## 3 典型目标 RCS 的仿真

### 3.1 目标的空间坐标关系

目标的 RCS 与目标姿态角密切相关,故首先应建立雷达入射波视线与目标的空间坐标关系,如图 1 所示。其中,目标的散射中心为机体的几何中心,雷达入射视线在  $xoy$  面上的投影与目标对称轴  $ox$  的夹角为  $\theta$  ( $0^\circ \sim 360^\circ$ , 目标对称轴线向前方向为  $0^\circ$ ), 雷达入射视线与目标对称轴  $ox$  的夹角为  $\alpha$ , 入射波与  $xoy$  平面的夹角为  $\varphi$  ( $0^\circ \sim 90^\circ$ ), 入射波与  $xoz$  平面的夹角为  $\beta$  ( $0^\circ \sim 90^\circ$ )。于是:

$$\begin{cases} \alpha = \arcsin(\sqrt{\sin^2\varphi + \sin^2\theta\cos^2\varphi}) & (0 \leq \varphi \leq 90^\circ) \\ \beta = \arcsin(\sin\theta\cos\varphi) & (0 \leq \varphi \leq 90^\circ) \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $\theta$  与  $\varphi$  为角度自变量,用以描述目标相对雷达入射波视线的空间姿态。

此外,实验中还假定:

- (1) 单个散射体表面为均匀连续平面;
- (2) 只考虑一次反射,不考虑透过波的二次反射;
- (3) 忽略边缘散射绕射效应和遮挡效应。

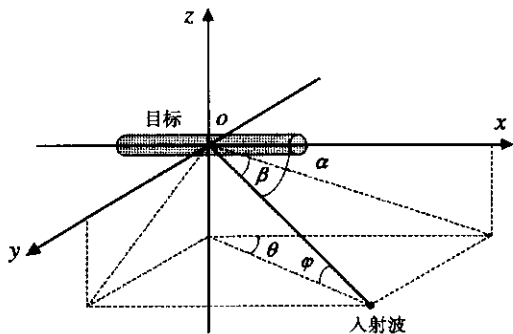
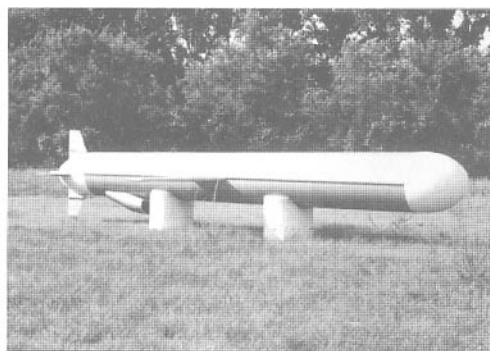


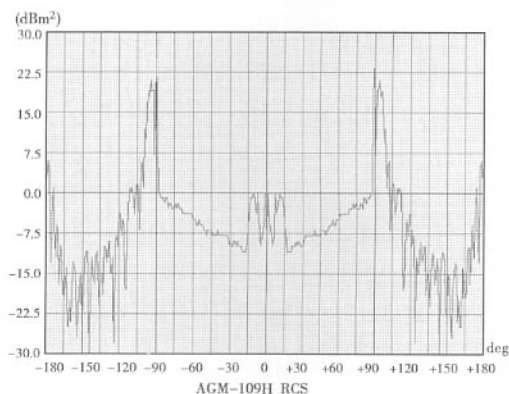
图 1 目标与入射波的空间坐标关系

### 3.2 几种典型目标 RCS 的仿真

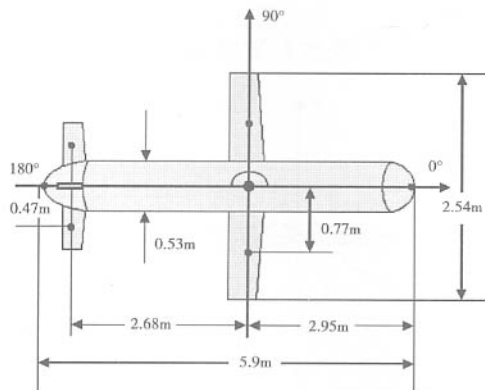
我们制作了 AGM-109H 战斧巡航导弹 1:1 物理仿真模型(图 2(a)),进行了 RCS 的外场测试,得到如图 2(b)所示的外场实测 RCS 数据。继之以 AGM-109H 作为典型目标,利用外形分解法将其分解为主弹体、水平舵翼和尾翼 3 个部分共 8 个主要散射体(见图 2(c)),进气道和出气道因形状复杂而忽略,在 S 波段对水平极化进行 RCS 仿真估算,得到如图 2(d)所示的仿真估算 RCS。



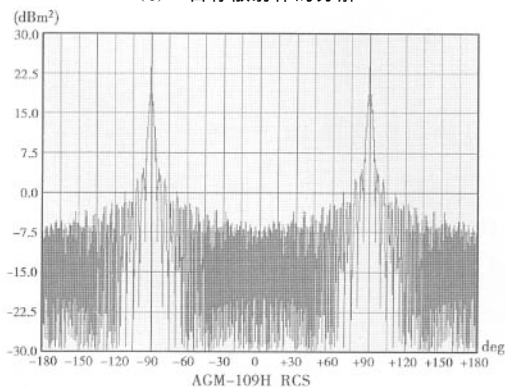
(a) 巡航导弹 1:1 物理仿真模型



(b) 仿真模型的外场实测 RCS 曲线



(c) 目标散射体的分解



(d) 仿真估算 RCS

图2 AGM-109H 战斧巡航导弹 RCS 的实测和仿真估算结果

由上述仿真结果可知:

(1) 除了迎头 $\pm 15^\circ$ 和尾部 $\pm 15^\circ$ 以外,其他角度的估算数据与实测数据基本吻合;

(2) 实测数据中迎头出现 $0.18 \sim 1 \text{ m}^2$ 、尾部出现 $0.18 \sim 3.5 \text{ m}^2$ 的起伏峰值,这主要是进气道和出气道的贡献;而仿真估算数据中由于忽略了该部分的影响,故未呈现出起伏峰值;

(3) 在迎头 $\pm 15^\circ$ 范围内,平均 RCS 数值小于 $0.18 \text{ m}^2$ ;在 $90^\circ$ 方向一定角度内,平均 RCS 大于 $1 \text{ m}^2$ ;在偏离垂直 $90^\circ$ 方向很小角度以外的其他区域,平均 RCS 在 $0.001 \sim 0.18 \text{ m}^2$ 之间起伏;

(4) 在垂直 $90^\circ$ 方向出现较大峰值,这主要是机体、垂直尾翼及翼根部分镜像反射的贡献。

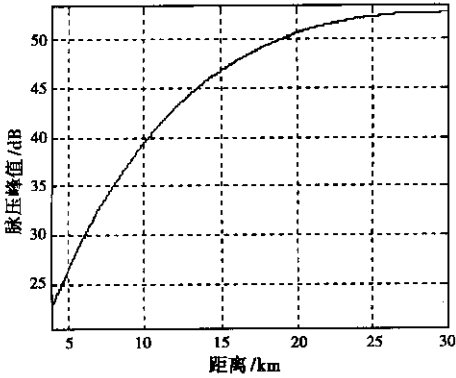
## 4 结束语

目标的外形结构决定了目标的电磁散射形式,所使用的材料则决定了目标电磁散射的强度。对于一般隐身目标,首先要考虑外部整形设计,以使强散射方向集中在很小角度范围内,使偏离该角度的大部分观测范围内的平均 RCS 大大降低;其次要采用吸波材料,使目标在全方向的平均 RCS 减小。

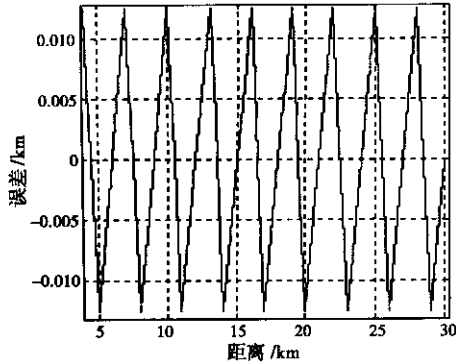
仿真估算与实测数据的对比分析表明:利用几何分解法估计复杂目标的 RCS,可以获得比较准确的并能满足工程实用的结果。预先估计目标 RCS,了解和掌握目标的雷达散射特性,对雷达系统设计、雷达作战部署方案优化等具有重要的指导意义。

## 参考文献:

- [1] Skolnik M I. 雷达手册[M]. 王军,等译. 北京:电子工业出版社,2003.  
Skolnik M I. Radar Handbook(Second Edition)[M]. Translated by Wang Jun, et al. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003. (in Chinese)
- [2] 丁鹭飞,耿富录. 雷达原理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2002.
- [3] 克拉特 E F. 雷达散射截面—预估、测量和减缩[M]. 北京:电子工业出版社,1988.



(a) 脉压峰值与距离的关系



(b) 距离误差与距离的关系

图 4 仿真结果

压对测量距离不产生影响,因此可以通过部分脉压的方法增大雷达的实际作用距离。此方法适合于大时宽的雷达体制。

参考文献:

[1] 丁鹭飞,耿富录. 雷达原理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2001.  
[2] 丁鹭飞. 雷达系统[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2000.  
[3] 黄桂根,高梅国. 线性调频信号在部分相关情况下的数字脉冲压缩分析[J]. 信号处理, 2005, 8(4A):483-487.

作者简介:



康丽艳 女,1982 年生于河北省,2004 年 7 月毕业于河北科技大学信息科学与工程学院,现为西安电子科技大学硕士研究生,主要从事高速实时信号处理方面的研究。



苏 涛 男,1968 年出生,博士,教授,硕士生导师,目前研究领域包括高速实时信号处理、并行处理及雷达信号处理快速算法等方面。

8 结束语

本文从理论上分析了对遮挡的回波信号进行部分脉压对脉冲压缩性能的影响,证明了部分脉

(上接第 334 页)

作者简介:



李晓东 男,1964 年 8 月生于辽宁凌源,硕士,现为中国人民解放军 63961 部队高级工程师,中国电子学会高级会员,从事雷达论证等方面的研究工作。



白桂明 男,1972 年 3 月生于辽宁沈阳,1995 年毕业于南京理工大学,2004 年北京理工大学硕士,现为中国人民解放军 63961 部队工程师,中国电子学会会员,从事光电火控论证等方面的研究工作。

谭晓晨 男,1981 年 8 月生于北京,2003 年毕业于中国人民解放军军械工程学院,学士,现为中国人民解放军 63961 部队助理工程师,从事雷达论证工作。

## 雷达散射截面 ( RCS ) 分析培训课程

易迪拓培训([www.edatop.com](http://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/>