

基于高频混合方法的海上目标电磁散射特性分析

崔凯 许小剑 毛士艺

(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100083)

摘要:三面空腔反射器是一种特殊的反射结构,空腔内的多次散射是形成其雷达散射截面(RCS)的主要贡献之一。该文在计算机图形学裁剪的基础上,改进了现有的区域投影方法,结合物理光学法和阻抗边界条件,分析了正确处理目标几何结构的遮挡和消隐之后三面空腔反射器内的多次散射机理。最后,将阻抗边界条件扩展到海上环境,对两类带有反射器结构的海上舰船简化模型进行了RCS计算与分析。结果表明,海面与目标之间以及目标内部的多重散射作用在一定情况下可形成明显的散射特征。

关键词: 雷达散射截面; 三面空腔反射器; 多次散射; 区域投影法

中图分类号: TN011

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)06-1500-04

EM Backscattering of Simplified Ship Model over Sea Surface Based on a High Frequency Hybrid Method

Cui Kai Xu Xiao-jian Mao Shi-yi

(School of Electronic and Information Engineering, BeiHang University, Beijing 100083, China)

Abstract: This paper focuses on a special kind of three-plate cavity reflectors which is useful in EM backscattering model of large complex targets over land or sea surface. After employing Computer Graphics (CG) method to eliminate shadowing effect, Physical Optics (PO) and Area Projection (AP) method are combined to analyze specular reflection and multiple scattering mechanism to calculate the Radar Cross Section (RCS) of different reflectors. Finally, by combining with sea reflection coefficient under different sea states, a procedure is proposed to compute the RCS of simplified ship targets over sea surface. The results show that multiple scattering can form obvious RCS characterization under certain conditions.

Key words: RCS; Three-plate cavity reflector; Multiple scattering; Area projection

1 引言

众所周知,角反射器是一种有效的电磁波散射体,由于内部的多重反射,它具有极强的后向散射特性。Knott最早进行了两面角反射器的理论计算^[1]。Griesser和Balanis^[2]用物理光学法和一致性几何绕射理论(UTD)计算了垂直入射情况下两面角反射器的后向散射场,并考虑到了三次反射。Anderson^[3]用物理光学法计算了斜入射情况下非正交两面角反射器的后向雷达散射截面(RCS),根据Anderson的结论,二面角内反射次数取决于其内角 2β 。当 $2\beta \geq 90^\circ$ 时,只要考虑到二次反射;当 $60^\circ \leq 2\beta \leq 90^\circ$,需要考虑到三次反射。文献[3]列出了一次反射、二次反射和三次反射的物理光学积分简化公式,其结果不会受到垂直入射的限制。

但是,对于某些大型目标而言,比如大型舰船的加强肋板、舰身和海面之间并非两面角反射体,而是一个特殊的三面空腔反射器^[4]。类似情况还有飞行器两个垂尾和机身,建筑物与道路之间等,这些均可视为三面空腔反射器。三面空腔反射器具有特殊的电磁散射特性,它既不同于一般封闭

的波导腔体,也不同于三面角反射器。三面空腔反射器的特殊性在于它可以看作是一种在两面角反射器基础上的扩展。文献[4]使用了等效孔径的方法计算了在垂直入射情况下几种三面空腔反射器的后向电磁散射特性,但是没有考虑斜入射的情况。本文综合文献[3,4],在角反射器内多次反射机理的基础上,使用了一种新的计算方法,即结合物理光学法和区域投影法,利用计算机图形学方法在考虑遮挡和消隐关系后,进一步得到了斜入射情况下的三面空腔反射器的后向RCS。这样不但将多次反射计算从两面角反射器推广到三面空腔反射体,也解决了不能在斜入射时计算反射器结构方位角与俯仰角方向的后向散射问题。同时考虑到海水环境下与完全导体之间反射机理的差异,最终得出了两类海水舰船简化模型在不同姿态角下随海况变化的电磁散射特性。

2 物理光学法和区域投影法

Knott^[5]从物理光学方法的基础上出发,结合几何光学方法和射线跟踪法,推导出了高频混合方法——区域投影物理光学法(AP/PO),该方法首先利用几何光学方法确定初次反射方向和反射场,并将其作为下次散射的入射方向和入射场,然后利用射线跟踪方法确定各次散射的入射波照明

区域, 最后利用物理光学法计算各次的散射场。

2.1 三面空腔反射器中的多次反射机理

三面空腔反射器可视作在两面角反射器的结构上增加一个面板(几何结构见图 1), 它的后向散射场主要来源为构成反射器的三个面的直接反射(一次反射)和面与面之间的二次反射、三次反射及更高次反射。由于组成三面空腔反射器的三个平面并非全是完全导电平面, 比如海水, 所以必须考虑如何在有阻抗边界条件的情况下计算三面空腔反射器的电磁散射特性。

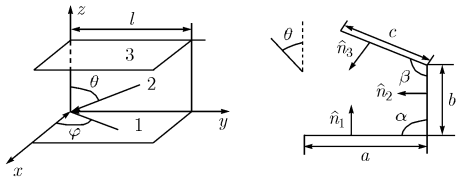


图 1 三面空腔反射器的几何结构

考虑接收机的电极化接收矢量 \hat{e}_r , 赵维江以物理光学法为基础导出了带有阻抗边界条件的散射场^[6]:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}^s \hat{e}_r = & -\frac{jk}{4\pi} \frac{e^{-jkr}}{r} \int_s [(\hat{e}_r \cdot \hat{e}_\perp)(1 - R_\perp)E_\perp \cos\theta \\ & + (1 + R_\parallel)E_\parallel \hat{e}_r(\hat{n} \times \hat{e}_\perp) - (\hat{e}_r \times \hat{s})\hat{e}_\perp(1 - R_\parallel) \\ & \cdot E_\parallel \cos\theta + (\hat{e}_r \times \hat{s})(\hat{n} \times \hat{e}_\perp)(1 + R_\perp)E_\perp] e^{jk\hat{r} \cdot \mathbf{r}} dS \end{aligned} \quad (1)$$

式中 \hat{i} 和 \hat{s} 分别为入射方向和反射方向的单位矢量; 入射电场可在 \hat{e}_\perp 和 \hat{e}_\parallel 两个方向上进行分解, 反射电场可在 \hat{e}_\perp 和 \hat{e}_\parallel 两个方向上进行分解, E_\perp 和 E_\parallel 分别为入射电场在 \hat{e}_\perp 和 \hat{e}_\parallel 上的分量, R_\perp 和 R_\parallel 分别为涂敷表面在垂直极化和水平极化时的反射系数, θ 为入射波与入射平面夹角。这样, 三面空腔反射器内因多次反射形成的贡献可按照以下方法计算: 以板 1 和板 2 之间的二次反射为例, 根据几何光学法(GO), 首先根据入射波方向确定对面 1 的照射区域, 然后确定反射波到面 2 的照明区域; 面 1 的反射场, 即面 2 的入射场, 以及由此产生的散射场可按式(1)进行计算。其中 \hat{n}_1 为面 1 的单位外法线矢量, \hat{n}_2 为面 2 的单位外法线矢量, \hat{n}_3 为面 3 的单位外法线矢量。

2.2 图形求交

从上文可以看出, 如何求得各次入射的照明区域是区域投影法的关键所在。图形求交是计算机图形学中的经典问题, 最常用的算法是逐边裁剪法, 具体算法流程如图 2 所示:

在得出相交区域后, Gordon^[7]给出了计算多边形 RCS 的公式, 并结合式(1)有

$$\begin{aligned} \sqrt{\sigma} = & -\frac{jk}{4\pi} \frac{e^{-jkr}}{r} [(\hat{e}_r \cdot \hat{e}_\perp)(1 - R_\perp)E_\perp \cos\theta + (1 + R_\parallel) \\ & \cdot E_\parallel \hat{e}_r(\hat{n} \times \hat{e}_\perp) - (\hat{e}_r \times \hat{s})\hat{e}_\perp(1 - R_\parallel)E_\parallel \cos\theta \\ & + (\hat{e}_r \times \hat{s})(\hat{n} \times \hat{e}_\perp)(1 + R_\perp)E_\perp] \frac{1}{\omega_s^2} e^{-jkr-\omega} \sum_{n=1}^N T_n \end{aligned} \quad (2)$$

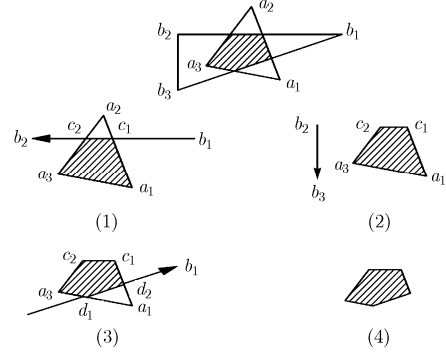


图 2 逐边裁剪法求取公共区域

式中 $\omega = (\hat{i}_n - \hat{s})$, \hat{i}_n 和 \hat{s} 分别为第 m 次入射波方向和散射方向单位矢量。设 a_1, \dots, a_N 为多边形的顶点坐标, $a_{N+1} = a_1$, $\Delta a_n = a_{n+1} - a_n (1 \leq n \leq N)$, 有

$$\begin{aligned} T_n = & \int_0^1 (\omega_s^* \Delta a_n) \{i\omega_s [(1-t)a_n + ta_{n+1}]\} dt \\ = & (\omega_s^* \Delta a_n) \text{sinc}\left(\frac{\omega_s}{2} \Delta a_n\right) \exp\left[\frac{i}{2}\omega_s(a_n + a_{n+1})\right] \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $\omega_s = (\omega_1, \omega_2)$ 为 ω 在 2D 坐标系上的投影矢量, $\omega_s^* = (\omega_2, -\omega_1)$; 当 $\omega_s = 0$ 时, $\int_S e^{i\omega_s \cdot \mathbf{r}} dS = A$, A 为多边形的面积; $\text{sinc}(x) = \sin x / x$; \hat{r} 为表面位置矢, N 为多边形的边数。由上述计算公式可得出任意两三角形面元之间的多次反射贡献。

2.3 几何结构的遮挡和消隐

由于三面空腔反射器可视作在两面角反射器的结构上增加一个面板, 除了在反射机理上更加复杂以外, 最大的困难在于增加的面板对已有面板形成了遮挡, 如图 3 所示。根据物理光学法的原理, 接收单元显然无法接收到阴影区内的反射场, 这与两面角和三面角始终全部处于照明区完全不同。因此, 在计算多次反射前, 首先应确定整个反射器结构的阴影区和照明区。

由图 3 可知, 确定阴影区和照明区实际上仍是一个图形投影和裁剪的问题。在本文 1.2 节中已经介绍了逐边裁剪法的原理, 为了得到照明区, 可以对其作出改动, 每次切割时只保留切割边的外部区域, 如图 4 所示。由于照明区域都是由三角面元组成的多边形, 因此可以使用式(1)及区域投影法得到照明区域间的多次反射形成的贡献。

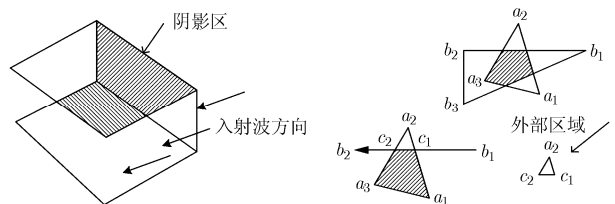


图 3 由遮挡形成的阴影区 图 4 逐边裁剪法求取照明区域示意

3 海上环境与海水反射系数

计算海表面与舰船目标之间多次散射的贡献的困难在于：第一，海面并不是完全导体(PEC)，对于水平极化，海面和目标均可以看作完全导体，而对于垂直极化，海面则被看成是不可穿透的波阻抗表面^[8]；第二，由于波浪的起伏，使得海面成为巨大的粗糙表面。由于反射系数与海表面的介电常数、频率、擦地角及海面的粗糙程度有关，所以当入射波在海表面上发生反射时，反射系数的幅度会发生衰减，相位也会发生变化，有下列关系^[8]：

$$\Gamma = e^{-2(k\hat{\sigma}\sin\beta)^2} I_0[(k\hat{\sigma}\sin\beta)^2] R \quad (4)$$

式中 $I_0(\cdot)$ 为球面 Bessel 函数； $\hat{\sigma}$ 为海面粗糙度 (m)， $\hat{\sigma} = 0.0054u^2$ ， u 为风速 (m/s)， $k = 2\pi/\lambda$ ， λ 为波长； R 为 Fresnel 反射系数：

$$R_{\perp} = \frac{\varepsilon \sin\beta - \sqrt{\varepsilon - \cos^2\beta}}{\varepsilon \sin\beta + \sqrt{\varepsilon - \cos^2\beta}}, \quad R_{//} = \frac{\sin\beta - \sqrt{\varepsilon - \cos^2\beta}}{\sin\beta + \sqrt{\varepsilon - \cos^2\beta}} \quad (5)$$

式中 $R_{\perp}, R_{//}$ 分别为垂直和水平极化系数， β 为入射波与海平面之间的夹角，即擦地角； ε 为海水的复介电常数。高频情况下海水复介电常数可参见文献[9]。本文的算例采用了文献[8]中入射频率为 1GHz 时，一般海水的介电常数 $\varepsilon = 80 - j * 71.9$ 。

4 计算实例

结合实际情况，本文假设了两类舰船-海面模型，分别见图 5 和图 6。图 5 中的第 1 类目标对大多数海上舰船目标具有普遍性：如果将舰身与海面的耦合作用简化为锐角两面角反射器、甲板与舰楼的耦合作用简化为直角两面角反射器，那么按照部件分解法的观点，第 1 类目标就可以进一步简化为由角反射器和大平板构成的复杂目标；第 2 类目标甲板以下结构中形成了明显的三面空腔反射器，它可以模拟航空母舰舰身、加强肋板与海面的耦合作用。因此，第 1 类目标与第 2 类目标最大的区别在于甲板以下的部分与海面的多次反射机理不同，而甲板以上部分则是相同的。图 7 为垂直入射时第 1 类海上目标舰身与海面耦合 RCS 在不同海况下随擦地角变化图，由于舰身与海面夹角为 75° ，在擦地角 15° 和 60° 时入射波在海面与舰身之间的三次反射使目标出现了 RCS 的峰值，该结论可在文献[4,8]中得到印证；图 8 为垂直入射时第 1 类海上目标整体 RCS 在不同海况下随擦地角变化图，随着海况的恶化，目标 RCS 的贡献以舰楼的一次反射和甲板与舰楼之间的多次反射为主。第 2 类目标的计算结果也出现了同样的情况，见图 9，舰身与海面形成了典型的三面空腔反射结构，在擦地角为 30° 和 45° 时出现了新的峰值，其中海面与加强肋板之间形成了 60° 的锐角反射器，入射波的三次反射形成了在 30° 方向的峰值； 45° 方向峰值的出现是因为入射波照射到海面，反射至舰身，然后由舰身

反射至加强肋板，经加强肋板反射后的反射波形成了镜面反射。图 10 为垂直入射时第 2 类海上目标整体 RCS 在不同海况下随擦地角变化图，在大擦地角与较差海况下，目标 RCS 仍以甲板以上为主。从整体 RCS 而言，舰楼-甲板之间形成的直角两面角反射器及甲板以上结构的直接反射贡献减弱了这两类目标的散射机理间的差异。在小擦地角和平静海况下，目标的 RCS 仍以舰身与海面形成的角反射器结构之间的多次反射贡献为主，但在大擦地角情况下，多次反射的作用迅速降低，此时模型的直接反射与甲板以上的角反射器结构之间的多次反射在整个舰船的 RCS 贡献中起主要作用。

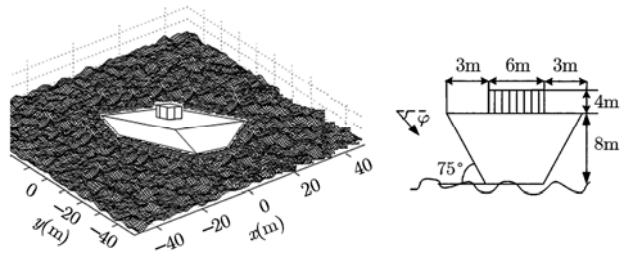


图 5 第 1 类舰船简化模型

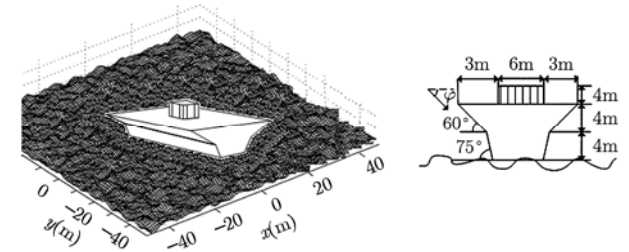


图 6 第 2 类舰船简化模型

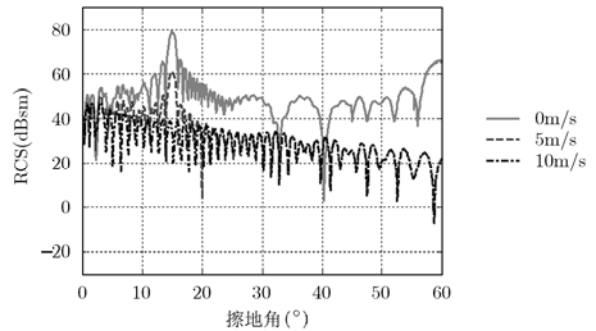


图 7 第 1 类舰船模型在不同海况下舰身与海面耦合 RCS 随擦地角变化

5 结束语

由于海面的存在，使得目标与海面的耦合作用成为 RCS 的主要贡献机理。本文在角反射器结构多次反射计算的基础上，结合阻抗边界条件，从而将海面的因素引入了目标特性计算。从结论可以看出，海面与目标之间的多次反射大大增加了目标的 RCS，而且远大于仅考虑因直接反射引起的目标

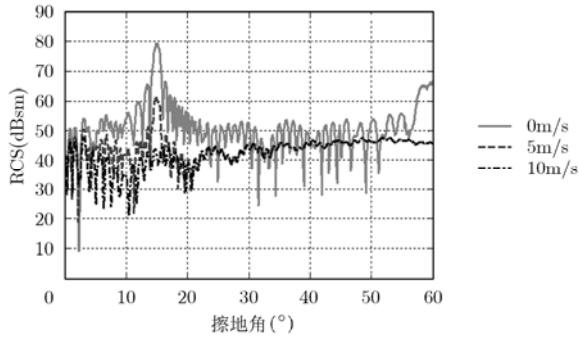


图 8 第 2 类舰船模型在不同海况下整体 RCS 随擦地角变化图

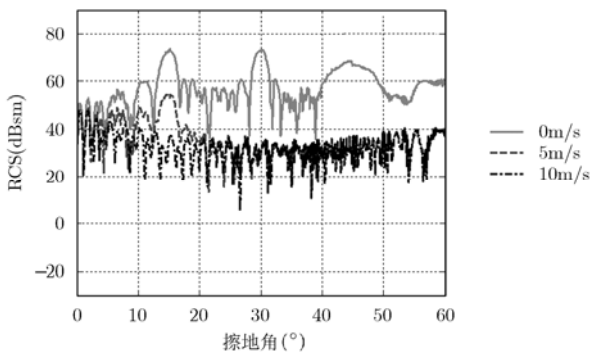


图 9 第 2 类舰船模型在不同海况下舰身与海面耦合 RCS 随擦地角变化

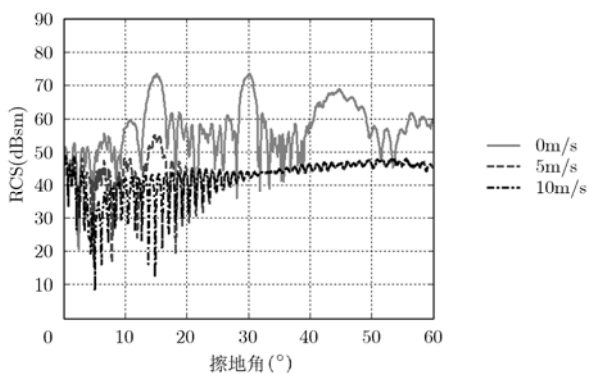


图 10 第 2 类舰船模型在不同海况下整体 RCS 随擦地角变化图

RCS。所以与无海面的环境比较,海面起到了增强目标可探测性的作用。

由于海水目标几何结构的差异,为了突破原有计算模型的限制,本文将两面角反射器拓展到三面空腔反射器,从而解决了特殊几何结构与海面的作用问题。计算三面空腔反射器后向散射的复杂性在于:首先要确定目标的几何结构与雷达位置、照射区域之间的相对关系,特别是目标的遮挡和消隐;其次,需要考虑海水介电特性和海面状况等环境状况的变化。本文结合计算机图形学方法,正确处理了目标结构的遮挡和消隐,利用物理光学法和区域投影的高频混合方法得到了三面空腔反射器的后向电磁散射特性,并将其推广到海

面环境,给定两类简化的海上舰船模型,应用文中给出的混合方法最终得到了海上目标的电磁散射特性。从结果上可以看出,当舰船目标在小擦地角和海况较好的情况下,甲板以下舰身与海面的多次散射对目标 RCS 的贡献起到了重要的作用,随着海面与目标构成的反射器几何形状的不同,在某些特定角度下,多次散射甚至可以形成明显的散射特征。在海上环境使用雷达实现对目标的搜索和跟踪时,雷达入射波在海面与目标之间的二次反射及高阶反射仍然对海上目标的 RCS 贡献起到了非常重要的作用。

参 考 文 献

- [1] Knott E F. RCS reduction of dihedral corners. *IEEE Trans. on Antennas Propag.*, 1977, AP-25(3): 406-409.
- [2] Griesser T and Balanis C A. Dihedral corner reflector backscatter using higher order reflection and diffractions. *IEEE Trans. on Antennas Propag.*, 1987, AP-35(11): 1235-1247.
- [3] Anderson W C. Consequences of nonorthogonality on the scattering properties of dihedral reflectors. *IEEE Trans. on Antennas Propag.*, 1987, AP-35(10): 1154-1159.
- [4] Cui Kai and Xu Xiaojian. EM scattering of a special kind of cavities with applications to RCS calculation of targets over sea surface. CIE International Conference on Radar, Shanghai, 2006: 1772-1776.
- [5] Knott E F. A tool for predicting the radar cross section of an arbitrary trihedral corner. *IEEE Pro. Southeastcon'81 Conference*, Huntsville, Alabama, 1981: 17-20.
- [6] 赵维江. 复杂目标雷达截面计算方法研究. [博士论文], 西安电子科技大学, 1999.
Zhao Wei-jiang. Study on Prediction Techniques of Radar Cross Section of Complex Targets. [Ph.D Dissertation], Xidian University, 1999.
- [7] Gordon W B. Far field approximation of the Kirchoff-Helmholtz representation of scattered fields. *IEEE Trans. on Antennas Propag.*, 1975, AP-23(5): 864-876.
- [8] Burkholder R J, Janpugdee P, and Colak D. Development of computational tools for predicting the radar scattering from targets on a rough sea surface. Technical Report, Ohio State University ElectroScience Laboratory, Columbus, Ohio, 2001.
- [9] Klein L A and Swift C T. An improved model for the dielectric constant of sea water at microwave frequencies. *IEEE Trans. on Antennas Propag.*, 1977, AP-25(1): 104-111.

崔 凯: 男, 1979 年生, 博士生, 研究方向为电磁计算、信号处理。

许小剑: 男, 1963 年生, 博士生导师, 教授, 研究方向为目标雷达与红外特性、微波成像。

毛士艺: 男, 1935 年生, 博士生导师, 教授, 研究方向为雷达信号处理。