

# 短波雷达目标散射截面的计算<sup>\*</sup>

杨正龙<sup>1</sup> 倪晋麟<sup>1</sup> 熊 邺<sup>2</sup>

(1. 南京电子技术研究所 南京 210013)

(2. 南京理工大学毫米波技术研究室 南京 210094)

**【摘要】** 利用矩量法( MOM )仿真计算了短波波段小型飞行器的雷达散射截面( RCS ),为了快速获得大型舰船的短波 RCS 则利用了图形电磁计算方法( GRECO )。通过对仿真结果分析和解释,计算结果是符合实际情况的,所开发的 GRECO 软件在大尺寸目标的 RCS 计算中是准确、高效的,可以为短波雷达系统的研究提供可信的仿真数据。

**【关键词】** 短波雷达,雷达散射截面,矩量法,图形电磁计算

## RCS Calculation of Radar Target in Short Wave Band

YANG Zheng-long<sup>1</sup> NI Jin-lin<sup>1</sup> XIONG Ye<sup>2</sup>

(1. Nanjing Research Institute of Electronics Technology Nanjing 210013)

(2. Millimeter Wave Technique Lab., Nanjing University of Sci. & Tech. Nanjing 210094)

**【Abstract】** In short wave band, the Method of Moment( MOM ) is used to calculate the Radar Cross Sectio( RCS ) of a small aircraft. To obtain the RCS of large target quickly, the Graphical Electromagnetic Computing( GRECO ) is used to calculate the RCS of large ship in almost real-time. The results are credible and can be used for the study of short wave radar system.

**【Key words】** short wave band radar, RCS, MOM, GRECO

## 1 引言

在短波雷达系统研究中,需要仿真计算一些目标的雷达散射截面 RCS。在此波段内,有些目标处于低频区(瑞利区)或谐振区,如小型飞行器,而有些目标则处于高频区(光学区),如舰船目标。当目标处于低频区或者谐振区时,利用矩量法可以准确地求得 RCS<sup>[2]</sup>。当目标处于光学区时,虽然理论上矩量法也可以计算出电大尺寸目标的 RCS,但由于计算机速度和内存的限制,利用矩量法来获得大型目标的 RCS 变得非常困难,需采用高频预估方法来快速获得目标的 RCS,常用的高频预估方法有物理光学法( PO )、几何光学法( GO )、物理绕射理论( PTD )及几何绕射理论( GTD )等<sup>[1]</sup>。

RCS 一般定义如下<sup>[1]</sup>

$$\sigma = 4\pi \lim_{R \rightarrow \infty} R^2 \frac{|\mathbf{E}^s|^2}{|\mathbf{E}^i|^2}$$

该定义方法消除了距离 R 的影响,使得 RCS 不取决于目标和雷达之间的距离。为表征散射回波与入射波的相位关系,可参照文献[1]将 RCS 重新定义如下

$$\sqrt{\sigma} = 2\sqrt{\pi} \lim_{R \rightarrow \infty} R \frac{\mathbf{E}^s}{\mathbf{E}^i}$$

这样定义的具有复数特性的 RCS 可以用于获得目标的一维、二维雷达像,以及目标识别等方面的研究。

本文利用 MOM 计算了小型飞行器(电小尺寸)的 RCS,利用图形电磁计算方法 GRECO<sup>[3,4]</sup>计算了舰船目标(电大尺寸)的 RCS,在较低的频率范围内,比较了舰船在两种方法下所得的计算结果。在获得了舰船目标频率响应的基础上,进行了舰船一维距离像的仿真,从结果来看,仿真是符合实际情况的,可以为后续的研究提供比较可信的数据。

## 2 小型飞行器 RCS 的计算

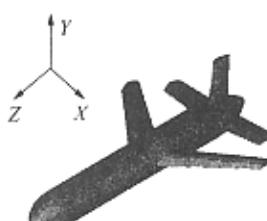


图 1 飞行器外形模型

所计算的目标模型如图 1 所示,其侧视图和俯视图分别如图 2、图 3 所示。 $\theta$  为俯仰角, $\varphi$  为方位角,在短波波段内,此目标处于低频区和谐振区,散射体的每一部分都会影响另外的部分,散射体各部分

\* 收稿日期 2002-09-24 修订日期 2002-12-16

基金项目:国家重点实验室项目(5143105020DZ2403)

间的相互影响的总效果决定了散射体上的最终电流密度分布。求得电流密度分布后,可以得到目标的 RCS。利用矩量法可以获得目标在雷达波照射情况下的表面电流密度分布,进一步获得目标的 RCS<sup>[2]</sup>。

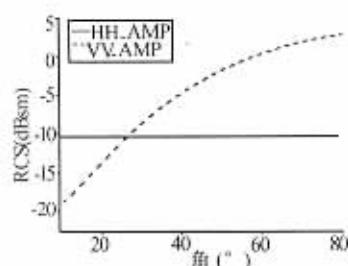


图 2 模型侧视图

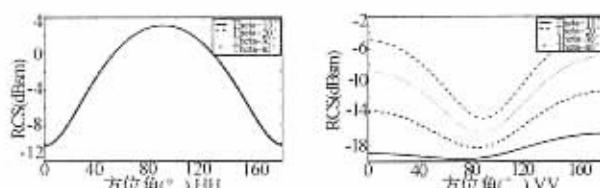


图 3 模型俯视图

当方位角为  $0^\circ$ ,俯仰角  $\theta$  从  $10^\circ$  变化到  $80^\circ$ ,我们计算了  $10\text{MHz}$  频率范围目标的 RCS,RCS 的单位为 dBsm,即  $\sigma_{\text{dBsm}} = 10 \log_{10} \sigma$ 。图 4 为计算结果。当  $\varphi = 0^\circ$  时,目标沿水平极化方向的尺寸变化不大,因此水平极化的 RCS 随着俯仰角几乎没有变化;对于垂直极化,随着俯仰角的增大,极化方向与目标的轴向趋于一致,激励产生的表面电流增大,故 RCS 不断增大。

图 4 频率  $10\text{MHz}$ ,RCS 与俯仰角之间的关系  $\varphi = 0^\circ$ 

当频率为  $10\text{MHz}$ ,在不同的俯仰角下,计算了飞行器 RCS 随方位角的变化情况,如图 5。在 HH 极化方式下,方位角为  $90^\circ$  时,由于极化方向与目标轴向一致,且照射面积最大,故 RCS 达到最大;而在 VV 极化方式下,方位角为  $0^\circ$  和  $180^\circ$  时,RCS 最大,则是因为在俯仰角不为零时,电场极化沿目标纵向,方位角为  $0^\circ$  和  $180^\circ$  时所激励起来的电流达到最大。

图 5 频率  $10\text{MHz}$  时,RCS 与方位角之间的关系

飞行器 RCS 各个方位角平均值随频率的变化曲线,如图 6 所示,可以看出,对于 HH 极化, $3\sim20\text{MHz}$  属于低频区,而 VV 极化率在  $3\sim35\text{MHz}$  处于低频区,RCS 的幅度与频率的四次方成正比,因此 RCS 的幅度随着频率的升高急剧上升;其余部分则属于谐振区, RCS 的幅度随频率呈现出较大的起伏<sup>[1]</sup>。

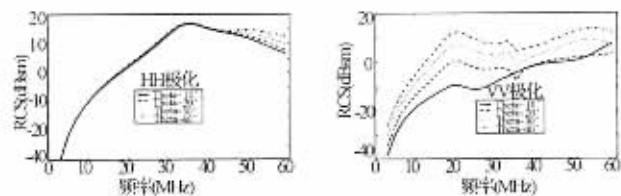


图 6 飞行器 RCS 各方位角平均值随频率的变化

### 3 舰船目标 RCS 的计算

所要计算的舰船目标简化模型如图 7 所示。相对于短波波段的波长来说,此目标属于电大尺寸目标,即在所计算的波段内,  $ka > 10$ ,  $k = 2\pi/\lambda$  为波数,  $a$  为最大的尺寸。由于目标尺寸很大,为了满足计算精度对剖分单元数的要求,目标表面剖分单元的个数相应地增加,导致数值计算中矩阵的规模急剧增大,使得利用数值方法获得目标 RCS 非常困难,因此应利用高频预估方法来获得电大尺寸目标的 RCS。

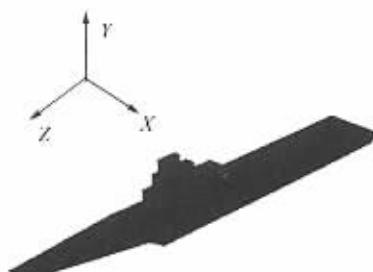


图 7 简化的舰船模型

本文利用图形电磁计算方法来计算电大尺寸目标的 RCS,这种方法充分利用了计算机显示硬件的图形加速功能,巧妙地利用了不同的光照模式来获得目标表面上每一点处的法向量,并且利用计算机图形加速卡的深度缓存(Z-Buffer)来获得目标表面上每一点处的深度信息,利用此深度信息可以准确地计算出散射元之间的相位关系,结合复杂目标在高频区的物理光学近似(PO)和物理绕射理论(PTD),可以准确地获得目标表面上每一点处的散射场及绕射场,而目标的总散射场则可以由这些离散点处的散射场相干叠加而获得。这种方法具有以下特点:

1) 由于 PO 近似认为只有目标表面照明面上才会有感应电流,而被遮挡面的感应电流为零,在计算 PO 散射场时,无需考虑被遮挡面,这样就可以利用图形加速卡进行硬件消隐处理,极其简便、省时,对于边缘绕射场,GRECO 采用 PTD 方法,此方法也可以利用图形硬件的功能来快速获得边缘的几何结构<sup>[5]</sup>,总体上大大提高了计算效率,几乎可以实时地获得电大尺寸目标在不同姿态和频率下的 RCS。

2) 可以利用参数曲面、精细的三角面片来描述真实目标, 逼真度高, 并可利用现在的三维建模软件获得目标的三维模型文件。

3) GRECO 利用了显示屏幕上的像素作为处理单元, 故用于计算的散射元很微细, 可以很准确地表示散射元之间的相位关系。

4) 对于固定大小的视窗来说, 需要处理的像素数是一定的, 因此计算时间、存储量与目标的大小及复杂性无关。

根据文献[3, 4], 我们开发了相应的图形电磁计算软件 GRECO, 来快速计算电大尺寸目标的 RCS, 虽然舰船目标在短波波段内并不是严格的属于光学区, 但在忽略了舰船目标的细节结构之后, 矩量法和 GRECO 的计算结果是比较吻合的, 如图 8 所示。

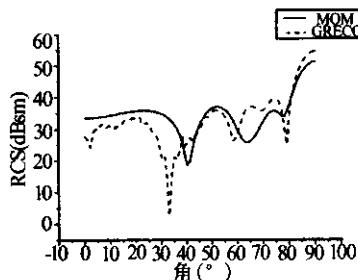


图 8 MOM 与 GRECO,  $\theta = 0^\circ \sim 90^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$

在一台主频为 1.7GHz 的 PC 机上, 我们对于 MOM 和 GRECO 的计算效率进行了比较, 在频率为 6MHz 以下时, 利用矩量法计算舰船在  $\theta$  和  $\varphi$  在 180° 内的 RCS 曲线(角度步长为 1°)需要约 1h, 而 GRECO 只需要约 60s, 频率增加到 10MHz 以上时, 利用 MOM 方法计算舰船目标所需的内存超过了 2G, 这对于大多数计算平台来说, 都是不现实的。当计算频率变化时, MOM 需要重新求取目标表面的电流分布, 如果需要获得目标在特定姿态下的宽频散射特性, 矩量法的效率是令人难以忍受的, 有些方法可以进行目标 RCS 的频率外推, 如渐进形估计方法(AWE)<sup>[6]</sup>, 但仍然有一些限制。而 GRECO 的计算速度与模型的大小和复杂度无关, 仅仅需要一块比较高档的图形加速卡用于对三维目标进行快速渲染, 在计算目标的频率散射特性时, 只需要从显示硬件中读取一次数据就可完成频率特性的计算, 因此, GRECO 是一种低成本、高效的电磁散射高频预估方法。

我们计算了短波波段内舰船目标在  $\theta = 30^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$  的频率响应, 如图 9, 并利用水平极化的频率响应获得了舰船的一维距离像, 如图 10 所示。由一维距离像可以看出, 目标的长度约为 240m, 比较符合  $\theta = 30^\circ$  时

目标的纵向尺寸。因此, 利用图形电磁计算方法 GRECO 所获得的数据是可信的。

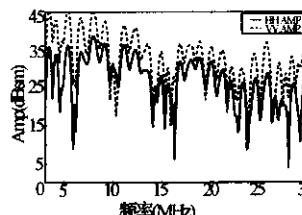


图 9 舰船的频率响应,  
 $\theta = 30^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$

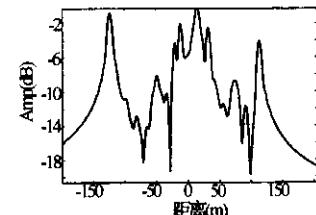


图 10 舰船的归一化  
一维距离像

## 4 结 论

本文利用了两种方法计算了不同尺寸的雷达目标在短波波段的 RCS, 对于处于低频区和谐振区的较小目标, 采用了矩量法, 对于处于高频区的大尺寸目标, 采用了图形电磁计算方法, 从计算的结果分析来看, 结果是可信的, 对短波雷达系统的仿真具有参考价值。尤其是图形电磁计算方法, 可以实时地获得目标的 RCS, 这对于雷达成像、目标特性等方面的研究具有很高的实用价值。

## 参 考 文 献

- 1 E. F. 克拉特, 等. 阮颖铮, 等译. 雷达散射截面-预估、测量和缩减. 北京: 电子工业出版社, 1987
- 2 Johnson J. H. Wang. Generalized Moment Methods in Electromagnetics, Formulation and Computer Solution of Intergral Equations. John Wiley & Sons, Inc., 1991
- 3 Juan M. Rius, Miguel Ferrando, and Luis Jofre. High-frequency RCS of complex radar targets in real-time. IEEE Trans. Antennas Propagation, 1993, 41(9): 1308~1318
- 4 Liu Tiejun and Zhou Yong. Geometrical modeling and graphical RCS computing simulation for complex objects. Journal of Electronics, 1997(2)
- 5 杨正龙, 方大纲, 等. 复杂目标电磁散射计算软件的改进. 系统工程与电子技术, 2002, 24(4): 86~89
- 6 熊 邺, 方大纲, 等. 电磁场数值计算中的内插和外推. 电波科学学报, 2002, 17(4): 325~330

杨正龙 男, 1976 年生, 博士, 2002 年毕业于南京理工大学, 现于南京电子技术研究所博士后工作站工作。在国内外杂志上发表论文数篇, 参与了国防科工委、国家自然科学基金等项目的研究工作。研究方向为雷达成像、电磁散射计算等。

倪晋麟 男, 1960 年生, 研究员, 博士生导师。主要研究领域为雷达信号处理, 自适应阵列及微波成像等。

熊 邺 男, 1978 年生, 南京理工大学电磁场与微波技术专业在读硕士, 主要研究方向为电磁散射数值计算与微带天线设计。

## 雷达散射截面（RCS）分析培训课程

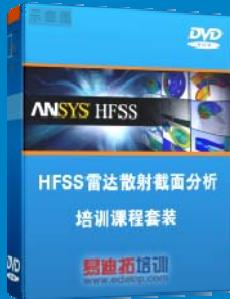
易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养，是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

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/>