

# 不同船舶目标电磁散射仿真

陈立媛, 杨神化, 索永峰, 陈文科

(集美大学航海学院, 福建 厦门 361021)

**[摘要]** 为了解决船舶电大尺寸目标计算速度慢、内存需求量大、仿真周期长等问题,利用大面元物理光学(large element physical optics, LE-PO)算法,通过计算机仿真,建立油船、散货船两种船舶的三维模型,分析总结输入不同极化方式、不同频率、不同入射角以及不同船首向对 RCS(radar cross section)的影响。研究表明,大面元物理光学法(LE-PO)可完成船舶电大尺寸目标的电磁分析计算,可为油船、散货船的目标识别提供理论参考依据。

**[关键词]** 雷达散射截面; 船舶目标; 大面元物理光学法

**[中图分类号]** TN 45

## Electromagnetic Scattering Simulation Analysis of Different Targets Ship Types

CHEN Liyuan, YANG Shenhua, SUO Yongfeng, CHEN Wenke

(Navigation College, Jimei University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** In order to solve the problems such as slow calculation speed, huge memory demand and long simulation cycle of electrically large target ships, LE-PO (large element physical optics) algorithm was used to build three dimensional models of oil tanker and bulk carrier through computer simulation. The influence of different polarization modes, different frequencies, different incidence angles and different bow inputs on the RCS (radar cross section) is analyzed and summarized. The results show that the large element physical optics method (LE-PO) can realize the electromagnetic analysis and calculation of electrically large target ship, and provide a theoretical reference for target identification of oil tankers and bulk carriers.

**Keywords:** radar scattering cross section; the target of the ship; large element physical optics method

## 0 引言

近年来,以海平面为背景的电磁散射特性研究受到人们的重视<sup>[1-4]</sup>。对于复杂电大尺寸目标的电磁散射问题,RCS(radar cross section)的求解算法可大致分为三类:精确解析法、数值计算、高频近似算法<sup>[5-6]</sup>。文献[7]运用前后向迭代数值算法(forward backward method,FBM)对舰船目标模型进行仿真计算;文献[8]采用数值计算方法对一维海平面摆动目标的散射特性展开研究;文献[9]选择(method of moments,MoM)融合(multi level fast multipole method,MLFMM)算法并行计算的混合全波数值算法,实现目标散射数据的获取。从船舶设计结构来说,不同类型的船舶具有不同

**[收稿日期]** 2020-06-12

**[基金项目]** 国家自然科学基金项目(51579114);福建省自然科学基金项目(2018J01536)

**[作者简介]** 陈立媛(1994—),女,硕士生,从事交通信息工程及控制研究。通信作者:杨神化(1976—),教授,博士,主要从事航海仿真和航海信息化研究。E-mail:yangshh@163.com

的分布结构, 船体大小、上层建筑的分布、船首和船尾的结构设计等都影响着目标电磁散射的结果。姜斌琦等<sup>[10-12]</sup>研究了船舶上层建筑、船首等的散射性能; 朱雪慧等<sup>[13]</sup>设计了一款仿真软件对不同类型舰船进行全方位 RCS 计算; 丁凡<sup>[14]</sup>基于射线追踪法 (shooting and bouncing ray, SBR) 对舰船的多次散射效应展开研究, 分析了舰船目标的 RCS 计算方法; 李敢等<sup>[15]</sup>提出了 GPU-based SBR 高频算法, 满足舰船目标 RCS 的计算精度要求; 陈世华等<sup>[16]</sup>分析粗糙海面的起伏特性、雷达入射电磁波对舰船 RCS 特性的影响。

随着电磁计算研究的不断进步, 新的电磁仿真计算方法不断被提出, 大致可分为时域法与频域法, 其中频域法又分为低频方法与高频方法<sup>[17]</sup>。低频法包含矩量法 (method of moments, MOM)、多层快速多极子 (multi level fast multipole method, MLFMM) 算法等; 高频法包含几何光学法 (geometric optics, GO)<sup>[18]</sup>、物理光学法 (physical optics, PO)<sup>[19]</sup>、大面元物理光学法 (large element physical optics, LE-PO)、射线跟踪-几何光学法 (ray tracing geometric optics, RT-GO) 等。

对于船舶这类复杂目标需要方便快捷、精度较高的计算方法, 才能达到被测目标的理想电磁散射特性。文献 [20] 中提出传统的 RWG (rao-wilton-glisson) 基函数需要较小的网格单元 ( $\lambda/6$ 、 $\lambda/8$ 、 $\lambda/10$ 、 $\lambda/12$ ), 改进的基函数方程 LP-RWG (linearly-phased RWG) 允许使用更大的网络元素 (several  $\lambda$ ), 从而提出了大面元物理光学法 (large element-physics optics, LE-PO), 并在电大尺寸目标的电磁散射求解中取得了良好效果。

本文针对商船的适用性, 对不同船舶的 RCS 展开了仿真分析, 运用 LE-PO 算法探究了频率、入射角度、极化方式、不同船首向等对于整体 RCS 的影响, 旨在得出不同船型在不同条件参数下的 RCS 计算结果, 分析散射截面 RCS 的分布特点, 为雷达目标识别提供参考。

## 1 电磁仿真求解技术

基于 RWG 基函数的 PO 算法采用三角面元模拟任意复杂目标的表面, 并快速地计算目标表面电流, 最终实现目标散射场的求解。基于 PO 算法求解目标面元网格需按照  $1/8\lambda$  进行划分, 入射波波长  $\lambda = c/f$ ,  $c$  为理想空间中的波速,  $f$  为入射波频率。典型普通的电小尺寸目标可快速实现散射特性的求解, 然而, 对于船舶、导弹、飞机 3 类目标电磁散射特性求解时, 如果依照此网格划分标准, 网格数量可达到上亿, 对计算机硬件有着极大地挑战。

大面元物理光学法 (LE-PO)<sup>[21]</sup>作为 PO 算法的改进算法, 对 RWG 基函数的相位进行修正, 使得 PO 算法对网格划分大小不再成为限定。采用 LE-PO 算法求解复杂电大尺寸目标散射问题, 可采用与波长相当甚至几个波长的尺度进行剖分目标, 较大程度上降低了目标的网格数量。与传统的物理光学法相比较, 大面元物理光学法求解速度更快、需求资源更少, 可实现超电大尺寸目标的 RCS 计算。

RWG 基函数为:

$$f_n(r_k) = \begin{cases} [l_n/(2A_n^+)](\mathbf{r} - \mathbf{r}_{n+}) = [l_n/(2A_n^+)](\boldsymbol{\rho}^+), & \mathbf{r} \text{ 处于 } T_n^+ \text{ 内部;} \\ [l_n/(2A_n^-)](\mathbf{r} - \mathbf{r}_{n-}) = [l_n/(2A_n^-)](\boldsymbol{\rho}^-), & \mathbf{r} \text{ 处于 } T_n^- \text{ 内部;} \\ 0, & \text{其他区间。} \end{cases} \quad (1)$$

大面元物理光学三角基函数公式<sup>[20]</sup>为:

$$f_{\wedge n}(\mathbf{r}) = \begin{cases} [l_n/(2A_n^+)]\boldsymbol{\rho}_n^+ \cdot e^{-jk_n \cdot (\boldsymbol{\rho}_n^+ - \boldsymbol{\rho}_{nc}^+)}, & \mathbf{r} \text{ 处于 } T_n^+ \text{ 内部;} \\ [l_n/(2A_n^-)]\boldsymbol{\rho}_n^- \cdot e^{-jk_n \cdot (\boldsymbol{\rho}_n^- - \boldsymbol{\rho}_{nc}^-)}, & \mathbf{r} \text{ 处于 } T_n^- \text{ 内部;} \\ 0, & \text{其他区间。} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\boldsymbol{\rho}_n^+$  为三角面元  $T_n^+$  内部由  $O^+$  指出的位置矢量;  $\boldsymbol{\rho}_n^-$  为三角面元  $T_n^-$  内部指向  $O^-$  的位置矢量;  $\boldsymbol{\rho}_{nc}^+$ 、 $\boldsymbol{\rho}_{nc}^-$  为两三角面元  $T_n^+$ 、 $T_n^-$  非公共部分的顶点到公共边中点矢量;  $\mathbf{r}_{n+}$ 、 $\mathbf{r}_{n-}$  第  $n$  条棱边所在的三角面元对对应的两个顶点的位置矢量;  $T_n^+$ 、 $T_n^-$  共用第  $n$  条棱边对应的两个三角面元对;  $A_n^+$ 、 $A_n^-$  为

三角面元对  $T_n^+$ 、 $T_n^-$  对应的面积;  $l_n$  为第  $n$  条棱边对应的边长。

式 (2) 中, 当  $k_n$  为 0 时, 式 (1) 则转变成 RWG 基函数, 并记为:  $f_n(r)$ 。

本文利用大面元物理光学法 (LE-PO) 电磁计算方法在超电大尺寸船舶目标下电磁求解。

2 船舶目标的特性分析与建模

为保证船舶模型的精确性, 利用三维建模软件 Catia 创建船舶缩放模型, 具体步骤如图 1 所示。

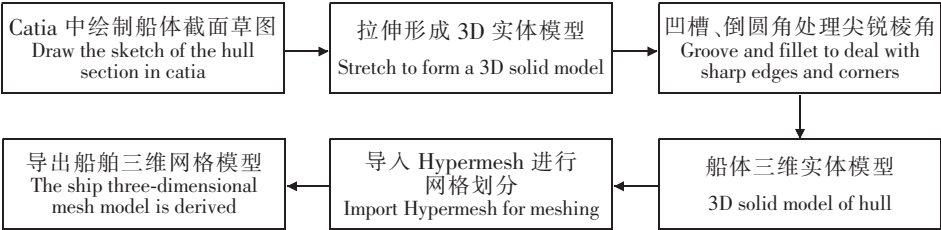


图 1 创建船舶三维网格模型具体步骤

Fig. 1 Specific steps to create a 3D mesh model of a ship

表 1 船舶参数设置

Tab. 1 Description of ship attributes

船舶类型 Type of ship	网格数 Mesh number	网格大小 Mesh size/m	船舶尺寸 Size full/m			满载吃水 Load draft/m
			长 Length	宽 Width	高 Height	
油船 Tanker	43 130	1	243	42	20.8	14.3
散货船 Bulk carrier	34 680	1	225	32.3	18	13.0

说明: 船舶模型比例为 1:1。

Note: Ship model ratio 1:1.

利用厦门港的某油轮和某散货船的真实船舶数据 (如表 1 所示), 在 Catia 中形成船舶的三维几何模型, 如图 2 所示。

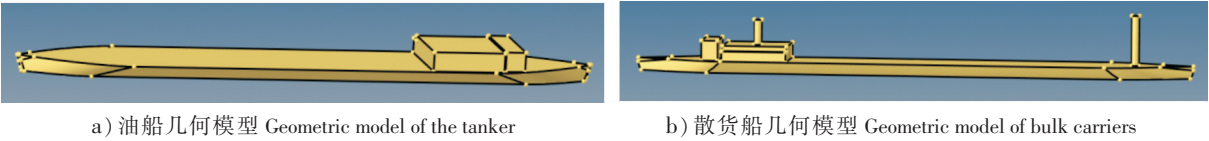


图 2 船舶几何模型

Fig.2 Geometric model of ship

两种船舶网格模型如图 3 所示。

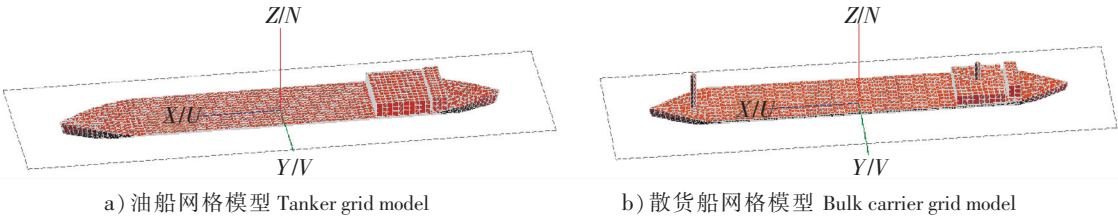


图 3 船舶网格模型

Fig.3 Ship grid model

3 仿真分析

3.1 不同频率对单站 RCS 的影响

仿真设置: 雷达入射波以 Linear (线性极化方式) 照射目标, 选取两个频点, 分别为  $f_1 =$

0.3 GHz、 $f_2=30$  GHz；入射角  $\theta=90^\circ$ ；方位角  $\varphi=-180^\circ\sim180^\circ$ ；两种船型满载且在垂直极化下，船首向未发生偏转，即船首向为  $0^\circ$ 。

对船舶单站 RCS 进行仿真，详细仿真结果如图 4 所示。

由图 4a) 可知，随着雷达波入射频率的升高，油船 RCS 波峰变化幅度较大，波谷的变动较小。入射频率为 0.3 GHz 时，RCS 曲线的峰值在 180 dB 附近变化，此频率下的波长为 1 m，船体的上层设备尺寸与波长相当，其上建筑结构多被雷达波检测。入射频率的升高，RCS 曲线出现峰值升高、波谷的波动复杂度减少，频率为 30 GHz 时的波峰远高于 0.3 GHz 时波峰，波谷随入射波频率的提高复杂度较少。两种不同频率下，雷达波的峰值皆处于相同的  $\varphi$  角度，含 5 个波峰、4 个波谷；随入射波频率的提高，波峰迅速增大，产生此种现象的原因是船体的侧壁、船首、船尾结构多为平面板或曲面板，使得产生的回波被直接反射。

由图 4b) 所示，入射波频率为 0.3 GHz、30 GHz 时，散货船波峰、波谷的数量远多于油船。当频率为 0.3 GHz 时，RCS 曲线峰值在 170 dB 附近波动；当频率为 30 GHz 时，RCS 曲线峰值位于 210 dB 上下，两种频率的 RCS 曲线波谷无明显差异。

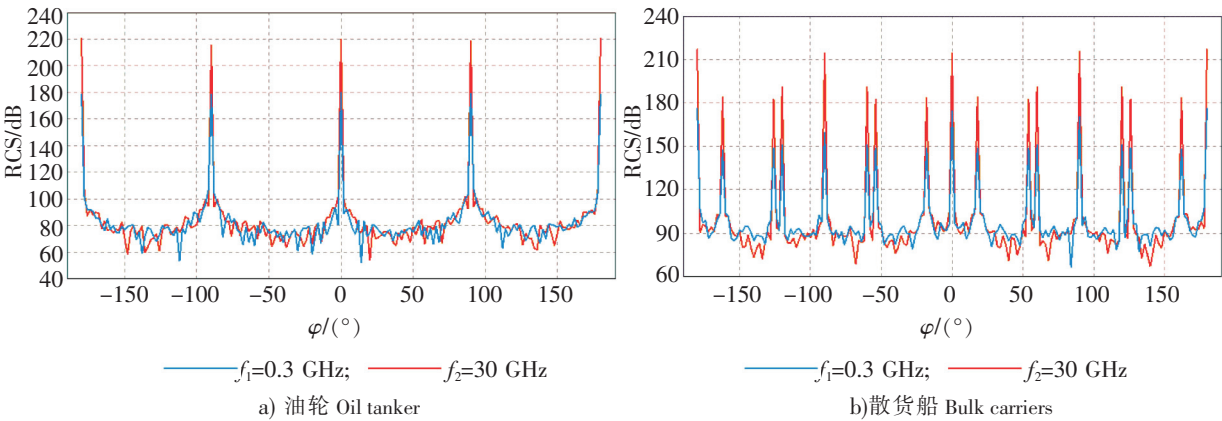


图 4 在不同频率下的 RCS 变化图

Fig.4 RCS variation diagram of different frequencies

3.2 不同极化方式对单站 RCS 的影响

按照极化方式，可分为线极化、圆极化、椭圆极化时，线极化 Linear 又细分为垂直极化、水平极化。本文分别在雷达波频率为 0.3 GHz、30 GHz 时，选择水平极化、垂直极化两种极化方式，对油船、散货船单站 RCS 进行仿真分析，其他仿真参数同上，仿真结果如图 5、图 6 所示。

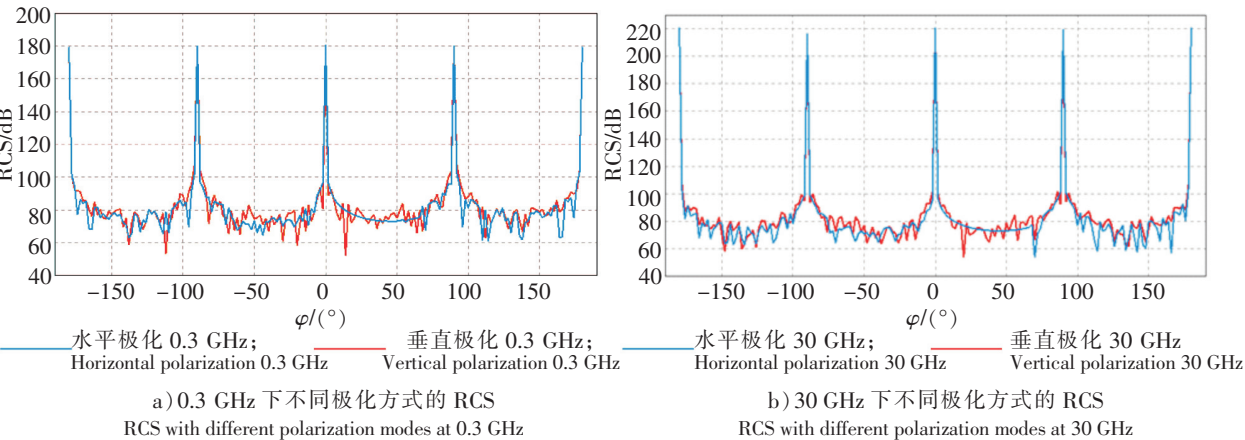


图 5 在不同极化方式对油船 RCS 的影响

Fig.5 Influence of different polarization modes on RCS



由图 5 可知, 油船在 0.3 GHz 下水平极化的 RCS 与垂直极化的 RCS 在波峰处不相上下, 而在波谷处, 垂直极化比水平极化小得多且变化剧烈、复杂。然而在 30 GHz 时, 两者极化方式在波峰处无明显区别, 波谷处垂直极化仍小于水平极化的 RCS, 但差异程度变小了许多。随着频率的增大, 两者的差异性有减少的趋势。已知 0.3 GHz、30 GHz 两个频率所对应的入射波长分别为 1 m, 0.01 m, 由于 1 m 的波长与船舶上层结构尺寸相当, 其结构的漫射效果减少, 使得对应船体的反射信号功率增大, 进一步加大了回波反射的强度。

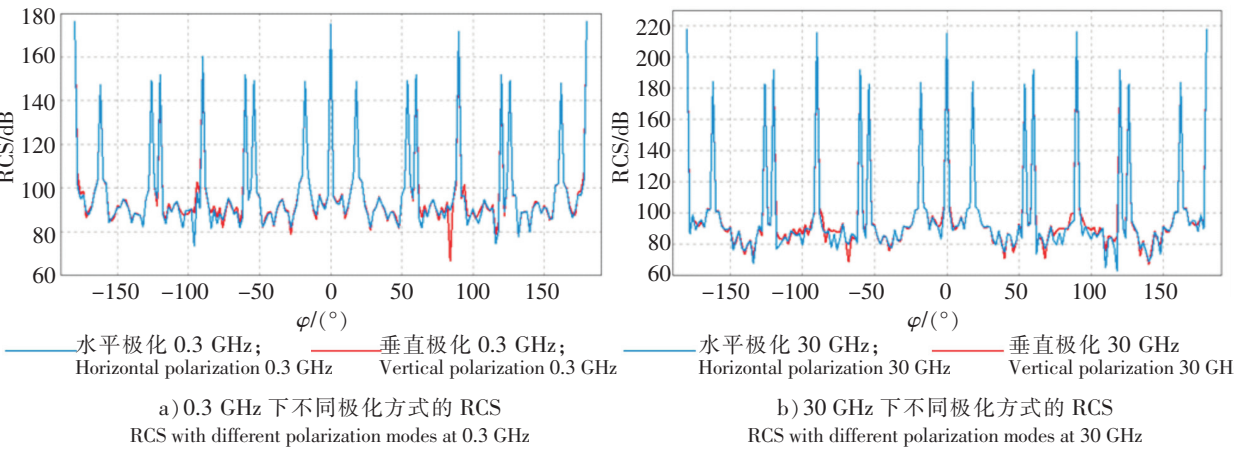


图 6 在不同极化方式对散货船 RCS 的影响

Fig.6 Influence of bulk carrier on RCS in different polarization modes

由图 6 可知, RCS 曲线较为直观地展示入射波频率为 0.3 GHz、30 GHz 时两者的波峰数量以及波峰大小, 同一频率, 水平极化、垂直极化的波峰数量及大小接近同步, 垂直极化的波谷变化较为复杂、剧烈。

同一入射方向且同一频率的船舶目标, 其散射强度由极化方式决定。

3.3 不同入射角对单站 RCS 的影响

入射波频率取 30 GHz, 线性极化方式选取垂直极化, 方位角  $\varphi = -180^\circ \sim 180^\circ$ , 取  $2^\circ$  为一个点, 入射角  $\theta$  分别设为  $45^\circ$  和  $90^\circ$ 。船首向未发生偏转, 即船首向为  $0^\circ$ , 两船在不同入射角下 RCS 的示意图如图 7 所示。

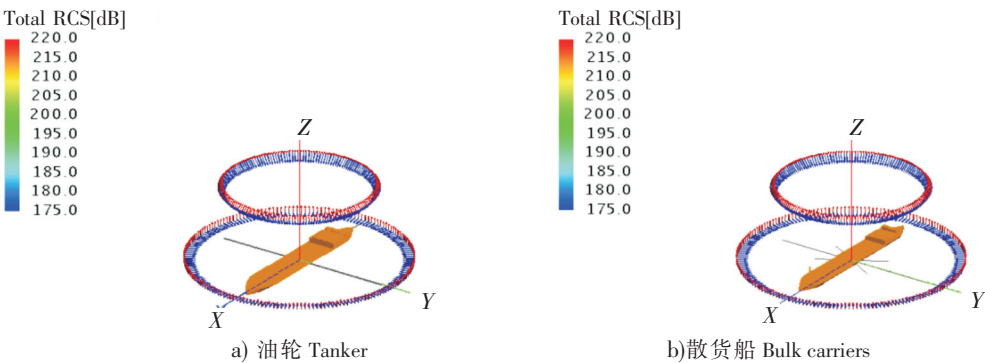


图 7 不同入射角度下 RCS 的 3D 视图

Fig.7 3D views of RCS for different incidence angles

由图 7 可知, 随着入射角的增大, 对应方位角  $\varphi$  的后向 RCS 也相应增大。当油船俯仰角为  $45^\circ$

时, 后向 RCS 的最大值 94.02 dB 位于方位角  $\varphi = \pm 90^\circ$  处; 当入射角为  $90^\circ$  时, 后向 RCS 的最大值 219.29 dB 位于方位角  $\varphi = \pm 180^\circ$  处。当散货船入射角为  $45^\circ$  时, 后向 RCS 的最大值 95.7 dB 位于方位角  $\varphi = \pm 92.2^\circ$  处; 当入射角为  $90^\circ$  时, 后向 RCS 的最大值 215.39 dB 位于方位角  $\varphi = \pm 180^\circ$  处。随着入射角的增大, 后向 RCS 的最大值也逐渐增大。

3.4 不同船首向对单站 RCS 的影响

船舶在行驶过程中, 时刻受到风流的影响<sup>[22]</sup>, 在受限水域, 风流对船舶航行、进出港、停靠等行为有着重大影响。

为了分析不同航向角, 不同入射角下的 RCS 变化情况, 本文分析了船舶左、右舷受风流影响情况, 其中, 船舶右舷受风流作用记为负方向, 左舷受风流作用记为正方向。

仿真参数: 入射波以 Linear (线性极化方式) 照射, 入射频率取 30 GHz; 入射角设定为  $\theta = 45^\circ$ 、 $90^\circ$ ; 方位角  $\varphi = -180^\circ \sim 180^\circ$ , 取  $2^\circ$  为一个点; 两种船型皆为满载, 假定船首向 (HDG) 发生偏转, 偏转角度分别为  $-10^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $-30^\circ$ 、 $30^\circ$ 。

仿真结果如图 8、图 9 所示。从图 8、图 9 可:

- 1) 在相同的仿真条件下, 无论船首向角度为多大, 该船舶 RCS 峰值并未发生变化。如: 当入射角度为  $45^\circ$  时, 油船的 RCS 峰值为 94.02 dB, 散货船的 RCS 峰值为 95.83 dB; 当入射角为  $90^\circ$  时, 油船的 RCS 峰值为 219.29 dB; 散货船的 RCS 峰值为 215.39 dB。
- 2) 船舶航行时, 受风流作用, 船舶的船首向左、右发生一定的偏转, 当雷达波入射角为  $90^\circ$  时, RCS 峰值仍保持方位角对称性; 当雷达波入射角为  $45^\circ$  时, RCS 峰值不保持对称性; 船舶的船首向发生偏转时, 雷达波所照射的船体更宽, 船体对雷达波的反射能力就越强。

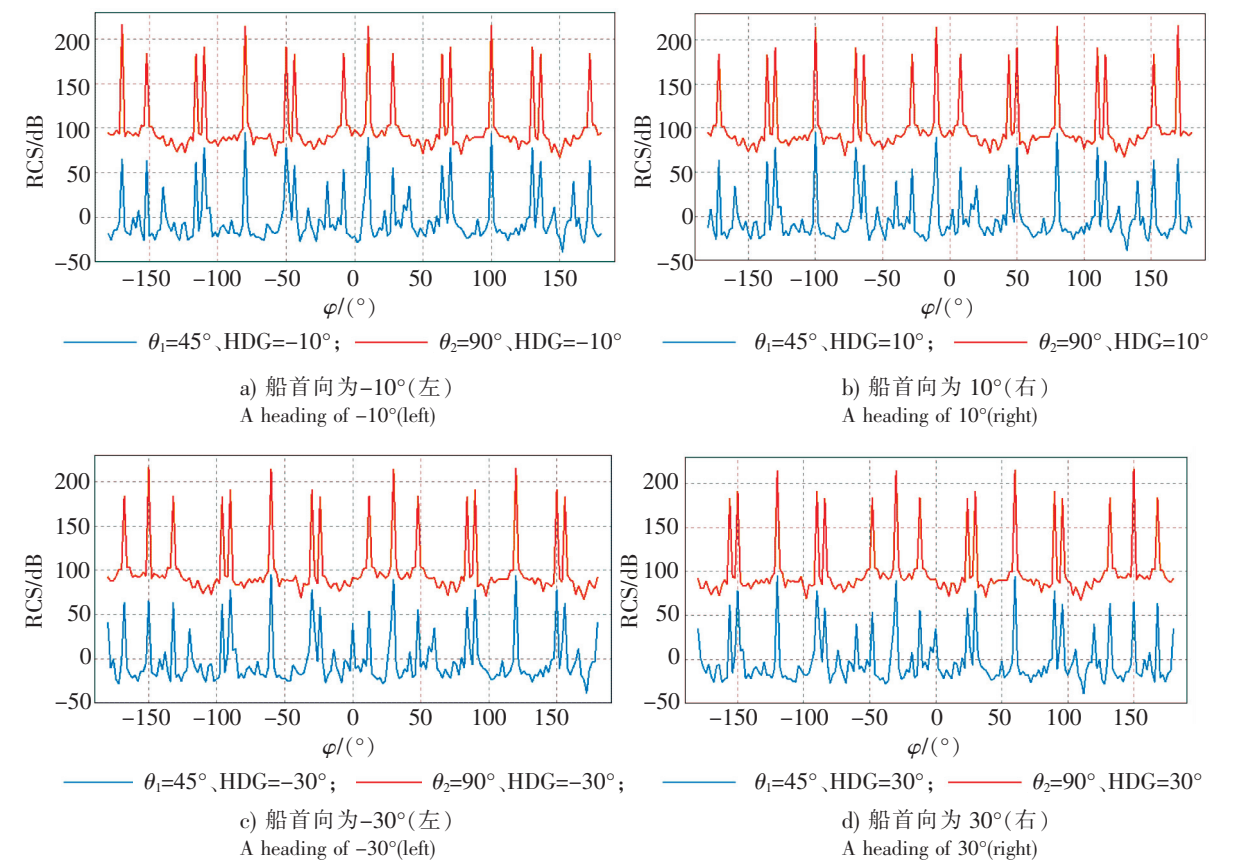


图 8 不同船首向, 入射角度为  $45^\circ$ 、 $90^\circ$  下的散货船 RCS

Fig.8 RCS of bulk carrier with different heading and incidence angles of  $45^\circ$  and  $90^\circ$

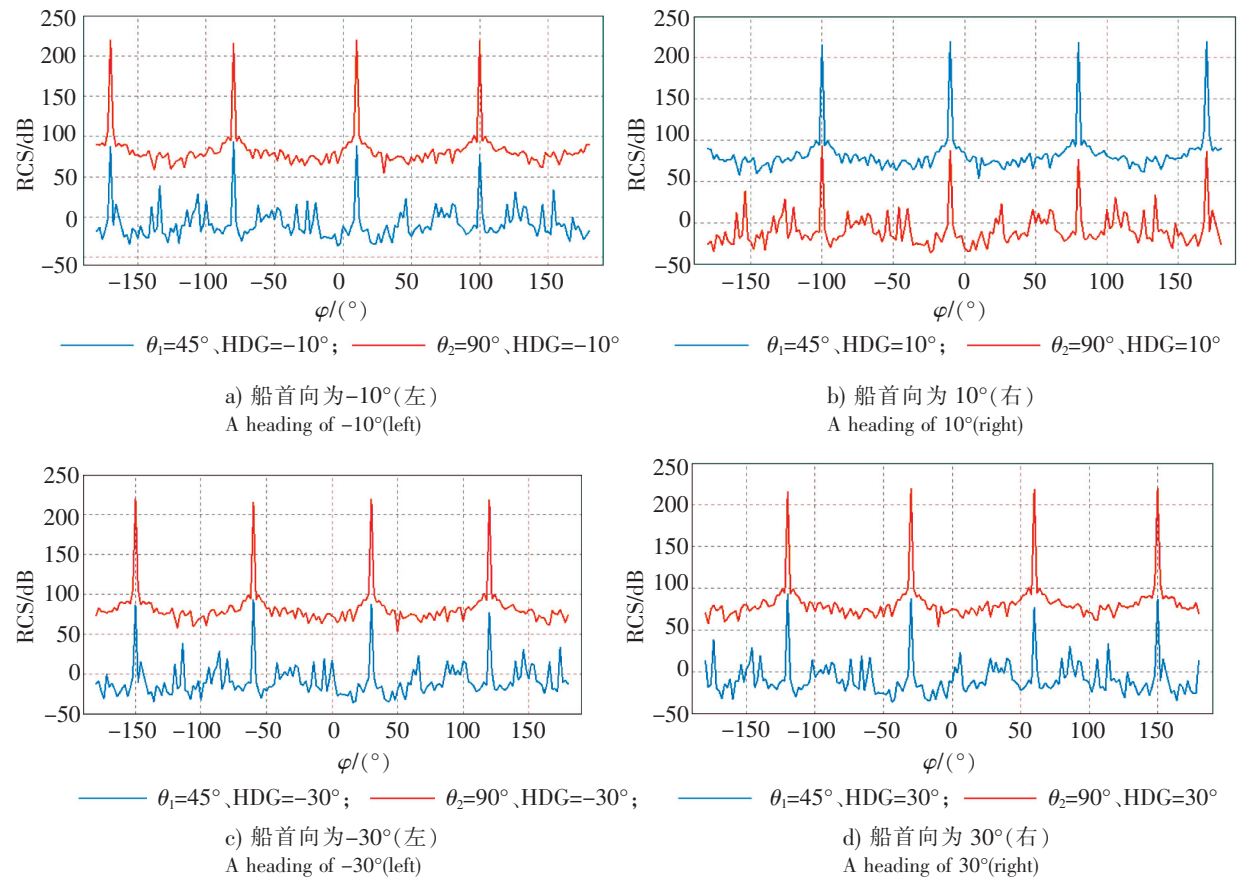


图 9 不同船首向,入射角度为 45°、90°下的油船 RCS

Fig.9 RCS of oil tanker with different heading and incidence angles of 45° and 90°

4 结论

本文以油船、散货船为研究对象,利用 Catia、Hyper mesh、FEKO 创建船舶目标三维模型及网格模型,分别介绍了网格大小及数量,并以此为基础,分析了油船、散货船在不同雷达入射频率、不同极化方式、不同入射角度和不同船首向的单站 RCS 曲线变化。得出:两种船型在同种极化方式下,频率越高,雷达散射截面的贡献越大;同一入射频率,单站 RCS 的强度由极化方式决定;极化方式、入射频率一定时,船舶后向 RCS 随着俯仰角的增大而增大。油船、散货船 RCS 计算与分析是商船设计领域的重点工作,精确预估 RCS,不仅可提高船舶设计水平,更能提高船舶航行的安全性。该研究为未来的船舶回波图像仿真提供理论基础,可以更精确高效地对船舶总体 RCS 的散射特性进行量化分析。

[ 参考文献 ]

[1] WANG Y H, ZHANG Y M, HE M X, et al. Solution of scattering from rough surface with a 2D target above it by a hybrid method based on the reciprocity theorem and the forward-backward method [J]. Chin Phys, 2008, 17(10): 3 696-3 703.

[2] YASEMIN ALTUNCU, IBRAHIM AKDUMAN, ALI YAPAR. Detecting and locating dielectric objects buried under a rough interface [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2007, 4(2): 251-255.

[3] KUANG LEI, JIN YA-QIU. Bistatic scattering form a three-dimensional object over a randomly rough surface using the FDTD algorithm [J]. IEEE Transcation on Antennas and Propagation, 2007, 55(8): 2302-2312.

[4] GUAN B, ZHANG J F, ZHOU X Y, et al. Electromagnetic scattering from objects above a rough surface using the method of moments with half -space green's function [J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(10): 3399-3405.

- [5] LIU P, JIN Y Q. Numerical simulation of bistatic scattering from a target at low altitude above rough sea surface under an EM wave incidence at low grazing angle by using the finite element method [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2004, 52(5): 1205-1210.
- [6] ZHANG X Y, SHENG X Q. Highly efficient hybrid method for monostatic scattering by objects on a rough surface [J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2010, 4(10): 1597-1604.
- [7] MARCOS RODRIGUEZ PINO, LUIS LANDESA, FERNANDO OBELLEIRO, et al The generalized forward-backward method for analyzing the scattering from targets on ocean-like rough surfaces [J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 47(6): 961-969.
- [8] KHALID JAMIL, ROBERT J. BURKHOLDER. Radar scattering from a rolling target floating on a time-evolving rough sea surface [J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 41(1): 3 330-3 337.
- [9] 葛志闪, 鲜宁, 王津申, 等. 二维海面上三维电大尺寸舰船目标电磁散射仿真 [J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44 (11): 2299 - 2304.
- [10] 姜斌琦. 舰船外形 RCS 的仿真与分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.
- [11] 王菲. 基于 CST 的舰船 RCS 的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
- [12] 张昕. 基于 CST 的舰船 RCS 的仿真与分析 [C]. Intelligent Information Technology Application Association. Proceedings of 2011 International conference on Intelligent Computation and Industrial Application (ICIA 2011 V1). Intelligent Information Technology Application Association: 智能信息技术应用学会, 2011: 466-469.
- [13] 朱雪慧, 余泽太, 覃潇潇, 等. 基于动态 RCS 的舰船雷达回波仿真与分析 [J]. 雷达科学与技术, 2019, 17(5): 543-549.
- [14] 丁凡. 基于 SBR 的舰船目标多次散射 RCS 计算 [J]. 舰船科学技术, 2015, 37(4): 98-101.
- [15] 李敢, 祝泓, 邸瀚漪, 等. 基于高频快速优化算法的舰船 RCS 分析 [J]. 舰船科学技术, 2020, 42(1): 157-160.
- [16] 陈世华, 周均, 武征. 不同因素对舰船 RCS 特性的影响分析 [J]. 长春理工大学学报 (自然科学版), 2017, 40(5): 59-63.
- [17] 吕杰. 基于通用电磁计算软件的雷达成像系统 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
- [18] 钟顺时, 钮茂德. 电磁场理论基础 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1995, 20-35.
- [19] 王长清. 现代计算电磁学基础 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2005, 10-45.
- [20] SIYANDA NAZO. A hybrid MOM/PO technique with large element PO [D]. Stellenbosch: Stellenbosch University, 2012.
- [21] 王晨, 刘梅林, 焦金龙. 基于大面元物理光学的超电大尺寸求解技术 [J]. 微波学报, 2012, 28(增刊): 23-26.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 周云龙)