

# 海洋环境对水面舰艇雷达散射截面仿真分析的影响

陈文战

(中国人民解放军海军驻上海江南造船(集团)有限责任公司军事代表室,上海 201913)

**摘要:** 水面舰艇雷达截面的仿真分析是现代舰艇隐身设计的重要工作。为了提高仿真计算的精确度,本文重点讨论了海洋环境对水面舰艇雷达截面仿真计算的影响。以四路径模型法和无限大介质板模拟法2种方法分别分析海洋环境的散射特性,比较了2种方法的特点,研究了2种方法的使用范围,并提出了适用于水面舰艇雷达散射截面仿真的计算方法。本文给出的算例表明,提出的海洋环境的模拟仿真方法在水面舰艇雷达散射截面仿真计算中是非常有效的。

**关键词:** 海洋环境; 雷达截面; 四路径模型法; 无限大介质板模拟方法

**中图分类号:** U665.22 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-7649(2009)09-0132-04 **DOI:**10.3404/j.issn.1672-7649.2009.09.026

## The influence of the ocean on the warship RCS computation

CHEN Wen-zhan

(The Military Representative Office of Navy in Jiangnan Shipbuilding Group, Shanghai 201913, China)

**Abstract:** The computation of radar cross section(RCS) is important for modern warship design. In this paper, the author studied on the influence of the ocean environment on the radar cross section computation. In this paper, the author analyzed the advantage of the four-parth module and infinite medium plate method. The character of four-parth module and infinite medium plate method is compared, and the best method is presented in this paper. The example in this paper shows that the method presented is valid for the warship radar cross section computation.

**Key words:** ocean environment; RCS; four-parth module; infinite medium plate method

## 0 引言

水面舰艇雷达截面的仿真计算是现代水面舰艇隐身设计工作重要的技术支撑。因此,随着现代水面舰艇雷达波隐身重要性日益提高,对雷达散射截面仿真计算的要求也越来越高,海洋环境逐渐成为影响仿真精度的重要因素。

当电磁波照射海面时,由于海水的介电特性,会产生一定的漫散射。由于海洋介电特性的不确定性和形状的随机性,对海洋环境电磁特性的准确分析非常困难。为了分析海水的电磁特性,国际上开展了大量的研究工作,比较有代表性的有2种方法:四路径

模型方法和无限大介质板模拟法。2种方法都没有考虑海浪的影响,也就是说2种方法中的海洋模型都是平面模型。四路径模型方法是以电磁波传播的4条路径分别建模计算的方式,计算海洋环境的散射场,具有原理清晰、内存需求低的优点;而无限大介质板方法是计算海水的等效介电参数,然后以无限大介质板作为海洋的等效模型开展仿真计算,此方法具有模型简单、易于实现的优势,结合半空间的矩量法后,此方法的精度也比较高。

因此,本文深入研究了这2种方法,分析了2种方法的特点,并根据水面舰艇的特点,提出了适用于水面舰艇雷达截面分析的计算方法。

收稿日期:2009-07-29; 修回日期:2009-08-03

作者简介:陈文战(1969-),男,从事舰船监造管理工作。

## 1 海洋环境分析方法

目前,应用较多的海洋环境分析方法主要有四路径模型法和介质板模型法。四路径模型法是2001年,Johnson提出的半空间模型分析方法。Johnson认为,平面波照射到半空间目标上时,目标后向散射场近似由以下4部分组成:

1) 入射波直接在散射体表面的感应电流产生的散射场;

2) 入射波在散射体表面感应电流产生的散射场在半空间表面的反射场;

3) 入射波在半空间表面的反射波在散射体表面的感应电流产生的散射场;

4) 入射波在半空间表面的反射波在散射体表面感应电流产生的散射场,在半空间表面的反射场。将上述4部分的散射场矢量相加,就可以得到半空间目标的散射场。文献[1]对四路径方法时域和频域结果均进行了分析,结果证明该方法比较有效。

介质板模型法将海平面等效为一个有耗介质板,其难点在于介质板的介电常数难以确定。海水的介电常数非常复杂,在本文中,作者进行简化处理:

1) 认为海洋是平的。大的海浪对舰艇 RCS 的影响比较大,然而在大多数情况下,海杂波相对于整个海洋和舰艇,其起伏可以忽略,对 RCS 影响不大,因此等效为平面是可以接受的。

2) 认为海水的介电常数仅与海水的温度、盐度及电磁波频率相关。海洋的介电特性非常复杂,甚至可以说海水的介电特性不是常数,而是一个变量。但是,对海水介电特性影响较大的就是海水的温度、盐度及电磁波频率,因此本文根据修正的 Debye 方程,研究海水的温度、盐度及电磁波频率对海水等效介电常数的影响,从而建立介质板模型。

## 2 四路径模型

半空间目标如图1所示<sup>[2]</sup>。假设半空间表面位于  $z = 0$  平面上,其介电常数为  $\epsilon_r$ ,电导率为  $\sigma$ 。

四路径法的散射机制如图2所示,本文将分别讨论这4个路径对半空间目标 RCS 的贡献,并分别推导4个路径求解 RCS 的 PO 积分公式。

### 2.1 路径1 散射场表达式

如图2(a)所示,路径1表示入射波直接照射到散射体表面时,散射体表面感应电流产生的散射场。

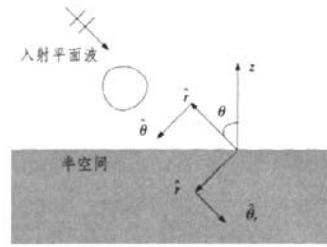


图1 半空间目标模型

Fig. 1 Module in half space

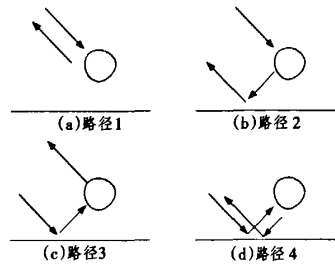


图2 四路径模型方法

Fig. 2 Four-parth module

该路径的散射场结果和散射体位于自由空间的散射场结果相同。路径1的散射场表达式为:

$$\sqrt{\sigma_1} = -\frac{jk}{\sqrt{\pi}} \iint_{s_1} (\hat{r} \cdot \mathbf{n}) e^{2jk\hat{r} \cdot \mathbf{r}'} dS'. \quad (1)$$

式中:  $s_1$  为散射体表面受入射波照射区域;  $\mathbf{r}'$  为  $s_1$  区域一点的位置矢量;  $\mathbf{n}$  为  $\mathbf{r}'$  处的法向单位矢量。

### 2.2 路径2 散射场表达式

如图2(b)所示,路径2表示入射波照射到散射体表面时,散射体表面感应电流产生的散射场在半空间表面的反射场。路径2的雷达散射截面表达式为:

$$\sqrt{\sigma_2} = -\frac{jk}{\sqrt{\pi}} \iint_{s_1} \mathbf{n} \cdot \begin{Bmatrix} R_H \hat{r} \\ R_V \hat{r} \end{Bmatrix} e^{jk(\hat{r} + \hat{r}') \cdot \mathbf{r}'} dS'. \quad (2)$$

### 2.3 路径3 散射场表达式

如图2(c)所示,路径3表示入射波在半空间表面的反射波照射到散射体表面时,散射体表面的感应电流产生的散射场。路径3的 RCS 表达式为:

$$\sqrt{\sigma_3} = -\frac{jk}{\sqrt{\pi}} \iint_{s_2} \mathbf{n} \cdot \begin{Bmatrix} R_H \hat{r} \\ R_V \hat{r} \end{Bmatrix} e^{jk(\hat{r} + \hat{r}') \cdot \mathbf{r}'} dS'. \quad (3)$$

### 2.4 路径4 散射场表达式

如图2(d)所示,路径4表示入射波在半空间表面的反射波照射到散射体表面时,散射体表面感应电流产生的散射场在半空间表面的反射场。路径4的 RCS 表达式为:

$$\sqrt{\sigma_4} = -\frac{jk}{\sqrt{\pi}} \left\{ \frac{R_h^2}{R_v^2} \right\} \iint_{\Omega} (\hat{r} \cdot \hat{n}) e^{2jk\hat{r} \cdot \hat{n}} \cdot \hat{r}' dS'. \quad (4)$$

根据式(1)~(4),得到目标的 RCS 表达式为:

$$\sqrt{\sigma} = \sqrt{\sigma_1} + \sqrt{\sigma_2} + \sqrt{\sigma_3} + \sqrt{\sigma_4}.$$

四路径模型法概念清晰,但是计算过程较复杂,需要计算 4 条路径,对于水面舰艇,关心的 RCS 区域大都是掠入射区域,四路径方法中的 2,3,4 条路径影响较小。并且,物理光学方法用散射体表面的感应电流取代散射体本身作为散射场的源,然后对表面感应电流积分而求得散射场。物理光学方法基于以下 3 点假设:

1) 物体表面曲率半径远大于波长;

2) 物体表面上只有那些被入射波直接照射的区域才有感应电流存在;

3) 物体受照射表面上感应电流的特性和在入射点与表面相切的无穷大平面上的电流特性相同。

因此,物理光学方法本质上是一种高频近似方法,可以计算电大目标,但是计算精度较低。所以,在计算机内存允许的情况下尽量不要采用本文中的四路径模型的方法进行仿真计算舰艇的 RCS。

### 3 介质板模型

海水表面的复介电常数依赖于入射波的入射频率及海水的物理参数:温度  $T$  和盐度  $S$ 。它们之间的关系由修正的 Debye 方程给出:

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'',$$

$$\varepsilon' = \varepsilon_{ir} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{ir}}{1 + (\omega t_r)^2(1-\alpha)},$$

$$\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1},$$

$$\omega = 2\pi F.$$

式中:  $F$  为入射电磁波的频率, Hz;  $\varepsilon_{ir} = 4.9 \pm 20$  为高频极限下海水的介电常数,无量纲;  $\varepsilon_s$  和  $\sigma$ , 分别为海水的静态介电常数和离子的导电率;  $t_r$  为海水的延迟时间;  $\alpha = 0.02 \pm 0.007$  为描述延迟时间分布的经验参数。 $\varepsilon_s, \sigma, t_r$  的表达式是根据测量数据得到的经验公式。 $T$  为海水温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $S$  为盐度, ppt。

1) 当  $4 < S < 35$  ppt 时,海水盐度较低,  $\varepsilon_s$  可表示为:

$$\varepsilon_s = \varepsilon(T)\alpha(T, S). \quad (5)$$

式中:

$$\begin{aligned} \varepsilon(T) &= 87.134 - 1.949 \times 10^{-1} T - \\ &1.276 \times 10^{-2} T^2 + 2.491 \times 10^{-4} T^3, \end{aligned}$$

并且:

$$\begin{aligned} \alpha(T, S) &= 1.0 + 1.613 \times 10^{-5} ST - \\ &3.656 \times 10^{-3} S + 3.21 \times 10^{-5} S^2 - \\ &4.232 \times 10^{-7} S^3. \end{aligned}$$

2) 当  $0 < T < 40^{\circ}\text{C}$ ,  $0 < S < 157$  ppt 时,  $t_r$  可表示为:

$$t_r(T, S) = t(T, 0)b(T, S). \quad (6)$$

式中:

$$\begin{aligned} 2\pi t(T, 0) &= 1.111 \times 10^{-10} - 3.824 \times 10^{-12} T + \\ &6.938 \times 10^{-12} T^2 - 5.096 \times 10^{-16} T^3, \end{aligned}$$

并且:

$$\begin{aligned} b(T, S) &= 1 + 2.282 \times 10^{-5} TS - 7.638 \times 10^{-4} S - \\ &7.76 \times 10^{-6} S^2 + 1.105 \times 10^{-8} S^3. \end{aligned}$$

3) 当  $0 < S < 40$  ppt 时,  $\sigma_s$  可表示为:

$$\sigma_s = \sigma(25, S)e^{(-\Delta\theta)}. \quad (7)$$

式中:

$$\Delta = 25 - T,$$

$$\beta = 2.033 \times 10^{-2} + 1.266 \times 10^{-4} \Delta +$$

$$2.464 \times 10^{-6} \Delta^2 - 1.849 \times 10^{-5} S +$$

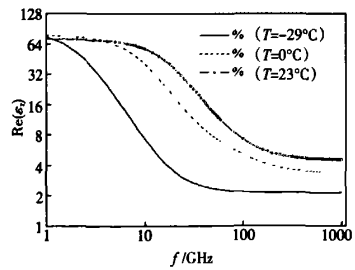
$$2.551 \times 10^{-7} S \Delta - 2.551 \times 10^{-8} S \Delta^2,$$

$$\sigma(25, S) = 0.182 - 1.461 \times 10^{-3} S +$$

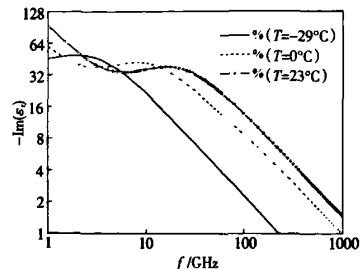
$$2.093 \times 10^{-5} S^2 - 1.282 \times 10^{-7} S^3.$$

注:  $\varepsilon_{ir}$  和  $\alpha$  的表达式是近似表达式,在低频情况下,该表达式较准确;当频率超过 20 GHz 时,该表达式有较明显的误差。

图 3 是海水介电常数分布图,海水介电常数与海水的温度、盐度以及电磁波的频率相关。根据图 3 和计算频率,得出海水对应的介电常数,代入计算软件,



(a) 介电常数实部



(b) 介电常数虚部

图 3 海水介电常数

Fig. 3 The dielectric parameter of the sea water

即可得到海洋的等效模型。

无限大介质板模拟海洋环境具有建模简单的优势,在 FEKO 等商业软件中,比较易于实现,并且基于该方法的矩量法计算精度较高,是目前比较理想的海洋环境模拟方法,该方法对计算机资源需求较高,一般来说,只有在计算机内存允许的情况下,才建议采用该方法作为海洋环境的等效分析方法。

4 算例分析

某型舰模型如图 4 所示,按照无限大介质板模拟法模拟海洋环境,建立海洋环境下某舰的雷达散射截面仿真计算模型。在某频率下,海水的介电常数为: $\epsilon = 79, \sigma = 4$ 。将介电常数代入 FEKO,建立海洋环境等效模型。



图 4 海面某舰的仿真模型  
Fig. 4 Module of warship on the sea

根据水面舰艇的特点,RCS 一般关心其掠入射区域。因此,本文计算在  $\theta = 89^\circ, \varphi$  从  $0^\circ$  到  $360^\circ$  区域的雷达散射截面,如图 5 所示。

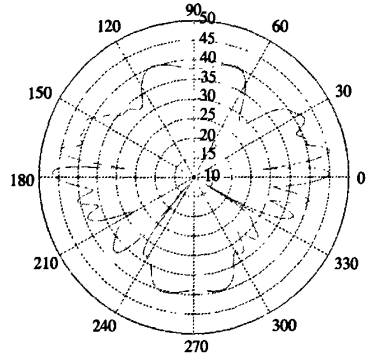


图 5 某频率下该舰雷达散射截面分布图  
Fig. 5 RCS of the warship

参考文献:

- [1] Johnson J T. A study of the four-path model for scattering from an object above a half-space[J]. Microwave Optical Technology Letters,2001,30(2):130-134.
- [2] 陈晓洁. 电大平台的雷达隐身性研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2007. 45-46.

(上接第 106 页)

5 结 语

采用 VPN 和 CDMA1X 技术运用在实际的疏浚工程船舶无线传输平台上,这充分体现了分布式远程数据采集和集中监控的思想。通过长时间运行,在一定程度上解决了在现有海上无线链路通讯状况较弱的情况下对数据和文件进行远程传输的问题,为客户在陆地实现远程监测、远程诊断提供了有效的技术解决方案,极大地提高了生产管理效率。

参考文献:

- [1] 李式巨. 数字无线传输[M]. 北京:清华大学出版社,2007.
- [2] 高海英. VPN 技术[M]. 北京:机械工业出版社,2003.
- [3] 张中荃. 接入网技术[M]. 北京:人民邮电出版社,2003.
- [4] 常永宇. CDMA 2000-1X 网络技术[M]. 北京:电子工业出版社,2004.
- [5] 周伯扬. CDMA 网络技术[M]. 北京:国防工业出版社,2005.

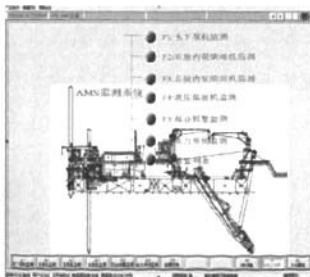


图 4 监控程序界面  
Fig. 4 Interface of monitoring program

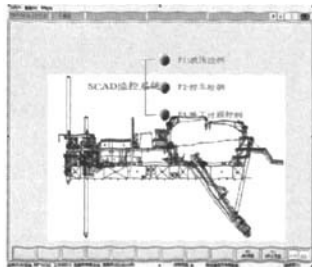


图 5 AMS 程序界面  
Fig. 5 Interface of AMS program

## 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/>