

## 论文

## 海面导弹目标检测中的 RCS 分析

李洋<sup>①\*</sup>, 陶然<sup>②</sup>

① 中国电子科学研究院, 北京 100041;

② 北京理工大学信息与电子学院, 北京 100081

\* E-mail: lyliyang@bit.edu.cn

收稿日期: 2014-01-24; 接受日期: 2014-05-19; 网络版发表日期: 2014-11-14

**摘要** 海杂波背景下导弹目标的检测问题由于海杂波对检测的干扰而成为非常具有挑战的问题. 本文通过利用多层快速多极子方法计算海面上方预设的通用导弹目标的有效雷达截面 RCS, 同时给出分数威尔斯特拉斯散射模型的简化形式, 并利用其简化形式结合目标在海面投影面积计算海面 RCS. 最后, 目标与其对应的海面 RCS 进行比较, 得出雷达回波信杂比与入射角度、入射频率和极化方式的关系. 结论可以帮助我们设计用于强海杂波背景下的导弹目标和其他类似目标检测的雷达系统.

**关键词**导弹目标  
海杂波  
有效雷达截面(RCS)  
分数威尔斯特拉斯散射模型  
多层快速多极子算法  
(MLFMA)

海面微弱目标检测在很多利用领域都有重要的应用, 包括光学和微弱遥感、雷达监控、图像处理、大范围海洋监测等(Leung 和 Young, 2000; Liao 等, 2008; Wang 等, 2008; Bruschi 等, 2011). 导弹是微弱目标重要的一种实例, 在检测中难以实现, 原因主要包括如下三个方面: 首先有大量的海面背景杂波对目标后向散射信号产生干扰; 其次导弹目标的多普勒频移通常会淹没在因为海面运动引起的多普勒频移中, 产生多普勒频率混叠; 最后导弹目标相对于背景海面非常渺小, 进而使得导弹后向散射能量相对于海面回波非常微弱, 有时会比海杂波还要微弱(Doisy 等, 2000; Leung 等, 2002; Sira 等, 2007).

为了对海杂波背景的导弹目标进行检测, 有两种解决方式: 一是对雷达系统参数进行优化, 选取适用于海面微弱目标检测的系统参数, 包括入射角度、入射频率、极化方式等(Patton 和 Rigling, 2012); 二是利用更加先进的雷达信号处理手段(Bai 和 Zhou,

2010). 本文考虑通过分析雷达系统参数与海面导弹目标检测的性能之间的关系来讨论用于导弹目标检测的最佳雷达系统参数选取.

对于导弹目标的建模, 我们使用最为常用的通用模型(Youssef, 1989), 然后利用矩量法计算其不同入射角度、入射频率和极化方式对应的有效雷达截面(RCS)(Harrington, 1968). 同时随着海面风速的逐渐增加, 深水、开域的非线性海面波浪将占有主导地位, 波浪表现为波峰尖锐、波谷平坦的外形特征. 分数威尔斯特拉斯散射模型用于估计非线性海面电磁散射场, 此处将给出分数威尔斯特拉斯散射模型的简化形式(Tao 等, 2012).

非线性海面 RCS 将通过给出的分数威尔斯特拉斯散射简化模型进行计算得到. 我们通过比较不同雷达系统参数的导弹目标和海杂波信杂比对用于海面微弱目标检测的雷达系统参数进行讨论, 进行选取适当的系统参数提高系统的检测性能. 结论也可以用

中文引用格式: 李洋, 陶然. 2014. 海面导弹目标检测中的 RCS 分析. 中国科学: 地球科学, 44: 2735-2742

英文引用格式: Li Y, Tao R. 2014. RCS analysis in the detection of a generic missile target with sea clutter background. Science China: Earth Sciences, 57: 2845-2852, doi: 10.1007/s11430-014-4944-y

于类似海面目标检测的雷达系统的参数选取应用中。

## 1 基本方法

导弹目标和背景海面的 RCS 确定通常不是一个简单问题, 并且已经有众多相关的研究工作对此问题作出研究. 此处导弹目标的 RCS 计算式基于多层快速多极子算法(Lu 和 Chew, 1994; Song 和 Chew, 1995), 同时海面 RCS 计算是利用分数威尔斯特拉斯散射模型(Tao 等, 2012). 由于分数威尔斯特拉斯散射模型的高复杂性, 我们也将给出其简化形式, 并用于背景海面的 RCS 计算.

### 1.1 通用导弹目标模型 RCS 计算

大多数导弹可以依赖于不同的飞行距离进行分类. 为了达到远程攻击的目的, 远程巡航导弹采用低空(通常为 10~1000 m)、慢速(约 0.6 Ma)方式飞行. 由于其体积很小, 所以可以看成海面微弱目标的一个例子. 本文选用的通用导弹目标模型具有如下参数, 包括: 弹体长度 5 m, 弹翼厚度 0.01 m, 弹翼长度 0.5 m, 同侧弹翼间隔 1 m, 弹头为半圆形, 直径与弹体直径相同为 0.6 m(弹体如图 1 所示).

为了解决任意形状的三维理想导电体的电磁散射和辐射问题, 散射体表面积分方程是最为常用的求解方法, 而矩量法是最重要和最常用的表面积分方程数值解法.

对于理想导体, 散射体表面边界条件可以由电场积分方程, 磁场积分方程和联合场积分方程表示(Poggio 和 Miller, 1973; Ubeda 和 Rius, 2006; Lee 等, 2013).

电场积分方程和磁场积分方程可以分别表示为

$$-\frac{j}{\omega\mu} \hat{n}(\vec{r}) \times \vec{E}^i(\vec{r}) = \hat{n}(\vec{r}) \times \iint_S G(\vec{r}, \vec{r}') \left[ \vec{J}(\vec{r}') + \frac{1}{k_e^2} \nabla \nabla' \cdot \vec{J}(\vec{r}') \right] d\vec{r}', \quad (1)$$

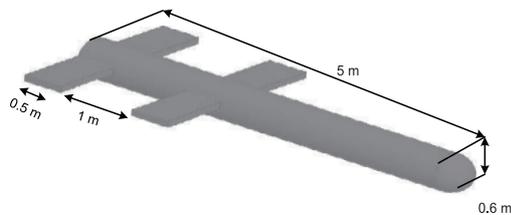


图 1 通用导弹模型

$$\hat{t} \cdot \hat{n}(\vec{r}) \times \vec{H}^i(\vec{r}) = \hat{t} \cdot \frac{\vec{J}(\vec{r}')}{2} + \hat{t} \cdot \hat{n}(\vec{r}) \times \iint_S \vec{J}(\vec{r}') \times \nabla G(\vec{r}, \vec{r}') d\vec{r}', \quad (2)$$

式中, 向量  $\hat{t}$  和  $\hat{n}$  分别为散射表面切向和外向单位法向量,  $\vec{E}^i(\vec{r})$   $\vec{H}^i(\vec{r})$  和  $\vec{H}^i(\vec{r})$  分别为入射电场和磁场,  $\vec{J}(\vec{r}')$  是散射表面感应电流,  $k_e$  表示入射电磁波数, 同时  $G(\vec{r}, \vec{r}')$  表示标量格林函数.

联合场积分方程通过对电场积分方程和磁场积分方程的凸组合方式进行定义, 可以利用式(1)和(2)表示为

$$CFIE = \alpha \cdot EFIE + \frac{j}{k} (1 - \alpha) \cdot MFIE, \quad (3)$$

式中, 参数  $\alpha$  是 0 和 1 之间的数.

基于数值计算技术的矩量法要求目标表面进行细致的离散化, 并将表面电流扩展在一系列基函数的组合.

对于电场积分方程的求解问题, 理想导体目标表面感应电流可以表示为一系列基函数  $b_n$  的组合如下:

$$\vec{J}(\vec{r}) = \sum_{n=1}^N a_n b_n(\vec{r}), \quad (4)$$

式中,  $a_n, n=1, 2, \dots, N$  为加权系数. 通过利用矩量法,  $N \times N$  稠密矩阵方程定义为

$$\sum_{n=1}^N Z_{mn} a_n = v_m, \quad (5)$$

式中,

$$Z_{mn} = \int_{S_m} d\vec{r}_m(\vec{r}) \cdot \int_{S_n} d\vec{r}' \left( \vec{I} - \frac{1}{k_e^2} \nabla \nabla' \right) G(\vec{r}, \vec{r}') \cdot b_n(\vec{r}')$$

为阻抗矩阵, 同时  $v_m = \frac{j}{k\eta} \int_{S_m} d\vec{r}_m(\vec{r}) \cdot \vec{E}^i(\vec{r})$  为  $m$  阶激励矢量,  $t_m(\vec{r})$  是测试函数. 这样感应电流  $\vec{J}(\vec{r})$  可以根据式(1)~(5)计算得到, 因此散射场  $\vec{E}^s$  也可以相应得到.

为了计算更加准确积分方程解, 散射体表面离散元素小于入射波长. 然而目标表面的精细离散化导致矩阵方程具有大量的未知量, 造成了运算量的高度增加. 通过利用多层快速多极子算法, 电磁远场可以利用多层设计和分组进行计算.

为了计算更加准确积分方程解, 散射体表面离散元素小于入射波长. 然而目标表面的精细离散化导致矩阵方程具有大量的未知量, 造成了运算量的高度增加. 通过利用多层快速多极子算法, 电磁远场可以利用多层设计和分组进行计算.

利用多层快速多极子算法计算散射远场主要通

过三个步骤实现, 包括: 多层聚集、层间转移和多层扩散. 多层聚集是计算从树结构的底部向上辐射到第二级得到的数值, 层间转移是将数值改变为入射源, 因此多层扩散步骤拟方向的将入射源结果分解到树结构的最底层部分.

多层快速多极子算法可以将高运算复杂度由  $O(N^2)$  减小为  $O(N \log N)$ , 使得解决散射或者辐射场问题以较小的代价得以实现(Ergul 和 Gurel, 2009).

我们利用多层快速多极子算法计算不同入射角度、不同入射频率和不同极化方式的通用导弹目标模型的 RCS, 详细的导弹目标 RCS 计算结果将在下一节中给出.

### 1.2 背景海面的 RCS 计算

假设海面流体流动无旋且可以忽略黏性影响, 则流场管理方程由质量守恒和力平衡关系决定. 对于微幅度波浪, 所有的高阶动力学和运动学边界成分可以直接忽略, 进而求解管理方程得到的波浪方程形式我们称为海面线性波浪方程.

随着海面风速的逐渐增加, 海面波浪幅度逐渐增大. 在管理方程中忽略的高阶微分成分变得更加重要, 在推导过程中忽略高阶微分项的近似不能成立. 波浪的二阶非线性表达形式是管理方程保留边界条件的二阶微分成分而得到的管理方程解. 以此类推, 我们可以保留三阶、五阶等进而得到三阶 Stokes 波浪方程解、五阶 Stokes 方程解等(Stokes, 1847; Osborne, 2010).

对于开域、深水环境, 二阶 Stokes 波浪表达式是最经典的非线性波浪形式, 所以本文主要考虑二阶 Stokes 波浪. 由于海面风速的增加而导致的波浪幅度超过一定的范围, 海面将由无数多个不同尺度的二阶 Stokes 波浪线性叠加而组成. 分数维尔斯特拉斯散射模型利用分形概念可以得到非线性海面电磁散射场的解析闭合解(Tao 等, 2012). 非线性海面的电磁散射解析闭合解有助于我们更加深入理解海面散射机理、更加准确的对海面散射场进行仿真等工作(Franceschetti 和 Riccio, 2006).

考虑具有  $E_p$  幅度平面波入射, 散射体为  $x=0$  到  $x=L$ , 一维海面, 在观测位置  $\mathbf{r}$  处的散射场  $E_{pq}^{(s)}(\mathbf{r})$  可以表示为  $N$  个积分方程的求和如下:

$$E_{pq}^{(s)}(\mathbf{r}) = -\frac{jk_e e^{-jk_e r}}{4\pi r} E_p F_{pq}(\theta_i, \theta_s) L \sum_{m_0=-\infty}^{\infty} \dots \sum_{m_{N_f-1}=-\infty}^{\infty}$$

$$\times \left\{ \begin{aligned} & e^{j \sum_{n=0}^{N_f-1} m_n \kappa \phi_n} \prod_{n=0}^{N_f-1} J_{m_n}(\nu_z \sigma \hat{C} \kappa b^{(s-2)^n}) \frac{e^{-j2LH_{1,m}}}{jH_{1,m}} \\ & + e^{j \sum_{n=0}^{N_f-1} m_n \kappa \phi_n} \prod_{n=0}^{N_f-1} J_{m_n}(\nu_z \sigma \hat{C} \kappa b^{(s-2)^n}) \frac{e^{-j2LH_{2,m}}}{jH_{2,m}} \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

式中,  $k_e$  为入射电磁波数,  $\nu_z = -k_e(\cos \theta_i + \cos \theta_s)$ ,  $F_{pq}$  是入射波和接受信号的标量极化表达式,  $p=h, v, q=h, v, F_{pq}$  具有如下表示形式:

$$\begin{aligned} F_{hh}(\theta_i, \theta_s) &= -(1+R_h)\cos \theta_s + (1-R_h)\cos \theta_i, \\ F_{hv}(\theta_i, \theta_s) &= 0, \quad F_{vh}(\theta_i, \theta_s) = 0, \\ F_{vv}(\theta_i, \theta_s) &= -(1-R_v)\cos \theta_s + (1+R_v)\cos \theta_i. \end{aligned}$$

交叉极化的表达形式  $F_{hv}$  和  $F_{vh}$  等于 0 对于一维散射情况. 水平和垂直费舍尔反射系数  $R_h$  和  $R_v$  具有如下表达形式:

$$\begin{aligned} R_h &= \frac{\cos \theta_i - \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i}}{\cos \theta_i + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i}}, \\ R_v &= \frac{\epsilon_r \cos \theta_i - \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i}}{\epsilon_r \cos \theta_i + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i}}. \end{aligned}$$

参数  $s$  和  $b$  分别是海面分形建模的散射表面维度和尺度因子. 参数  $\hat{C} = \sqrt{\frac{8c}{(1+c)^2} \cdot \frac{1-b^{2(s-2)}}{1-b^{2(s-2)N_f}}}$  用于归一化分形海面幅度, 使得模型的标准差与实际海面标准差  $\sigma$  相等.  $N_f$  是海面分解波浪数量, 参数  $c$  和  $\kappa = \frac{1+c}{2c}$  标准海面的非线性程度.

对于深度为  $h$  的海面, 非线性因子  $c$  可以表示如下形式:

$$c = \frac{-\frac{A^2 k}{2sh2kh} + A - \frac{A^2 kchkh(ch2kh+2)}{4sh^3kh}}{\frac{A^2 k}{2sh2kh} + A + \frac{A^2 kchkh(ch2kh+2)}{4sh^3kh}}, \quad (7)$$

式中,  $A$  是海面波浪的平均幅度  $A \approx 4\sigma \approx 1.416\sqrt{\alpha U^4/4\beta g^2}$ ,  $U$  是海面上方 19.5 m 处测量的风速, 常系数  $\alpha=0.0081$  和  $\beta=0.74$ . 系数  $k$  是海面占主导波浪的波数  $k = \sqrt{2\beta/3g}/U^2$  (Broschat, 1993).

对于无限水深( $h \rightarrow \infty$ ), 非线性因子  $c$  可以表达为

$$c_{inf} = A - \frac{A^2 k}{2} / \left( A + \frac{A^2 k}{2} \right). \quad (8)$$

式(6)中的一些符号表示如下:

$$H_{1,\underline{m}} = \left( k_e (\sin \theta_i - \sin \theta_s) + \sum_n m_n \phi_n \right),$$

$$H_{2,\underline{m}} = \left( k_e (\sin \theta_i - \sin \theta_s) + \sum_n m_n c \phi_n \right), \quad \phi_n = \kappa \kappa b^n,$$

$$\underline{m} = (m_0, m_1, \dots, m_{N_f-1}).$$

下面将对式(6)进行一些简化工作. 贝塞尔函数的乘积项在式(6)中起到主导作用. 当自变量  $u_n$  和阶数  $m_n$  满足  $|u_n| < |m_n|$  时, 贝塞尔函数满足  $J_{m_n}(u_n) \rightarrow 0$ . 因此, 式(6)中含贝塞尔函数的项满足如下:

对于  $n=1, 2, \dots, N_f-1$ , 当满足  $|m_n| > \nu_z \sigma \widehat{C} \kappa b^{(s-2)^n}$  有

$$\prod_{n=0}^{N_f-1} J_{m_n}(\nu_z \sigma \widehat{C} \kappa b^{(s-2)^n}) \approx 0. \quad (9)$$

对于  $n=1, 2, \dots, N_f-1$ , 当满足  $|m_n| > \nu_z \sigma \widehat{C} \kappa b^{(s-2)^n}$  有

$$\prod_{n=0}^{N_f-1} J_{m_n}(\nu_z \sigma \widehat{C} \kappa b^{(s-2)^n}) \approx 0. \quad (10)$$

我们比较容易可以发现  $|\nu_z \sigma \widehat{C} \kappa b^{(s-2)^n}| > \nu_z \sigma \widehat{C} \kappa b^{(s-2)^n}$ , 这样我们使用上界或者下界来简化散射模型.

散射迭代数  $M$  的确定对于提高模型使用效率非常重要. 对于每一个散射迭代  $n$ , 当满足  $|m_n| > |\nu_z \sigma \widehat{C} \kappa b^{(s-2)^n}|$ , 散射模型可以进行简化. 因此阶数  $m_n$  可以视为贝塞尔函数自变量的上界. 总的迭代数  $M$  满足如下:

$$M = \prod_{n=0}^{N_f-1} \left( 2 \lceil \nu_z \sigma \widehat{C} \kappa b^{(s-2)^n} \rceil + 1 \right). \quad (11)$$

式(11)为我们提供了散射模型迭代数量的估计, 但是实际计算过程中, 结合海面参数的性质其运算量可以进一步降低. 对于  $n$  从 1 到  $N_f-1$ , 当  $\nu_z \sigma \widehat{C} \kappa b^{(s-2)^n} \rightarrow 0$ , 式(11)说明了只要我们考虑  $m_n=0$  就可以近似表示整个散射场的数值, 这样  $n$  阶迭代项的可以表示为  $m=[0, 0, \dots, 0]$ .

因此散射模型(6)进一步简化形式为

$$E_{pq}^{(s)}(\mathbf{r}) = \frac{-jk_e e^{-jk_e r} E_p F_{pq}(\theta_i, \theta_s) L}{4\pi r}$$

$$\times \left\{ \begin{array}{l} \prod_{n=0}^{N_f-1} J_0(\nu_z \sigma \widehat{C} \kappa b^{(s-2)^n}) \frac{-e^{-j2LH_{1,\underline{m}}}}{jH_{1,\underline{m}}} \\ + \prod_{n=0}^{N_f-1} J_0(\nu_z \sigma \widehat{C} \kappa b^{(s-2)^n}) \frac{-e^{-j2LH_{2,\underline{m}}}}{jH_{2,\underline{m}}} \end{array} \right\}. \quad (12)$$

基于如下的贝塞尔函数近似:

$$J_0(x) = 1 - \frac{1}{4}x^2 + \frac{1}{64}x^4 - \dots. \quad (13)$$

当一个小的自变量满足  $\nu_z \sigma \widehat{C} \kappa b^{(s-2)^n} \rightarrow 0$ , 我们发现含贝塞尔函数的项满足  $\prod_{n=0}^{N_f-1} J_0(\nu_z \sigma \widehat{C} \kappa b^{(s-2)^n}) \approx 1$ ,

同时  $\prod_{n=0}^{N_f-1} J_0(\nu_z \sigma \widehat{C} \kappa b^{(s-2)^n}) \approx 1$ . 因此结合式(12)和(13),

散射场  $E_{pq}^{(s)}(\mathbf{r})$  进一步简化为

$$E_{pq}^{(s)}(\mathbf{r}) = \frac{-jk_e e^{-jk_e r} E_p F_{pq}(\theta_i, \theta_s) L}{4\pi r} \times \left\{ \frac{-e^{-j2LH_{1,\underline{m}}}}{jH_{1,\underline{m}}} + \frac{-e^{-j2LH_{2,\underline{m}}}}{jH_{2,\underline{m}}} \right\}. \quad (14)$$

在各种海面遥感应用中, 后向散射系数估计经常被使用到. 对于海面或其他大范围散射体的散射描述, 通常使用归一化有效雷达截面(NRCS)进行描述, NRCS 表示为

$$\sigma_{pq}^0 = \frac{4\pi r^2 \langle |E_{pq}|^2 \rangle}{A |E_p|^2}. \quad (15)$$

式中, 符号  $\langle \cdot \rangle$  表示统计平均运算.

根据式(6), (12)和(14), 可以计算得到海面的 NRCS. 对于后向散射情况, 极化散射系数  $F_{pq}$  表示如下:

$$F_{hh}(\theta_i) = -2R_h(\theta_i) \cos \theta_i, \quad F_{vv}(\theta_i) = 2R_v(\theta_i) \cos \theta_i.$$

对于目标和海面的 RCS 比较, 我们将海面 NRCS 乘以目标在海面的投影面积进而得到考虑海面的 RCS, 即  $RCS = S \times NRCS$ , 其中  $S$  为目标在海面垂直投影面积. 下文在比较过程中都是用的 RCS 取代海面的 NRCS, 在比较过程中不一一详述.

## 2 RCS 比较和讨论

假设入射角  $\theta$  从  $0^\circ$  变化到  $80^\circ$ ,  $\varphi=0^\circ$ . 入射电场

几何结构如图 2 所示. 入射频率由 500 MHz 变化到 1300 MHz, 使用极化模式分别为水平极化 HH 和垂直极化 VV 方式.

图 1 中通用导弹目标模型的 NRCS 利用多层快速多极子算法进行计算. 同时对于随机海面散射体, 分数维尔斯特拉斯散射模型的使用条件需要满足如下形式:

$$\frac{\xi_0}{\lambda} > 6, \quad (16)$$

$$\frac{\sigma}{\xi_0 \cos \theta_i} \leq 0.2. \quad (17)$$

式中,  $\xi_0$  是海面模型的相关长度,  $\theta_i$  是入射角度. 对于非线性海面散射模型, 我们利用相关长度的上确界  $\xi_0^2$  和下确界  $\xi_0^1$  分别代替式(16)和(17)中的相关长度. 利用相关长度的上确界和下确界代替相关长度的目的是简化求解相关长度的计算.

根据 Tao(2012)给出的海面参数, 可以得到海面幅度的标准差近似等于  $\sigma \approx 0.462956$ . 其相关长度上确界  $\xi_0^2$  近似等于 14.3300717532 m, 下确界  $\xi_0^1$  近似等于 13.0072958991 m.

利用式(16)和(17)和上面给出的标准差、相关长度的估计, 可以发现模型要求的最小入射频率为 138.383874 MHz, 入射角度在  $(0^\circ, 80.70^\circ)$  之间.

利用线性海面电磁散射分形模型(Berizzi 等, 1999; Jaggard 和 Sun, 1990)得到的最小入射频率是 134.077476 MHz, 入射角度在  $(0, 78.92^\circ)$  之间. 从式(7)可以求得非线性因子  $c=0.9740$ .

假设预先设置的远程亚音速巡航导弹目标如图 2 所示, 同时假设在海面上方 100 m 高处飞行. 因为导弹和海面之间距离很大, 所以此处忽略导弹和海面电磁散射干扰的耦合.

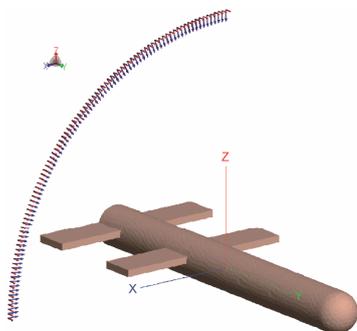


图 2 入射场几何

RCS 和信杂比对比将在下面的讨论中给出. 目标与海面回波的信杂比此处定义为  $10\log(\sigma_{\text{missile}}/\sigma_0)$ , 其中  $\sigma_{\text{missile}}$  表示导弹目标的 RCS,  $\sigma_0$  表示海面背景的回波 RCS. 入射频率此处分别采用了  $f=500, 700, 900$  和 1100 MHz.

如图 3(a), (c), (e)和(g))所示, 导弹目标 RCS 在区间(15 dB, 25 dB)中随着入射角从  $0^\circ \sim 80^\circ$  变化比较稳定, 但是海面 RCS 却随着入射角度的增加而迅速减小. 同时海面垂直极化 RCS 相对于水平极化情况减小相对缓慢.

目标与海面信杂比如图 3(b), (d), (f)和(h))中所给出. 对于入射角度在  $0^\circ \sim 10^\circ$ , 目标回波的信杂比非常小, 在 0 dB 以下. 此种情况导弹目标是非常难以检测得到的, 除非根据目标和海面多普勒频率的差别从而利用多普勒方法进行检测(Doisy 等, 2000).

当入射角度近似大于  $10^\circ$  的情况下, 目标和海面回波信杂比超过 0 dB, 特别是在角度大于  $50^\circ$  情况. 这种现象说明大入射角度将有利于对海面背景的微弱目标检测. 同时从图像也可以看出水平极化方式相对于垂直极化方式信杂比高, 更加有利于我们对海面背景的微弱目标检测. 两种极化的差别在角度超过  $20^\circ$  情况下表现尤为明显. 随着入射角度的增加, 这种优势变得越来越明显.

从图 3 可以发现导弹模型和非线性海面具有随着入射频率变化趋势相似的变化趋势, 他们之间的差别在于临界点的不同, 但是结论是相似的.

相对于海面, 小的入射角度对应着弱的目标 RCS, 在入射频率 500, 700, 900 和 1100 MHz 的情况下水平极化的临界点分别为  $5^\circ, 10^\circ, 8^\circ, 17^\circ$ , 垂直极化的临界点分别为  $5^\circ, 8^\circ, 15^\circ, 17^\circ$ . 水平极化方式相对于垂直极化方式具有比较小的 RCS, 但是目标对于采用不同的极化方式不敏感, 差别很小. 对于各种入射频率, 对于海面导弹目标的检测, 水平极化方式都是一种比较好的选择.

在图 3 中, 我们已经给出了导弹目标和海面背景随着不同入射角度、不同极化方式的 RCS 和目标信杂比分析和比较. 同时我们需要研究 RCS 和目标信杂比随着不同频率的变化关系, 所以在图 4 中给出入射频率从 500 MHz 到 1.3 GHz 变化的目标和海面 RCS 和目标回波信杂比随着入射角度(包括:  $20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$  和  $80^\circ$ )的变化关系.

从图 4(b), (d), (f)和(h))可以看出, 目标回波信

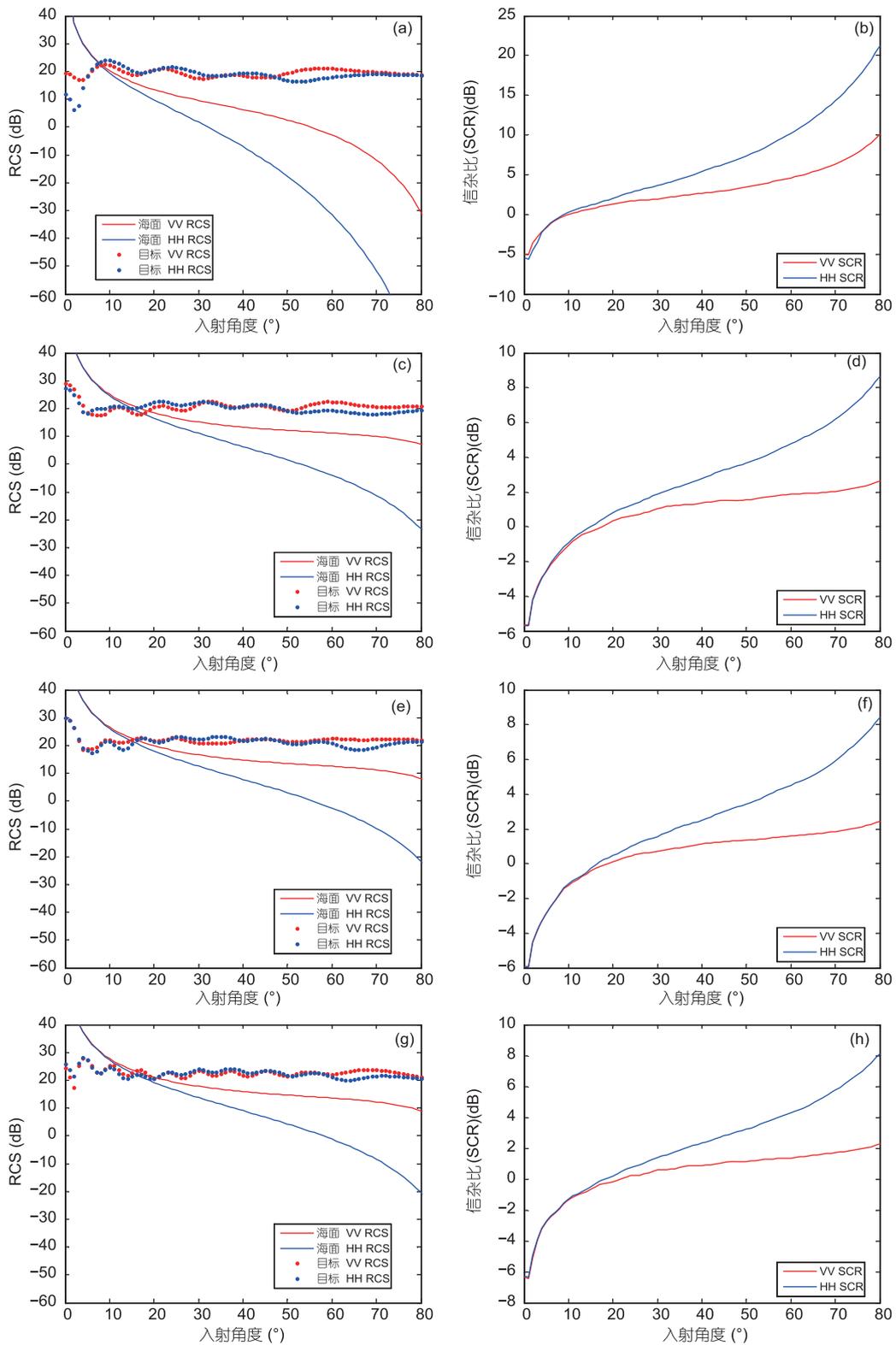


图3 背景海面和导弹目标的不同频率 RCS 和信杂比较

(a), (b) 500 MHz; (c), (d) 700 MHz; (e), (f) 900 MHz; (g), (h) 1100 MHz

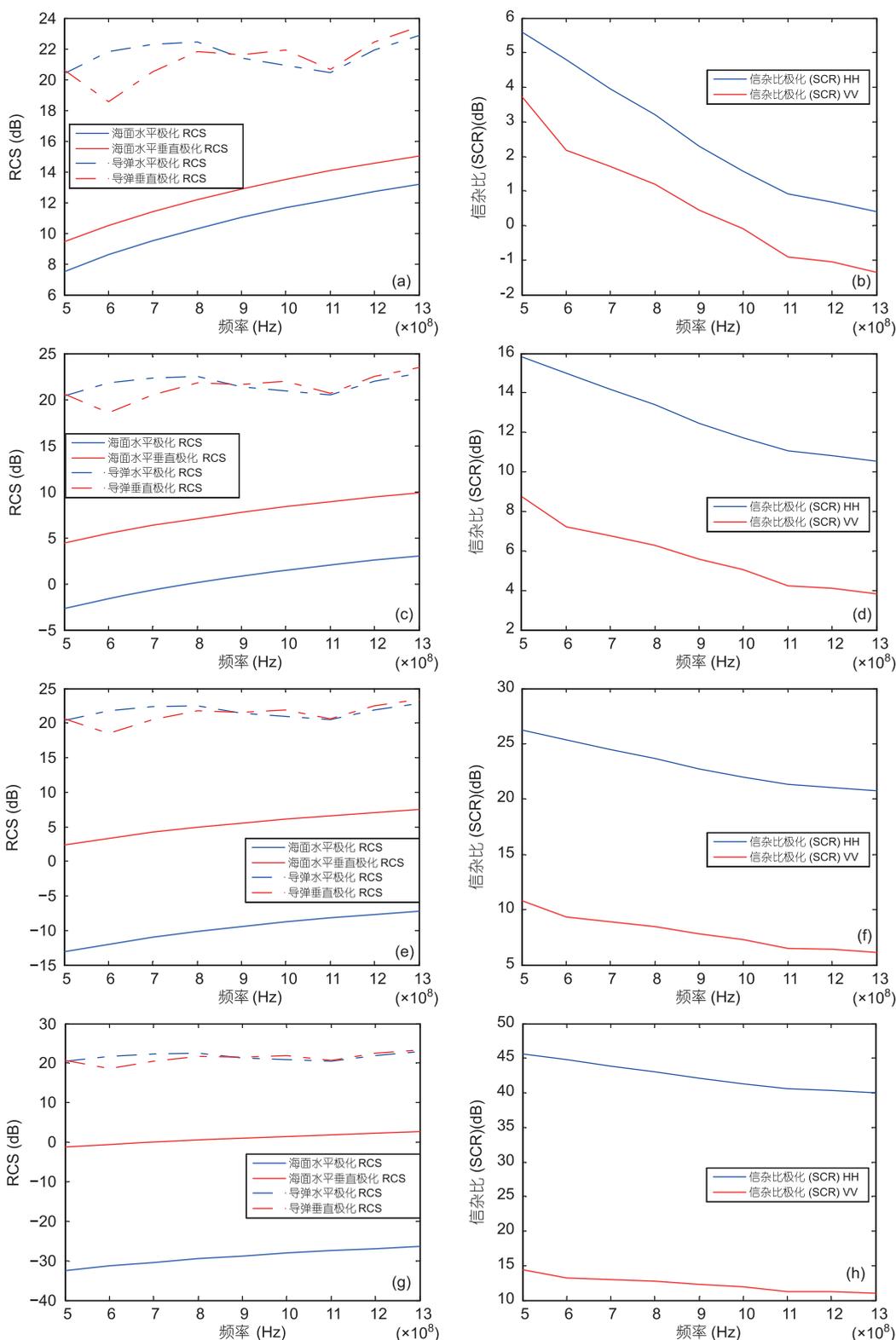


图4 背景海面和导弹目标不同入射角度 RCS 和信杂比较图

(a) 20°; (b) 40°; (c) 60°; (d) 80°

杂比随着入射频率的增加而减小, 这种变化关系暗示导弹目标的 RCS 相对于海面 RCS 随着入射频率的增加而缓慢增加. 高入射频率对应着大的海面 RCS, 但是却对应着低的导弹目标 RCS. 因此低入射频率更加适合于海面导弹目标的检测.

同时水平极化的目标回波信杂比高于垂直极化方式的信杂比, 暗示着利用水平极化方式更加有利于我们对海面微弱目标的检测.

图 4 关于 RCS 和目标回波信杂比关于入射角度和入射频率、极化方式等变化关系与图 3 结论是相似的, 大入射角度、低入射频率和水平极化方式有利于

海面微弱目标的检测.

### 3 结论

本文主要对不同入射角度、不同入射频率和不同极化方式得到的海面背景导弹目标 RCS 和目标回波信杂比进行了比较讨论. 大入射角度、低入射频率和水平极化方式适合于海面导弹目标检测. 结论有助于我们对用于海面上方目标检测用途的雷达进行设计. 对于与导弹目标类似的小型、形状规则的其他海面上方目标也具有借鉴作用.

### 参考文献

- Bai X, Zhou F. 2010. Analysis of new top-hat transformation and the application for infrared dim small target detection. *Pattern Recognit*, 43: 2145–2156
- Berizzi F, Dalle M E, Pinelli G. 1999. One-dimensional fractal model of the sea surface. *IEE Proc Radar, Sonar Navigat*, 146: 55–64
- Broschat S L. 1993. The phase perturbation approximation for rough surface scattering from a Pierson-Moskowitz sea surface. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 31: 278–283
- Brusch S, Lehner S, Fritz T, et al. 2011. Ship surveillance with TerraSAR-X. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 49: 1092–1103
- Doisy Y, Deruaz L, Beerens S P, et al. 2000. Target Doppler estimation using wideband frequency modulated signals. *IEEE Trans Signal Process*, 48: 1213–1224
- Ergul O, Gurel L. 2009. Comparison of integral-equation formulations for the fast and accurate solution of scattering problems involving dielectric objects with the multilevel fast multipole algorithm. *IEEE Trans Antennas Propag*, 57: 176–187
- Franceschetti G, Riccio D. 2006. *Scattering, Natural Surfaces, and Fractals*. Salt Lake City Academic Press
- Harrington R F. 1968. *Field Computation by Moment Methods*. Oxford: Oxford University Press
- Jaggard D L, Sun X. 1990. Scattering from fractally corrugated surfaces. *JOSA A*, 7: 1131–1139
- Lee J F, Lee R, Burkholder R J. 2003. Loop star basis functions and a robust preconditioner for EFIE scattering problems. *IEEE Trans Antennas Propag*, 51: 1855–1863
- Leung H, Dubash N, Xie N. 2002. Detection of small objects in clutter using a GA-RBF neural network. *IEEE Trans Aero Electron Syst*, 38: 98–118
- Leung H, Young A. 2000. Small target detection in clutter using recursive nonlinear prediction. *IEEE Trans Aero Electron Syst*, 36: 713–718
- Liao M, Wang C, Wang Y, et al. 2008. Using SAR images to detect ships from sea clutter. *IEEE Geosci Remote Sens Lett*, 5: 194–198
- Lu C C, Chew W C. 1994. A multilevel algorithm for solving a boundary integral equation of wave scattering. *Micro Opt Tech Lett*, 7: 466–470
- Osborne A. 2010. *Nonlinear Ocean Waves and the Inverse Scattering Transform*. Salt Lake City Academic Press
- Patton L K, Rigling B D. 2012. Autocorrelation constraints in radar waveform optimization for detection. *IEEE Trans Aero Electron Syst*, 48: 951–968
- Poggio A J, Miller E K. 1973. Integral equation solutions of three-dimensional scattering problems. In: *Computer Techniques for Electromagnetics*. Oxford, New York: Pergamon Press. 159–264
- Sira S P, Cochran D, Papandreou S A, et al. 2007. Adaptive waveform design for improved detection of low-RCS targets in heavy sea clutter. *IEEE J Sel Top Signal Process*, 1: 56–66
- Song J M, Chew W C. 1995. Multilevel fast-multipole algorithm for solving combined field integral equations of electromagnetic scattering. *Microwave Opt Tech Lett*, 10: 14–19
- Stokes G G. 1847. On the theory of oscillatory waves. *Trans Cambridge Philos Soc*, 8: 441–473
- Tao R, Li Y, Bai X, et al. 2012. Fractional Weierstrass Model for rough ocean surface and analytical derivation of its scattered field in a closed form. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 50: 3627–3639
- Ubeda E, Rius J M. 2006. Novel monopolar MFIE MoM-discretization for the scattering analysis of small objects. *IEEE Trans Antennas Propag*, 54: 50–57
- Wang C, Liao M, Li X. 2008. Ship detection in SAR image based on the alpha-stable distribution. *Sensors*, 8: 4948–4960
- Youssef N N. 1989. Radar cross section of complex targets. *IEEE Proc*, 77: 722–734