

文章编号:1673-1255(2008)04-0014-04

强散射体的 RCS 分析

薛洪新¹, 沈卫东², 刘选俊², 邵锦萍²

(1. 重庆通信学院研究生队, 重庆 400035; 2. 重庆通信学院电力工程系, 重庆 400035)

摘要:用简单的强散射体制作简易的目标模拟体, 以较小的反射体模拟散射较强、体积较大的目标可以有效地提高目标的生存能力, 达到伪装、迷惑的目的。常见的强散射体有二面角反射体、三面角反射体等, 采用矩量法计算它们的 RCS, 通过分析、比较和计算结果来选择合适的强散射体。

关键词:强散射体; 雷达散射截面; 矩量法; 角反射器

中图分类号: TN249

文献标识码: A

RCS Analysis of Strong Scatters

XUE Hong-xin¹, SHEN Wei-dong², LIU Xuan-jun², SHAO Jin-ping²

(1. Chongqing Communication Institute, Chongqing 400035, China;

2. Power Engineering Department of Chongqing Communication Institute, Chongqing 400035, China)

Abstract: The simple target simulation is made from the strong scatter. Strong scatter, large volume is simulated by small size reflectors, which can improve the survivability effectively and achieve camouflaging and confusing. The common strong scatters are dihedral corner reflector and trihedral angle corner reflector, and so on. The Method of Moment (MOM) is used to compute their RCS, and the better strong scatters is selected by analyzing, comparing and calculating the results.

Key words: strong scatter; Radar Cross Section(RCS); Method of Moment(MOM); corner reflector

选择简单的强散射结构及其组合来构成强散射体, 在材料、尺寸和频率相同的情况下计算各种常见强散射体 RCS, 比较分析它们的模拟效果^[1-2]。

1 雷达散射截面的概念

雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)的定义是基于平面波照射下目标各向同性散射的概念。形式上其定义为^[3]

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{S_s}{S_i} = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2} = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|H_s|^2}{|H_i|^2} \quad (1)$$

式中, S_s 和 S_i 分别是雷达接收处散射波和目标入射波的能流密度; E_s 和 E_i 分别是雷达接收机处的散射

电场和目标处的入射电场; H_s 和 H_i 分别是雷达接收机处的散射磁场和目标处的入射磁场强度。因为入射波是平面波, 且目标假定为点散射体, 所以距离 R 应趋于无穷大, 这就是雷达截面最基本的理论定义式。

由雷达截面的理论定义式(1)可知, 雷达截面理论分析实际上就是要计算出目标对给定入射波所产生的散射场, 常用的电磁散射计算方法有低频矩量法、以及各种高频近似方法如几何光学法、物理光学法、几何绕射法、物理绕射法等。本文采用矩量法计算较小的强散射体来模拟较大目标的散射。

2 电磁散射的计算方法——矩量法

矩量法是求解微分方程和积分方程的一种重要的数值方法^[4], 它广泛应用于天线、微波技术和电

收稿日期: 2008-06-10

作者简介: 薛洪新(1980-), 男, 山东高唐人, 硕士研究生, 研究方向为目标特征控制。

磁波发射等方面,其基本思想是将一个泛函方程化为矩阵方程,然后用人们熟悉的方法求解该矩阵方程。求解过程的关键是选取合适的矢量基函数将积分方程转化为矩阵方程。

在入射电场 \hat{E}_i 激励下,导电体表面 S 上将产生表面电流 \hat{j}_s ,空间总电场可以表示为

$$\hat{E} = \hat{E}_i + \hat{E}_s \quad (2)$$

由电流 \hat{j}_s 激发的散射场 \hat{E}_s 可表示为

$$\hat{E}_s(\hat{r}) = -j\omega \hat{A}(\hat{r}) - \nabla \phi(\hat{r}) \quad (3)$$

$$\text{其中: } \hat{A}(\hat{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_s \hat{j}_s \frac{e^{-jk_0 R}}{|\hat{r} - \hat{r}'|} dS' \quad (4)$$

$$\phi(\hat{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{\sigma_s} \frac{e^{-jk_0 R}}{|\hat{r} - \hat{r}'|} dS' \quad (5)$$

$\hat{A}(\hat{r})$ 与 $\phi(\hat{r})$ 分别为矢量势函数和标量势函数; \hat{r} 与 \hat{r}' 分别为观察点和原点的位置矢量; σ_s 为面电荷密度。对于理想导体目标而言,其边界条件为

$$\hat{a}_n \times \hat{E} = 0 \quad (6)$$

因此可以得到理想导体表面电场积分方程

$$\hat{a}_n \times \hat{E}_i(\hat{r}) = \hat{a}_n \times \int_s [j\omega\mu_0 \hat{j}_s G + (j/\omega\epsilon_0) \nabla \cdot \hat{J}_s \nabla G] dS' \quad (7)$$

此时,观察点位矢量 \hat{r} 位于导体表面上。 G 为格林函数。为了能处理该积分方程,引入如图1所示的RWG矢量基函数。该函数不仅能保持单元交界处切向或法向的连续性,而且可以为设置未知场或电流的边界条件提供了方便。

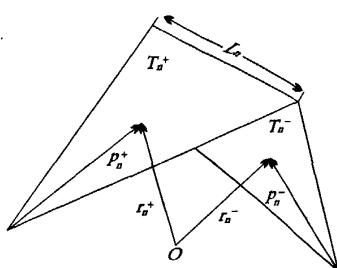


图1 RWG矢量基函数示意图

图1中, l_n 为三角面元 T_n^+ 与 T_n^- 的公共边长, A_n^+ 和 A_n^- 分别表示两三角形的面积, ρ_n^+ 和 ρ_n^- 分别由 T_n^+ 和 T_n^- 的自由顶点指向相应面元的内

点, r_n^+ 和 r_n^- 分别由坐标原点 O 指向 T_n^+ 和 T_n^- 的内点。则与 l_n 相联系的RWG矢量基函数可定义为

$$\hat{f}_n(\hat{r}) = \begin{cases} \frac{l_n}{2A_n^+} \rho_n^+, & \hat{r} \in T_n^+ \\ \frac{-l_n}{2A_n^-} \rho_n^-, & \hat{r} \in T_n^- \\ 0, & n=1,2,\dots \end{cases} \quad (8)$$

则待求的表面电流 \hat{j}_s 可近似表示为

$$\hat{j}_s(\hat{r}) = \sum_{n=1}^N j_n \hat{f}_n(\hat{r}) \quad (9)$$

其中, J_n 是未知展开系数; N 为除边界棱边(只与某个面元相关的棱边)外所包含的面元边数。显然当用RWG矢量基函数展开表面电流时,电流方向就与式(8)一致即与 ρ_n^+ 相同与 ρ_n^- 相反,式(8)中的负号即表示此意。则定义与 l_n 相关的电流以由 T_n^+ 流向 T_n^- 为正向。则将RWG矢量基函数应用于式(3)可得: $\langle \hat{E}_i, \hat{f}_m \rangle = i\omega \langle \hat{A}, \hat{f}_m \rangle + \nabla \phi, \hat{f}_m \rangle$

$$m=1,2,\dots,N \quad (10)$$

将式(10)中所有 \hat{f}_n 都以式(9)的形式代入,化简可得关于 j_n 的矩阵方程: $[z_{mn}] [j_n] = [v_m]$ (11)

$$\text{式中, } z_{mn} = ik\eta \int_T \hat{f}_m(\hat{r}) \cdot \int_I G(\hat{r}, \hat{r}') dS' dS$$

$$\hat{f}_n(\hat{r}) dS' dS \quad (12)$$

$$v_m = \int_I \hat{f}_m(\hat{r}) \cdot \hat{E}_i(\hat{r}) dS \quad (13)$$

通过式(11)可求得 $[j_n]$,将其代入式(9)可求得 $\hat{j}_s(\hat{r})$ 。导体的散射场可表示为

$$\hat{E}_s = \int_s [-j\omega\mu_0 \hat{j}_s(\hat{r}) G - (j/\omega\epsilon_0) \nabla \cdot \hat{J}_s \nabla G] dS' \quad (14)$$

将电流解围绕散射体表面积分,并在物体各部分应用适当的权函数,以获得关于未知系数的线性方程组,结果得到一个矩阵方程。当外加激励(即入射场的极化和传播方向)给定时,即可确定电流分布的未知系数。由矩阵反演得到散射体电流分布后,给定方向的散射场即可由表面感应电流与散射场的积分公式求得。

3 强散射体雷达散射截面分析

3.1 几种典型强散射结构的雷达散射截面

由表1可知,前4种散射结构是强散射结构,其RCS与频率的平方成正比,与物体的尺寸的4次方

表1 几种典型散射结构

几何形状名称	频率依赖关系	尺寸依赖关系	RCS计算公式 (最大值)
矩形三面角反射器	f^2	L^4	$\sigma = 12\pi a^4/\lambda^2$
三角形三面角反射器	f^2	L^4	$\sigma = 4\pi a^4/3\lambda^2$
矩形两面角反射器	f^2	L^4	$\sigma = 8\pi a^2 b^2/\lambda^2$
平板	f^2	L^4	$\sigma = 4\pi a^2 b^2/\lambda^2$
圆柱	f^1	L^3	$\sigma = 2\pi ab^2/\lambda$
球	f^0	L^2	$\sigma = \pi a^2$

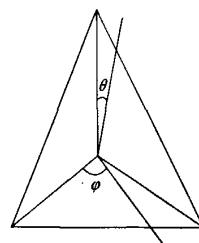


图4 三角形三面角反射器

成正比;圆柱和球的散射则相对较弱,与尺寸的关系分别是立方和平方,圆柱的散射与频率的关系是一次方而球的散射与频率无关^[5].在前面4种强散射结构中,由计算可知平板RCS的峰值宽度较窄,偏离平板的法线几度,其RCS明显下降.而角反射器由于多次反射,在立体空间内的散射图形很宽.常见的角反射器结构如图2~图4,它们的RCS散射图形分别如图5~图7所示.通过图5的计算和测量曲线对比可知,矩量法在计算目标RCS时比较准确,误差较小.

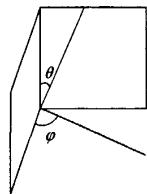


图2 矩形两面角反射器

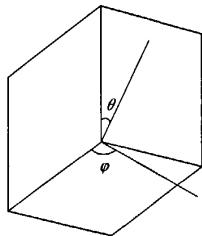


图3 矩形三面角反射器

由图5~图7的散射曲线可以看出,几种角反射器都有较宽的散射峰值.

3.2 强散射结构的简单组合

3.2.1 夹角为90°的角反射体的雷达散射截面

图8是由4个90°的矩形三面角反射器组成的

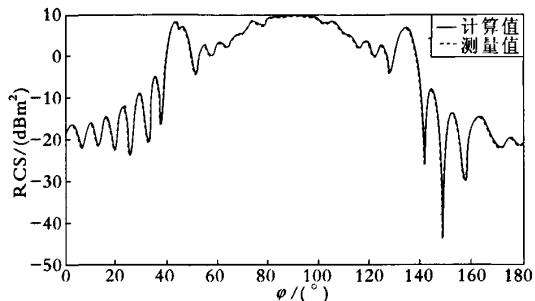
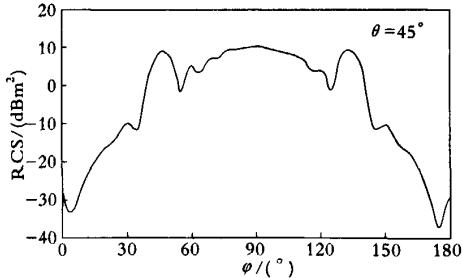
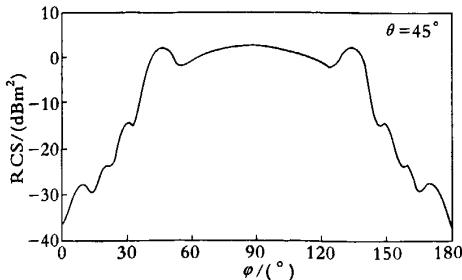
图5 $5\lambda \times 5\lambda$ 的正方形二面角的RCS曲线图6 $5\lambda \times 5\lambda$ 的正方形三面角的RCS曲线

图7 由直角边长为 5λ 的三角形三面角的RCS曲线
角反射体,其中每个三面角矩形的边长为 5λ .其RCS变化曲线如图9所示;图10是由4个90°的三角形三面角反射器组成的角反射体,其中直角边长

均为 5λ , 其 RCS 变化曲线如图 11 所示。

由图 9 和图 11 的散射曲线可以看出, 矩形反射器组合的散射峰值明显高于三角形反射器组合体的散射值。

3.2.2 非 90° 角反射体的雷达散射截面

上面讨论了夹角为 90° 的角反射器组合体, 根据角反射器的特点, 宽阔的反射贡献随两面角之间的夹角而变化。图 12 是 1 个由 5 个 72° 矩形三面角反射体。

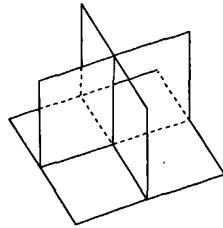


图 8 矩形角反射体

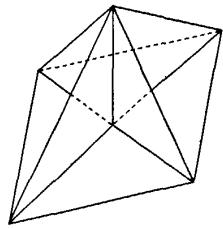


图 10 三角形角反射体

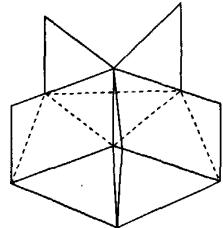


图 12 夹角为 72° 的矩形三面角反射体

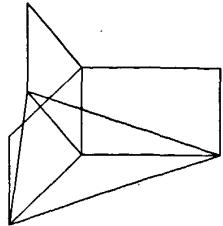


图 14 夹角为 120° 的矩形三面角反射体

反射器组成的反射体, 其 RCS 变化曲线如图 13 所示。图 14 是 1 个由 3 个 120° 矩形三面角反射器组成的反射体, 其 RCS 变化曲线如图 15 所示。

由图 12、图 14 中 2 个夹角不同的矩形角反射体 RCS 曲线可以看出, 夹角大于或小于 90° 的组合体的雷达散射强度都会大大减弱, 原来宽阔的反射贡献变得很窄。

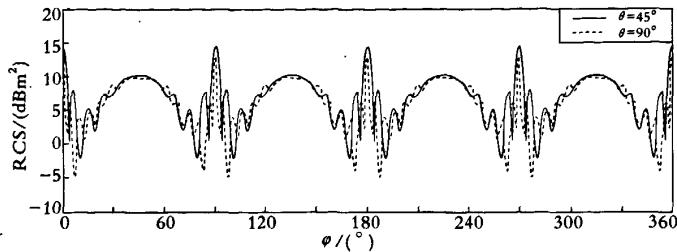


图 9 矩形角反射体在频率 10 GHz 时的全方位 RCS 变化曲线

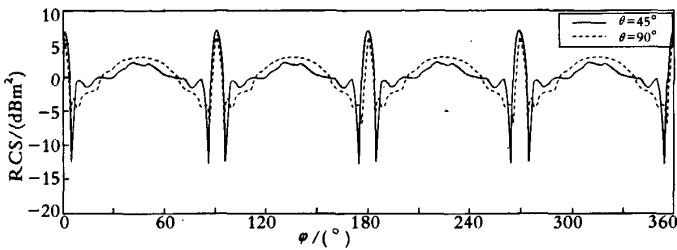


图 11 三角形角反射体在频率 10 GHz 时的全方位 RCS 变化曲线

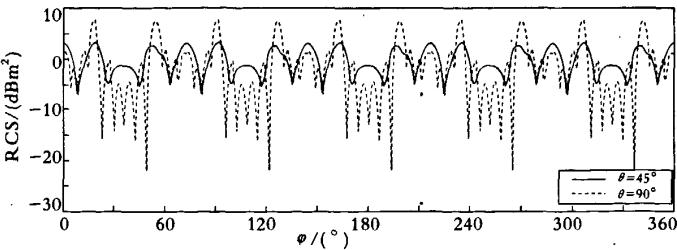


图 13 矩形角反射体在频率 10 GHz 时的全方位 RCS 变化曲线

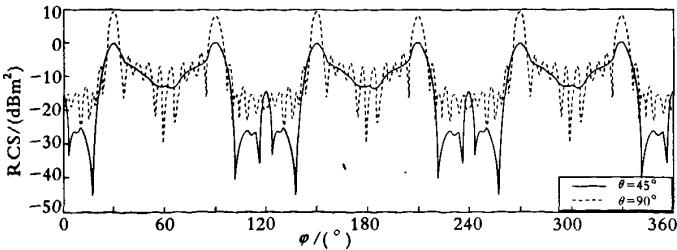


图 15 矩形角反射体在频率 10 GHz 时的全方位 RCS 变化曲线

(下转第 20 页)

外热像仪的工作原理是将视场内收集到各点的红外辐射进行光电转换后,得到可视图像。将雾作为一个介质的传递函数处理,其包含着对目标辐射能量的传递和目标空间信息的传递,可给出目标经水雾后,对比度和相位发生的变化,进而得到热成像系统最小可分辨温差等参数及成像质量的变化。

从另一个角度分析,红外辐射能量的传递是以热辐射形式传输的。因此,温度越高,在给定波长上的总能量越多。这符合斯蒂芬-玻尔兹曼定律

$$M = \epsilon\sigma T^4 \quad (10)$$

式中, T 为温度。

由此可以看出,红外辐射能量的大小与物体本身温度的 4 次方成正比。而雾的特点是,其质量很小而表面积却相对很大,这一特性意味着物质大部分在表面上。在环境的影响下,雾滴粒子很快地随着相对湿度的变化吸收或放出水分。当雾滴弥漫于整个辐射源与空气相混合时,利用水的蒸发潜热特点,大量吸收辐射源的热量,由于雾滴直径很小,悬浮在空气中,迅速蒸发带走热量,从而达到降温的目的,使得红外热辐射能量迅速降低^[2]。

4 雾对激光传输的作用机理

激光在大气传输过程中与大气相互作用产生各种效应,这些效应将使激光的能量与相干性大大降低,严重影响了激光的传输效果。尤其是 CO₂ 激光在传输过程中,雾的吸收和散射作用对其能量的衰减较为严重。由于吸收是一种能量的转换,是将激光的辐射能量以其他形式转换出去,而散射则使激光的传输方向产生偏离,二者的影响使激光能量衰减,衰减规律遵从朗伯-比尔定律。雾对激光的衰减同

(上接第 17 页)

4 结 论

通过二面角反射器 RCS 的计算分析可以看出,运用矩量法计算其电磁散射,方法简单有效,结果准确误差小。同时,由上面分析可知,矩形三面角比三角形三面角拥有更宽更高的散射峰值。另外,相邻反射面之间的夹角越偏离 90° 时,峰值和主瓣宽度明显下降。

样符合 Mie 散射理论,当雾滴直径大小与激光波长相当时,雾对激光的衰减最为严重。激光在水雾中传输时与雾滴的相互作用会受到衰减,这种作用称为消光作用,其原理图如图 2 所示。消光的结果是激光能量降低,探测器难以接受到激光的能量^[3-4]。

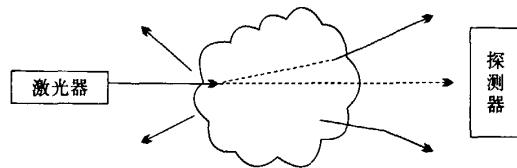


图 2 水雾对激光的消光原理

5 结 论

由于水雾在大气中属于气溶胶体系,其分散介质是空气,而分散相则是水,水雾的粒度一般在 0.5 ~ 80 μm 之间,当电磁波在传输过程中穿过水雾时,由于水雾的粒度大小及形状不同,对于不同的波长,可见光、红外(近红外、中红外、远红外)、激光都具有很强的散射与吸收。

参考文献

- [1] [美]理查特·丹尼斯. 气溶胶手册 [M]. 北京: 原子能出版社, 1988: 53 - 57.
- [2] 郑晨, 侯文学. 水幕对红外、激光传输的影响 [J]. 光电技术应用, 2007, 21(3): 22 - 24.
- [3] 姚禄玖, 高钧麟, 肖凯涛, 等. 烟幕理论与测试技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 22 - 26.
- [4] 曹建明. 喷雾学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 67 - 69.

参考文献

- [1] 周一字, 徐晖, 安玮. 电子战原理与技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [2] 黄培康, 殷红成, 许小剑. 雷达目标特性 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [3] 阮颖铮. 雷达截面与隐身技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [4] 王长清. 现代计算电磁学基础 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2005.
- [5] 赵维江, 葛德彪. 三面角反射器的高频电磁散射分析 [J]. 电波科学学报, 1998, 13(03): 301 - 303.

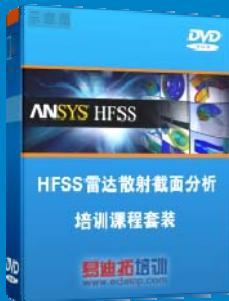
雷达散射截面（RCS）分析培训课程

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/>