

海面环境下舰船目标的 RCS 测试建模分析

王雅芬, 江志浩, 黄猛, 张振杰

(中国人民解放军 91977 部队, 北京 102249)

摘要 在分析国内外海面环境下舰船目标电磁散射特性测试建模技术研究现状和海面环境下舰船目标电磁散射特点的基础上, 提出了一种“半确定性”的海面环境下舰船目标的电磁散射特性建模仿真计算方法。该方法可以在不具备外场全尺寸测试或造浪条件下电磁缩比试验条件时, 以一定的置信度获取海面舰船的耦合电磁散射特性, 为研究海面舰船雷达隐身设计验证提供支撑。

关键词 舰船目标; RCS 测试; 建模分析; 复合电磁散射; 半确定性建模

中图分类号 E919 **文献标识码** A **文章编号** 2096-5753(2021)03-0183-05

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2021.03.004

RCS Measurement Modeling Analysis of Ship Targets in Sea Surface Environment

WANG Yafen, JIANG Zhihao, HUANG Meng, ZHANG Zhenjie

(No. 91977 Unit of PLA, Beijing 102249, China)

Abstract Based on the analysis of research status about measurement modeling technology and characteristic of ship targets electromagnetic scattering in sea surface environment at home and abroad, this paper proposes a modeling and simulation method for the electromagnetic scattering characteristic of ship targets in semi-deterministic sea surface environment. When the outside full-scale measurement or wave-making conditions are not available for electromagnetic scaled measurement, this method could obtain the coupled electromagnetic scattering characteristic of ship targets in sea surface environment with a certain degree of confidence, providing support for the research on radar stealth design and verification of sea surface ships.

Key words ship target; RCS measurement; modeling analysis; composite electromagnetic scattering; semi-deterministic modeling

0 引言

在现代信息化条件下的海战中, 由于各种先进探测装备和精确制导武器的广泛应用, 舰船目标被发现和被打击的可能性大大提高, 所面临的威胁越来越大。为了提高自身的生存能力, 并在作战中获得更多的战术优势, 进行隐身设计已成为舰船目标设计的客观要求和发展的必然趋势^[1-2]。进而也对

海面环境下舰船目标电磁散射特性的测试评估技术提出了更高的要求。本文在分析国内外海面舰船电磁散射特性测试评估技术现状的基础上, 结合我国现有技术基础与研究条件, 提出采用全尺寸测试、缩比模型试验和仿真建模相结合的方式, 获取具有一定置信度的海面环境条件下舰船目标 RCS 特性, 为舰船目标隐身技术研究和探测制导技术研究提供支撑。

1 国内外海面环境下舰船 RCS 测试建模技术现状

在相当一段时间里,由于理论基础较为薄弱,研究者在研究水面舰船的电磁散射特性时,习惯将舰船目标和波浪海面环境分为2个独立的分支领域分别开展研究。但是,对海面目标或低空飞行的海上目标而言,海面散射场及目标与海面之间的耦合散射场会对目标散射回波特征造成显著的影响,导致在应用雷达检测、识别目标时出现虚警和漏警。此外,海面散射场及其与水面目标的耦合散射场也给目标的制导与跟踪带来很大的困难。

随着隐身技术与探测技术的不断发展,对海面环境下舰船目标电磁散射特性研究的精度与深度也不断提升。这就要求将舰船目标与波浪海面作为一个整体来看待,既要考虑舰船目标或低飞目标本体电磁散射和海面的电磁散射,又要考虑舰船目标或低飞目标和海面之间相互作用对电磁波产生的互耦电磁散射,即舰船目标或低飞目标与海面环境一体化的复合电磁散射^[3]。

常用的海面目标 RCS 测试评估方法有全尺寸测试、电磁缩比测试^[4]以及理论建模数值仿真等3种方法。前2种方式获取的数据置信度高,但测量周期较长,需要配合测量的装备较多,受环境因素影响大而且成本非常大;理论建模和数值仿真方式获取海面目标电磁散射特性数据更为容易且方便,但是置信度需要通过前2种方式来验证。

国外有关海面电磁散射的研究开展较早,进行了诸多的实验和理论研究,特别在粗糙海面考虑遮蔽效应、多重散射和后向增强效应方面取得了一些显著的研究成果^[3],对于中、小入射角下,有关波浪导致的粗糙海面散射特性理论也较成熟,而且针对舰船在海面环境下的电磁散射特点建立了开展相关研究的专用水面测试场。其中,比较具有代表性的有意大利舰船 RCS 海面试验场和美国 MASK 室内试验场等^[4-5]。意大利的舰船 RCS 试验场及测试系统可用于进行模拟海面环境下的舰船缩比模型和上层建筑、部件的 RCS 试验研究。美国 MASK 试验场配置了造浪装置以有效模拟粗糙海面杂波

特性,最大可缩比模拟5级海况,为舰船与水面间相互耦合作用的研究提供了良好的技术条件。

目前,我国海面环境下舰船目标复合电磁散射特性的实测和理论处于起步阶段,基于海面环境的舰船电磁散射试验场基本没有,尚不具备采用海上全尺寸测量或室内造浪电磁缩比试验研究高海况条件下水面舰船电磁散射特性的条件。然而,经过近20年的发展,我国在建模建库与仿真计算方面已经取得了一些进展,在此基础上,采用全尺寸测试、电磁缩比测试^[4]以及理论建模数值仿真等3种方法相结合的方式获取具有一定置信度的海面舰船 RCS 数据已经成为可能。

2 海面环境下舰船 RCS 特点

舰船是多结构区域、多种散射机制并存的超大尺寸复杂目标,舰体、上层建筑和桅杆构成了全舰的主体,甲板上层布置的大量电子设备和建筑布置紧凑且样式复杂各异(如烟筒、橱柜、水管、加固板、梯子、过道、舱口、雷达天线等)。在诸多结构中,上层建筑主要由平板结构组成,平面镜面反射效应最显著,同时并存着绕射效应;舰体主要由光滑曲面和平面(甲板和舰艇的舷墙)组成,以镜面反射为主;桅杆尺寸相对较小,但其上面布置的大量天线导致了强烈的多次散射效应和绕射效应,这使该区域的雷达波散射特性异常复杂。此外,海面作为外部环境区域,也因其与大型水面舰船舰体之间的相互作用影响了全舰的 RCS。

在舰船目标与海面环境一体化复合电磁散射中,占主要成分的是舰船目标本体电磁散射和舰船目标与海面之间的互耦电磁散射^[6],如图1所示。其中,舰船目标本体电磁散射 RCS 是在探测雷达波直接照射下,沿接收方向散射强度的度量,是舰船目标在自由空间下的 RCS。舰船目标与海面之间的互耦电磁散射 RCS 主要包括以下3种情况^[6]:

1) 舰船目标在探测雷达波直接照射下,一部分散射方向指向海面,通过与海面发生相互作用而改变了传播方向,进而被探测天线接收;

2) 探测雷达波经过海面散射后照射目标,沿接收方向被探测天线接收;

3) 探测雷达波经过海面散射后作用于目标, 目标的散射能量又通过与海面发生作用后被探测天线接收。

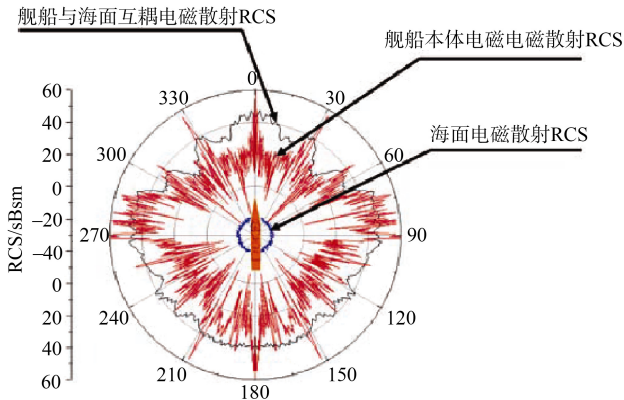


图 1 舰船与海面复合散射中的 RCS 分量

Fig. 1 RCS components in composite scattering of ship and sea surface

3 舰船目标与海面之间的互耦电磁散射建模方法^[3, 5, 7-12, 17]

通过建立舰船目标与海面之间的互耦电磁散射模型, 可以将复杂的海面与舰船目标电磁散射耦合问题分解为粗糙海面表面电磁特性与舰船表面精细结构电磁散射特性问题; 而海面电磁特性与舰船表面电磁特性均是可以采用外场实测或内场实测进行测量的。这样, 就可以建立一种“半确定性”的海面环境下舰船目标的电磁散射测试评估方法, 可以在不具备海洋环境下全尺寸测试或造浪模拟粗糙海面条件下缩比测试条件时, 对海面舰船的耦合电磁散射特性进行定量评估。

3.1 舰船电磁物理模型推断

基于舰船目标基础电磁物理模型输入, 开展目标在典型频段和角度下的电磁散射特性计算与散射机理诊断分析, 确定目标强散射部件和敏感散射源; 基于散射机理可类比的国内外舰船电磁建模经验, 结合诊断分析结果, 对当前舰船目标开展电磁逆向修模和模型敏感散射源的不确定参量分布推断, 构建不确定散射源部件的电磁耦合传递效应, 最终形成目标电磁散射特性分布模型。物理模型推断流程见图 2。

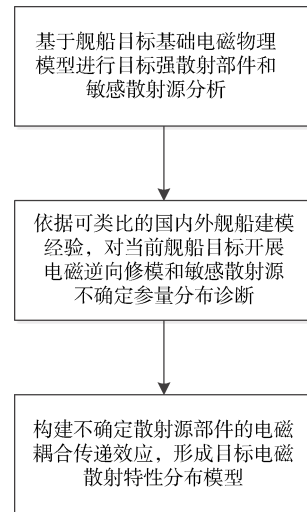


图 2 舰船电磁散射物理模型推断过程

Fig. 2 Inference process of physical model of ship electromagnetic scattering

3.2 海洋表面对舰船雷达反射率的影响

基于推断的舰船目标电磁模型和典型海面背景散射模型, 利用目标与背景一体化电磁散射建模方法, 精细刻画舰船目标与不同海况下动态海面的多跳耦合散射效应, 构建舰船目标与典型海场景的耦合散射特性模型。

根据四路径原理^[7], 舰船目标与典型海场景的耦合散射特性模型几何关系如图 3 所示, 海洋表面对舰船雷达反射率的影响利用四路径方法进行估计。

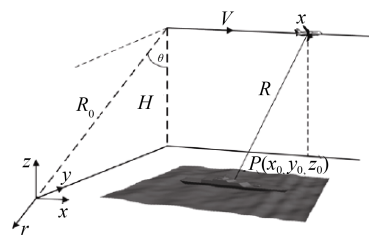


图 3 雷达与舰船海面复合模型的几何关系

Fig. 3 Geometric relationship between radar and ship sea surface composite model

图 3 中: R_0 是雷达初始位置距离坐标原点的距离; H 是雷达距离水平面高度; θ 是俯角; R 为雷达到目标的距离; $p(x_0, y_0, z_0)$ 为舰船目标所处位置。

通过分析, 可以将雷达接收到的舰船目标回波归为 4 条路径:

- 1) 路径 1 指从舰船目标直接回波, 即雷达-

目标-雷达: $2R$ 。

2) 路径 2 指二次散射回波, 即雷达-海面-目标-雷达:

$$R + \left[4z(x_0, y_0)^2 + R^2 + 4z(x_0, y_0)R \cos \theta \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

3) 路径 3 指二次散射回波, 即雷达-目标-海面-雷达:

$$R + \left[4z(x_0, y_0)^2 + R^2 + 4z(x_0, y_0)R \cos \theta \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

4) 路径 4 指三次散射回波, 即雷达-海面-目标-海面-雷达:

$$2 \left[4z(x_0, y_0)^2 + R^2 + 4z(x_0, y_0)R \cos \theta \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

由上面的式子可知, 路径 1 从舰船目标的直接回波不会造成散射点的迁移, 路径 2 和路径 3 的二次散射回波, 由于多径效应造成相位改变, 使散射点产生的距离向迁移为

$$\Delta L_2 = \Delta L_3 = \left[4z(x_0, y_0)^2 + R^2 + 4z(x_0, y_0)R \cos \theta \right]^{\frac{1}{2}} - R \quad (4)$$

对于路径 4 三次散射回波使散射点产生的距离向迁移为 $\Delta L_4 = 2\Delta L_2$, 应用复散射系数 p , 结合四路径方法和雷达成像聚焦处理方法, 导出了舰船-海面复合模型的雷达平均强度分布图像 $I^{\text{con}}(x, r)$:

$$I^{\text{con}}(x, r) = B \left\{ \sum I^{\text{dir}}(x, r) f_r(r - r_0) + 2|\rho| \sum I^{\text{dir}}(x, r) f_r(r - r_0 - \Delta L_2 + \phi_p) + |\rho|^2 \sum I^{\text{dir}}(x, r) f_r(r - r_0 - \Delta L_4 + 2\phi_p) \right\} \quad (5)$$

其中:

$$I^{\text{dir}}(x, r) = \sigma_{\text{ship}}(x_0, r_0) \exp \left\{ - \left[\frac{\pi}{\rho_{aN}(x_0, r_0)} \right]^2 [x - x_0]^2 \right\} \quad (6)$$

式中: $r_0 = -y_0 \sin \theta - z_0 \cos \theta$; $\sigma_{\text{ship}}(x_0, r_0)$ 为舰船目标的雷达散射截面; ϕ_p 为复散射系数 P 的相位; $f_r(r - r_0)$ 为距离向分辨函数; B 表示雷达天线的增益。

3.3 多普勒特性

舰船目标的运动特性包括航速、航向、最大航速、航迹、横摇、纵摇等参数。航行中的舰船会随

着时间和航线变化位置不同, 同时由于海面作用, 舰船会发生六自由度的晃动。根据力学原理, 运动目标可分解为平动和转动分量^[8], 转动分量反应目标相对质心的运动信息, 引起不同时间下散射场的差异。通过逐个时间点准静态舰船模型电磁散射场的仿真, 得到回波序列, 再通过傅里叶变换获取其多普勒谱。多普勒谱中包含了舰船目标动态信息。

1) 多普勒谱: 多普勒谱针对舰船的平动及质心的移动。根据不同时间舰船距离雷达的位置、入射角和接收角度的相对变化, 得到准静态下目标的散射回波, 通过傅里叶变换得到目标多普勒谱^[11]。

2) 时间-多普勒谱: 考虑舰船在不同时间, 相对质心的转动, 获取不同准静态下目标各部件几何位置, 从而计算目标转动下回波, 通过傅里叶变换得到时间-多普勒谱。

3) 微多普勒谱: 舰船上有很多活动部件, 即便在舰船没有运动的情况下也会发生位置变化, 如螺旋桨等。不同时间点下, 根据不同部件的运动状态, 更新舰船几何模型坐标信息, 获取回波, 傅里叶变换得到微多普勒谱。

3.4 半确定性电磁复合散射模型^[14, 16]

半确定性电磁复合散射模型对目标外形、海面环境大尺度起伏采用确定性描述^[5], 对微尺度结构(随机海浪)采用随机散射模型化描述, 实现海面与舰船目标的电磁复合散射建模, 如图 4 所示。

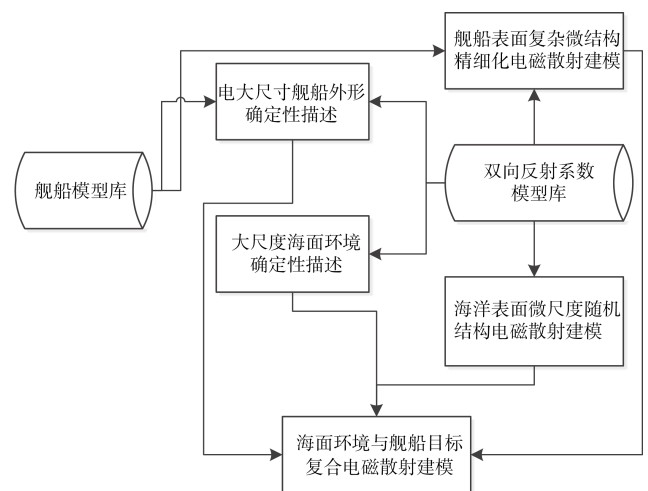


图 4 半确定性复合电磁散射建模原理框图
Fig. 4 Block diagram of semi-deterministic composite electromagnetic scattering modeling principle

根据建模的模型进行目标电磁散射特性仿真计算,利用测量数据进行目标电磁散射特性置信度验证,并不断进行模型迭代修正。

4 结束语

随着军事需求和科技的不断发展,需要构建舰船目标动态特性测试体系,同时不断完善和补充水中、地(舰)基、机载、球载和星载信息获取平台以及实验室模拟测量系统,进一步开展目标与背景的复合建模技术和基于目标特性的数据挖掘技术研究,为舰船目标的隐身设计提供技术支撑和数据保障。

参考文献

- [1] 阮颖铮. 雷达截面与隐身技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [2] 黄培康, 林桂森, 樊成方, 等. 雷达目标特征信号[M]. 北京: 宇航出版社, 1993.
- [3] 赵蕾. 海面上方简单目标复合电磁散射特性研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008.
- [4] 陈晓盼, 孙辉, 林刚, 等. 国外目标与环境电磁散射特性测试技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2018.
- [5] 吕英华. 计算电磁学的数值方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [6] 吴楠, 陈炯. 舰船目标 RCS 水面模拟试验及其应用探讨[J]. 中国舰船研究, 2012, 7(5): 103-106, 118.
- [7] JOHNSON J T. A numerical study of scattering from an object above a rough surface[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2002, 50(10): 1361-1367.
- [8] 王超, 殷红成, 黄墙康. 带有活动板的一类角反射器的 RCS 计算[J]. 目标与环境特性, 2006(1): 8-16.
- [9] 王云华. 粗糙面与其上方简单目标的复合电磁散射研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2005.
- [10] 陈美远. 二维舰船及编队与一维粗糙海面复合电磁散射特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
- [11] 张胜田. 窄带雷达的空间目标 RCS 数据处理与分析国外雷达目标特性测试技术发展研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
- [12] 鲍庆龙, 杜琳琳, 湛蓝, 等. 基于电磁散射建模的雷达回波半实物仿真方法研究[C]//第十届全国雷达学术年会. 北京: 中国电子学会, 2013.
- [13] 宋培茗. 雷达目标 RCS 的建模与检测[D]. 南京: 南京理工大学, 2004.
- [14] 李文兴, 卢长新, 宫建斌. 粗糙海面舰船目标 RCS 研究[J]. 雷达科学与技术, 2015(5): 496-500.
- [15] 陈勇, 董纯柱, 王超, 等. 海面目标复合电磁散射特性分析[C]//第十一届全国电波传播学术讨论年会. 成都: 中国电子学会电波传播分会, 2011.
- [16] 梁冰洋. NURBS 海面复合目标的电磁散射和舰船典型部位 RCS 研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2014.
- [17] 张平娟. 粗糙海面与其上方目标的复合电磁散射研究[J]. 安徽科技学院学报, 2010, 24(3): 19-21.

(责任编辑: 曹晓霖)