

引用格式: 杜晓佳, 廖章奇, 李哲, 等. 掠入射下舰船运动对本体雷达散射截面概率密度的影响 [J]. 中国舰船研究, 2023, 18(2): 211-217.

DU X J, LIAO Z Q, LI Z, et al. Influence of ship motion on radar cross section probability density under grazing incidence[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2023, 18(2): 211-217.

掠入射下舰船运动对本体雷达 散射截面概率密度的影响



扫码阅读全文

杜晓佳*, 廖章奇, 李哲, 陈一萱

中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉 430064

摘要: [目的] 航行运动产生的姿态变化会导致对自身雷达散射截面(RCS)概率密度发生变化, 因此有必要掌握舰船在各种运动工况时对掠入射下自身的 RCS 概率密度的影响程度。[方法] 利用准静态的思路, 构建水动力和电磁散射特性联合仿真模型及计算流程, 选取掠入射下 10 GHz 连续波作为探测雷达波威胁, 对不同统计时间、海况、航速、航向等参数下的舰船本体 RCS 概率分布进行对比和分析。[结果] 结果表明, 对数正态分布模型可较好地模拟船模静态 RCS 分布特性, 统计时间大于 250 s 后动态 RCS 概率分布基本稳定; 在低海况下及随浪或顶浪航行时动态 RCS 概率分布曲线存在“毛刺”现象。[结论] 研究表明, 航速对舰船 RCS 概率密度分布的影响可以忽略; 浪向角对舰船 RCS 概率密度分布的影响在较高海况时才明显; 海况增加使得 RCS 分布概率曲线越来越顺滑; 统计时间对 RCS 概率密度分布的影响较大, 需积累足够的数据进行试验或仿真才能准确掌握舰船 RCS 概率分布特性。

关键词: 舰船; 雷达散射截面(RCS); 运动状态; 概率密度

中图分类号: U674.702

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.02436

Influence of ship motion on radar cross section probability density under grazing incidence

DU Xiaojia*, LIAO Zhangqi, LI Zhe, Chen Yixuan

China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China

Abstract: [Objectives] Changes in attitude caused by sailing motion will lead to changes in the probability density of the radar cross section (RCS) of a ship. As such, it is necessary to master the influence degree of various motion conditions on the probability density of the RCS of a ship under grazing incidence. [Method] Using the quasi-static method, a hydrodynamic and electromagnetic scattering characteristic co-simulation model and calculation process are constructed. A 10 GHz continuous wave at grazing incidence is selected as the radar detection wave threat, and the RCS probability distributions of the ship's body under different statistical times, sea states, speeds, headings and other parameters are compared and analyzed. [Result] A lognormal distribution model is used to simulate the distribution characteristics of the static RCS of the ship model. The probability distribution of the dynamic RCS is basically stable when the statistical time is longer than 250 seconds. There exists a "burr" phenomenon in the dynamic RCS probability distribution curve under low sea states, following waves or beam sea drifting conditions. [Conclusion] The effects of the ship's speed on its RCS probability density distribution can be ignored. The influence of the sea wave direction angle on the RCS probability density distribution is obvious only in high sea states. The increase of the sea state makes the RCS distribution probability curve increasingly smooth. Statistical time has a great influence on the RCS probability density distribution, so it is necessary to accumulate sufficient data to carry out a test or simulation that can provide an accurate grasp of a ship's RCS probability distribution characteristics.

Key words: ship; radar cross section (RCS); ship motion; statistical properties

收稿日期: 2021-07-01

修回日期: 2021-09-21

网络首发时间: 2023-04-19 16:07

作者简介: 杜晓佳, 男, 1988 年生, 博士, 工程师

廖章奇, 男, 1985 年生, 博士, 高级工程师

李哲, 男, 1996 年生, 硕士, 工程师

陈一萱, 女, 1994 年生, 硕士, 工程师

*通信作者: 杜晓佳

0 引言

目标的雷达散射截面(RCS)是其在入射雷达波照射下的固有散射特征,与探测雷达参数、海洋环境、目标姿态特征等多个因素相关。在真实海洋环境中,在海况和入射波擦地角都较小时,海面与舰船间的耦合散射很小,时变海面引起的舰船姿态变化是舰船目标 RCS 随时间剧烈变化的主要原因^[1-2]。从信号检测来看,目标被雷达探测为概率事件,目标的概率分布特性能更好地衡量其雷达波隐身效果^[3],因此有必要掌握舰船各种运动工况对掠入射下自身的 RCS 概率密度的影响程度。沈鹏^[4]对外场测量的舰船 RCS 起伏分布进行拟合分析,结果表明该目标 360°全向 RCS 测量数据同时服从对数正态分布和 χ^2 分布,但这种实船 RCS 测量的成本代价极大,试验过程中误差因素多。利用 RCS 测量来获得舰船在不同运动状态和海洋参数下的 RCS 概率分布特性不现实,因此通过仿真手段实现运动对掠入射下舰船 RCS 概率密度的影响程度分析十分必要。

研究人员对此开展了大量动态 RCS 统计特征分析。戴崇等^[5]对 F-117A 隐身飞机的动态 RCS 特性进行了仿真,从统计特征参数、相关特性和起伏模型等方面对比了动静态 RCS 特性,结果表明,利用静态数据描述目标特性可能导致错误结论。庄亚强等^[6]在飞机动态 RCS 统计特征分析时在运动建模中叠加实际飞行中随机抖动的影响,使得运动建模更加贴近实际。晏青等^[7]建立了综合考虑无人机动态 RCS 与雷达距离的探测概率模型,利用遗传算法进行了基于动态 RCS 的航迹实时规划。薛丰利等^[8]对潜艇指挥台围壳在水面航行状态和半潜航行状态下的雷达隐身性进行研究,研究了不同航行状态下各重点探测角域探测概率的变化。

为全面掌握舰船航行运动对自身雷达波目标特性的影响,本文基于 DTMB 5415 船模构建了水面舰船水动力和电磁散射统一模型以及水动力仿真和电磁散射特性联合仿真流程,开展了不同航行参数和环境参数下舰船运动对自身动态 RCS 概率密度分布的影响分析,有助于真正掌握实船的雷达波目标特性,为舰船的突袭策略和路径规划提供理论基础。

1 理论基础

1.1 RCS 概率密度函数

舰船的雷达波回波一般由多个强散射点组

成,并随海洋环境、舰船姿态和雷达波参数的变化出现较大起伏。为描述舰船动态 RCS 起伏特性和雷达散射性能,其 RCS 概率密度函数(PDF)定义为 RCS 位于 σ' 和 $\sigma' + d\sigma$ 之间的概率 P ,即

$$P(\sigma' \leq \sigma \leq \sigma' + d\sigma) = \int_{\sigma'}^{\sigma'+d\sigma} p(\sigma) d\sigma \quad (1)$$

传统的舰船目标 RCS 起伏统计模型包括 χ^2 分布模型和对数正态分布模型等^[9]。 χ^2 分布模型对概率密度分布峰值估计较合理,但在峰值之后的拟合效果不如对数正态模型。对数正态分布指自变量取对数后满足正态分布的模型,其峰值窄,概率密度分布具有“高尾”特性,常出现比中值大很多的 RCS 值,适合表示舰船一类电大尺寸不规则散射体组合的目标。对于对数正态分布模型, RCS 的对数正态分布概率密度函数为^[10]:

$$p(\sigma) = \frac{1}{\sigma \sqrt{4\pi \ln \rho}} \exp \left[-\frac{\ln^2(\sigma/\sigma_0)}{4 \ln \rho} \right] \quad (2)$$

式中: σ 为 RCS 值; σ_0 为 RCS 的中值; ρ 为 σ 的平均值中值比,即 $\rho = \bar{\sigma}/\sigma_0$ 。文献 [11] 指出 RCS 散射统计曲线以 m^2 为单位时多具有“峰值陡直”的特点,分布模型在 $\text{dB} \cdot \text{m}^2$ 单位制下可更好地拟合曲线,故本文针对的是 $\text{dB} \cdot \text{m}^2$ 单位制下的 RCS 进行概率密度分布曲线拟合。

1.2 舰船运动特性预报方法

船舶摇荡运动是指船舶在风浪作用下于平衡位置附近所作的周期性振荡运动。国内外对舰船在波浪中的运动已经发展出了频域、时域,二维、三维,线性、非线性等多种方法^[12]。在规则波中,船舶的摆幅主要取决于波幅、船舶固有周期和波浪相遇周期的比值。由于切片理论具有计算快捷、对船型适用性好等诸多优点,故本文预报采用 STF 切片理论。假定舰船的横向运动和纵向运动相互独立,当舰船以任意浪向在规则波中匀速前进时,船体的六自由度响应是线性和简谐的。对于给定的航速、浪向,舰船运动位移可表示为

$$\xi_j = a_j \cos(\omega_e t + \varepsilon_j), \quad j = 1, 2, \dots, 6 \quad (3)$$

式中: a_j 为运动振幅; ω_e 为遭遇频率; ε_j 为第 j 个运动相对于坐标原点处最大波高的相位超前。此时,六自由度运动耦合的线性微分方程为

$$\sum_{k=1}^6 \left[(\mathbf{M}_{jk} + \mathbf{A}_{jk}) \ddot{\xi}_k + \mathbf{B}_{jk} \dot{\xi}_k + \mathbf{C}_{jk} \xi_k \right] = F_j e^{i\omega_e t} \quad (4)$$

$j = 1, 2, \dots, 6$

式中: \mathbf{M}_{jk} 为质量矩阵; \mathbf{A}_{jk} 为附加质量矩阵; \mathbf{B}_{jk} 为

阻尼系数矩阵; C_{jk} 为恢复力系数矩阵; ξ_k 为运动位移; F_j 为波浪扰动力; $\dot{\xi}_k$ 和 $\ddot{\xi}_k$ 表示速度和加速度

$$\begin{aligned} & (A_{11} + M)\ddot{\xi}_1 + B_{11}\dot{\xi}_1 + A_{13}\ddot{\xi}_3 + B_{13}\dot{\xi}_3 + (A_{15} + MZ_G)\ddot{\xi}_5 + B_{15}\dot{\xi}_5 = F_1 e^{i\omega_c t} \\ & A_{31}\ddot{\xi}_1 + B_{31}\dot{\xi}_1 + (A_{33} + M)\ddot{\xi}_3 + B_{33}\dot{\xi}_3 + C_{33}\ddot{\xi}_3 + A_{35}\ddot{\xi}_5 + B_{35}\dot{\xi}_5 + C_{35}\ddot{\xi}_5 = F_3 e^{i\omega_c t} \\ & (A_{51} + MZ_G)\ddot{\xi}_1 + B_{51}\dot{\xi}_1 + A_{53}\ddot{\xi}_3 + B_{53}\dot{\xi}_3 + C_{53}\ddot{\xi}_3 + (A_{55} + I_5)\ddot{\xi}_5 + B_{55}\dot{\xi}_5 + C_{55}\ddot{\xi}_5 = F_5 e^{i\omega_c t} \\ & (A_{22} + M)\ddot{\xi}_2 + B_{22}\dot{\xi}_2 + (A_{24} - MZ_G)\ddot{\xi}_4 + B_{24}\dot{\xi}_4 + A_{26}\ddot{\xi}_6 + B_{26}\dot{\xi}_6 = F_2 e^{i\omega_c t} \\ & (A_{42} - MZ_G)\ddot{\xi}_2 + B_{42}\dot{\xi}_2 + (A_{44} + I_4)\ddot{\xi}_4 + B_{44}\dot{\xi}_4 + C_{44}\ddot{\xi}_4 + (A_{46} - I_{46})\ddot{\xi}_6 + B_{46}\dot{\xi}_6 = F_4 e^{i\omega_c t} \\ & A_{62}\ddot{\xi}_2 + B_{62}\dot{\xi}_2 + (A_{64} - I_{46})\ddot{\xi}_4 + B_{64}\dot{\xi}_4 + (A_{66} + I_6)\ddot{\xi}_6 + B_{66}\dot{\xi}_6 = F_6 e^{i\omega_c t} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: Z_G 为重心垂向坐标; I 为质量惯性矩; 水动力系数和波浪扰动力(矩)可以通过计算每个船体剖面上受力并沿船长方向积分得到。

2 电磁散射模型与动态 RCS 计算方法

2.1 电磁散射计算模型

本文的水面舰船模型基于 DTMB 5415 船模所构建。上层建筑参照美海军“阿利·伯克”级驱逐舰进行简单构建, 略去了雷达和武器等舰面设备, 如图 1 所示。DTMB 5415 船模是 ITTC 推荐的标准船模之一^[13], 该模型有大量的试验数据和数值计算结果, 可为本文的工作提供参照。为便于比较和减少计算复杂度, 本文仅考虑水面舰船水线上的主船体动态 RCS, 忽略雷达、武器等舰面设备的影响, 并忽略海杂波和舰海耦合散射的影响。假定敌方探测雷达波频率为 X 波段, 频率为 10 GHz, 垂直极化且为连续波, 沿水面掠射。由于模型属于电大尺寸目标, 本文采用 GO-PO 高频近似方法进行 RCS 计算^[14]。

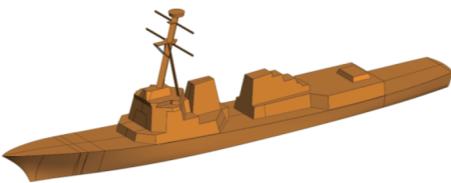


图 1 舰船几何模型

Fig. 1 Geometric model of warship

静止时水面舰船模型在水平面方向的 RCS 分布如图 2 所示, 其中蓝色曲线为采样间隔为 0.1° 的 RCS 曲线, 红色曲线为对蓝色曲线进行 2° 滑窗的曲线。从图中可以看出, 该目标 RCS 存在多个峰值点, $0^\circ, 90^\circ, 270^\circ$ 和 360° 这 4 个特征方向的 RCS 峰值特征明显。这说明该舰船模型将散射回波集中到少数角域, 大多数角域 RCS 保持较低的值, 即在大多数角度下 RCS 较小, 少数角度下 RCS 较大。

该模型水平面方位角 $0^\circ \sim 360^\circ$ RCS 在 dBm^2 单位制下的概率分布及正态拟合结果如图 3 所示, 该模型静态 RCS 统计数据存在“高尾”现象,

如果假设舰船具有横向对称性, 则六自由度的耦合运动方程变成:

即左侧密集右侧稀疏, RCS 均值大于中值。该模型 $0^\circ \sim 360^\circ$ RCS 的正态分布概率如图 4 所示。“×”号为每一个 RCS 样本数据, 从图中可知, 样本数据正态分布概率呈现接近一条直线, 可见对数正态分布模型较好模拟了模型静态 RCS 分布特性。

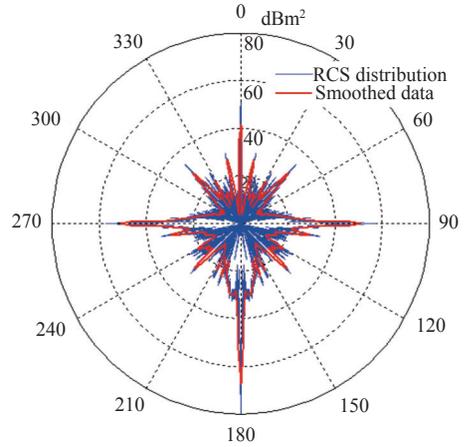


图 2 舰船水平面方向 RCS 分布

Fig. 2 RCS distribution in horizontal plane

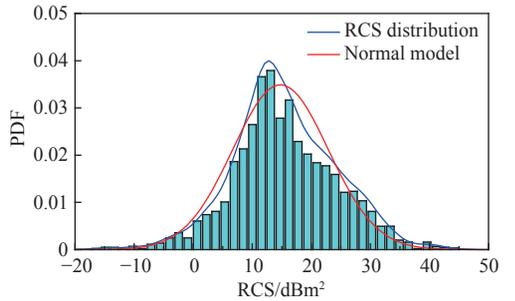


图 3 概率密度分布及拟合结果

Fig. 3 Probability density distribution and fitting model

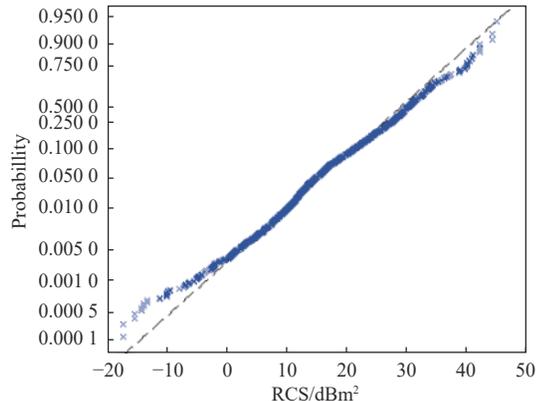


图 4 正态分布概率对比图

Fig. 4 Normal probability vs the RCS distribution

2.2 动态 RCS 计算方法

在飞机和导弹类目标分析中多采用准静态方法进行动态 RCS 特性计算,即当目标的速度相对于电磁波传播速度是缓慢变化的,多普勒频率远低于电磁波频率,故可采用离散时间点上对应的一系列静止目标仿真模型的 RCS 分布来逼近连续运动的目标动态 RCS^[15],忽略微小多普勒的影响。鉴于雷达波传播速度远大于舰船运动速度和舰船摇摆速度,因此在某一固定时刻,舰船相对于雷达波传播而言是静止的,本文亦通过准静态方法模拟舰船动态摇摆下的 RCS 分布特性。运动状态下舰船 RCS 具体仿真流程如图 5 所示,主要分为以下几个步骤:

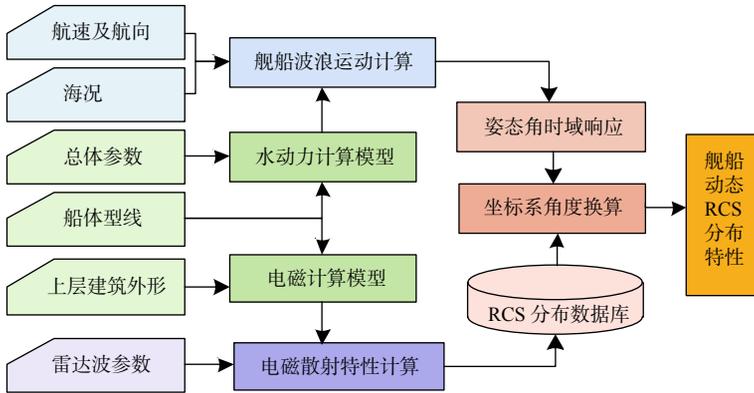


图 5 海水扰动下舰船动态 RCS 仿真流程图

Fig. 5 Simulation flow chart of ship's dynamic RCS under seawater disturbance

3 舰船动态 RCS 统计概率密度分析

3.1 时间对 RCS 概率密度的影响

在实际舰船 RCS 测量时,测量时间直接决定了测量成本和测量精度的平衡。统计时间过短则采样分析的结果可能存在偏差,统计时间过长会导致试验成本线性提高。为分析测量时间的具体影响,确定一个合理的统计时间范围,选取 3 级海况 18 kn 航速 60°浪向角航行状态,对不同统计时间下的掠入射状态 $0^\circ \sim 360^\circ$ 方位角的动态 RCS 进行概率密度统计计算,其中初始采样时间为 1 s,递增时间为 10 s,如图 6 所示。

从图 6 可以看出,当统计时间为 1 s 时, $0^\circ \sim 360^\circ$ 方位角下的动态 RCS 概率密度分布与图 3 静止状态下的概率密度分布有明显差别,即舰船动态 RCS 统计特性与静止状态存在差异。当统计时间为 1 s 时, $0^\circ \sim 360^\circ$ 方位角下的 RCS 概率密度分布与统计时间 600 s 的概率分布有明显差别,可见采样时间对舰船 RCS 概率密度分布存在较大影

响。随着统计时间的增加,概率密度分布波峰的峰值不断提高,且峰值宽度变窄,30 dB 以上的 RCS 概率密度逐渐降低,即动态 RCS 分布概率向 RCS 分布峰值处集中,RCS 统计数据存在“高尾”现象。此外,从图中可知,统计时间为 250 s 和 600 s 的 RCS 概率分布曲线基本重合,可见当统计时间大于 250 s 时,该模型的动态 RCS 概率密度分布基本稳定。250 s 采样时间稳定与本文选

1) 基于航速、浪向和海况形成舰船水动力计算输入条件,基于船舶参数和型线构建舰船水动力模型,开展舰船运动特性预报计算,获取舰船在不同海况(1~5 级)、航速(0~24 kn)和航向下($0^\circ \sim 180^\circ$)6 个自由度运动的时间序列数据;

2) 基于船体型线及上层建筑等构建舰船电磁散射特性模型,基于 10 GHz 垂直极化雷达参数,采用 GO-PO 高频近似方法开展电磁散射特性计算,获取舰船本体在主要角域下的 RCS 数据库;

3) 基于离散时间点上舰船运动姿态角,将考评坐标系中的考评角度变换为舰船坐标系的角度,进而根据舰船本体 RCS 数据库,换算为考评坐标系下水平角域的 RCS 分布,最后获取时间序列下的舰船动态 RCS 特性。

响。随着统计时间的增加,概率密度分布波峰的峰值不断提高,且峰值宽度变窄,30 dB 以上的 RCS 概率密度逐渐降低,即动态 RCS 分布概率向 RCS 分布峰值处集中,RCS 统计数据存在“高尾”现象。此外,从图中可知,统计时间为 250 s 和 600 s 的 RCS 概率分布曲线基本重合,可见当统计时间大于 250 s 时,该模型的动态 RCS 概率密度分布基本稳定。250 s 采样时间稳定与本文选

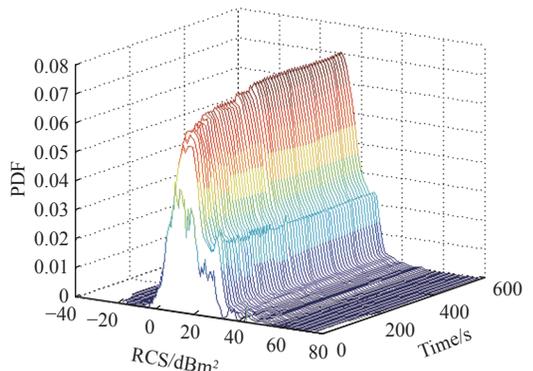


图 6 统计时间对概率密度的影响

Fig. 6 Time series data of ship motion

取的海浪谱和船型有关,其他船型具体稳定时间长度需结合该舰船运动的平稳随机特征来确定。

3.2 航速对 RCS 概率密度的影响

在航行过程中,航速的变化会导致舰船姿态角幅值和响应周期发生一定变化。为研究不同航速对 RCS 累积分布函数的影响,当舰船在 1 级海况和 3 级海况条件下 0°航向角时,对 0, 6, 12, 18 和

24 kn 航速状态下的 RCS 累积分布进行计算,设定采样时间为 600 s,结果如图 7 所示。从图 7 中可看出,当舰船航速从 0 增加到 24 kn 时,其 RCS 的概率密度分布曲线基本一致,可见航速对舰船 RCS 概率密度分布的影响几乎可以忽略。对比图 7(a)和图 7(b),两种海况下的 RCS 概率分布有明显差异,1 级海况曲线“毛刺”较多,可见海况对舰船动态 RCS 影响较大。

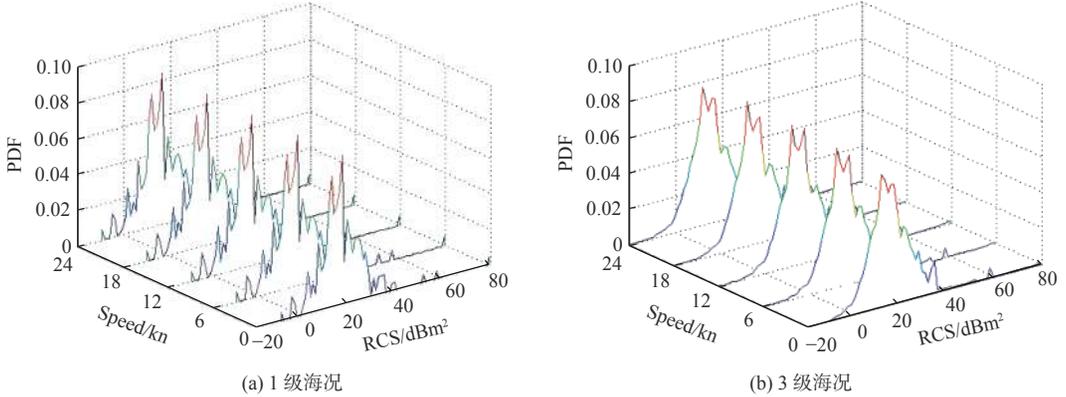


图 7 航速对 RCS 概率密度函数的影响

Fig. 7 RCS characteristic values in different speed

3.3 海况对 RCS 概率密度的影响

受海浪的影响,海况越大,舰船姿态变化幅度越大,RCS 的变化越激烈。为分析在不同海况下舰船 RCS 特征参数的变化规律,对随浪(浪向角 0°)和横浪(浪向角 90°)状态下的漂泊舰船,计算其在 1~5 级海况下的 RCS 概率密度分布,如图 8 所示。在舰船运动计算时取与浪级对应的有义波高的上限,设定采样时间为 600 s。

从图 8 中可知,在随浪与横浪工况下,随海况的增加,模型动态 RCS 概率密度曲线越来越平滑,曲线“毛刺”越来越少,30 dB 以上的 RCS 概率密度不断减低,分布概率向 RCS 分布峰值区域处集中。这说明,随着海况的增加,舰船摇摆运动

导致动态 RCS 分布概率呈稳定状态。对比图 8(a)和图 8(b),可知横浪状态下 RCS 概率密度曲线更顺滑,这应该与相同波浪遭遇下舰船横摇相对纵摇幅值更大有关。

3.4 浪向对 RCS 概率密度的影响

由于船体型线细长且左右对称,航行方向会导致舰船运行幅值和周期发生变化,进而产生不同 RCS 概率密度分布。为掌握浪向对舰船 RCS 特征参数的影响,分别针对 1 级和 3 级海况 18 kn 航速下的舰船 RCS 概率密度进行统计拟合,如图 9 所示。其中浪向分别取为 0°(随浪), 30°, 60°, 90°(横浪), 120°, 150°和 180°(顶浪)。

在 1 级海况下,大于 30 dB 的 RCS 分布概率

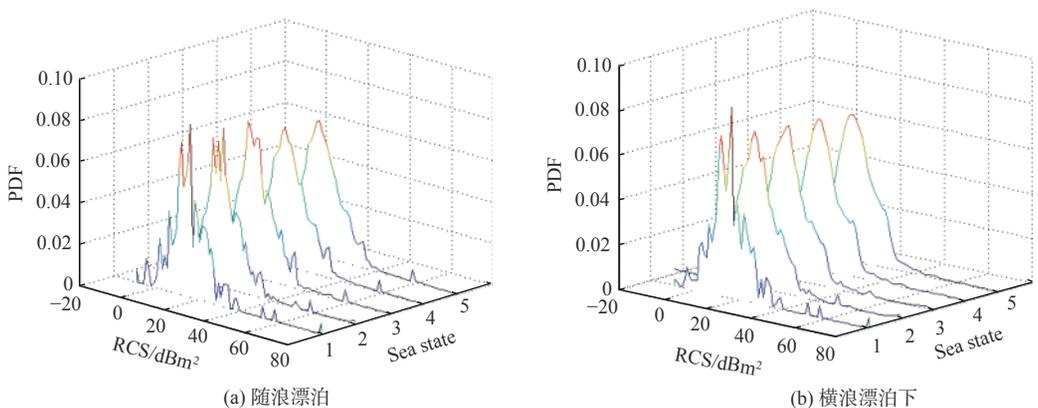


图 8 海况对 RCS 概率密度的影响

Fig. 8 RCS characteristic values in different sea conditions

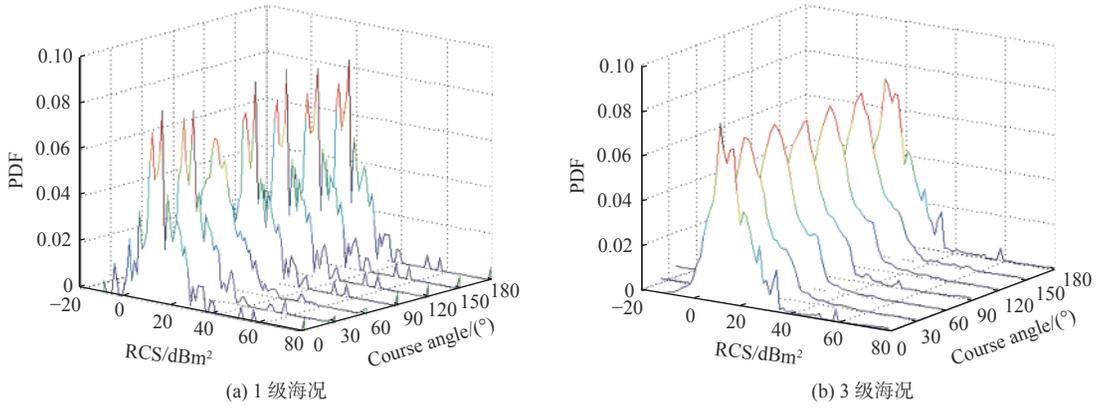


图9 浪向对 RCS 累积分布函数的影响
Fig. 9 RCS characteristic values in different course angle

基本不随浪向角发生变化。与其他浪向角相比,浪向角为 60° 时,RCS分布概率密度峰值最低,峰值区域较宽,同时30 dB以上概率密度最低,即RCS向RCS峰值周边区域附近集中。在3级海况时,RCS分布概率随浪向角变化复杂,在随浪和顶浪航行时,概率分布曲线存在“毛刺”现象,其他浪向这种现象较少。在浪向角为 60° 时,30 dB以上的RCS概率密度最低。对比图9(a)和图9(b)可知,在低海况(1级)下,RCS分布概率几乎不随浪向角发生变化;而在相对较高海况(3级)下,RCS分布概率随浪向角发生复杂变化。

4 结论

为分析舰船航行运动对自身雷达波散射概率密度的影响,本文构建了水动力仿真、电磁散射特性联合仿真模型和技术流程,分析不同条件参数对舰船动态RCS统计模型的影响,具体结论如下:

1) 采样时间对舰船RCS概率密度分布存在显著影响。当统计时间大于250 s后,该模型的动态RCS概率分布基本稳定。随着统计时间的增加,动态RCS向峰值处集中。

2) 航速对舰船RCS概率密度分布影响不明显。浪向角只在较高海况时才对舰船RCS概率密度有明显影响,低海况时影响不大。海况的增加会使得动态RCS的分布概率曲线越来越平滑。

3) 在低海况下及随浪或顶浪航行时,动态RCS概率分布曲线普遍存在“毛刺”现象。当舰船摇摆幅度增加,“毛刺”现象就会减弱。

本文分析了舰船在不同运动状态下RCS起伏特性的变化规律,可以牵引实船RCS测试工况和测试时间的制定。目前本文仅考虑连续波下舰船动态RCS分布,未来工作中可进一步扩展到入射雷达信号为脉冲或调制波形情况下的舰船动

态RCS概率分布情况。

参考文献:

- [1] 许小剑,姜丹,李晓飞. 时变海面舰船目标动态雷达特征信号模型[J]. *系统工程与电子技术*, 2011, 33(1): 42-47.
XU X J, JIANG D, LI X F. Modeling of dynamic radar signatures for ships on time-varying sea surface[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(1): 42-47 (in Chinese).
- [2] KIM K, KIM J H, KIM Y H, et al. Numerical investigation on dynamic radar cross section of naval ship considering ocean wave-induced motion[J]. *Progress in Electromagnetics Research M*, 2012, 27(2): 11-26.
- [3] 陈世春,黄沛霖,姬金祖. 从探测概率的角度评价飞机的隐身性能[J]. *航空学报*, 2015, 36(4): 1150-1161.
CHEN S C, HUANG P L, JI J Z. Evaluating aircraft's stealth performance from the perspective of detection probability[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2015, 36(4): 1150-1161 (in Chinese).
- [4] 沈鹏. 海面舰船RCS起伏分布模型研究[J]. *指挥控制与仿真*, 2019, 41(4): 37-39.
SHEN P. RCS fluctuation distribution models research of ship target on sea[J]. *Command Control & Simulate*, 2019, 41(4): 37-39 (in Chinese).
- [5] 戴崇,徐振海,肖顺平. 雷达目标动静态RCS特性差异分析[J]. *信号处理*, 2013, 29(9): 1256-1263.
DAI C, XU Z H, XIAO S P. Analysis for differences between dynamic and static RCS characteristics of radar target[J]. *Journal of Signal Processing*, 2013, 29(9): 1256-1263 (in Chinese).
- [6] 庄亚强,张晨新,周超,等. 飞机动态RCS序列的仿真研究[J]. *电光与控制*, 2014, 21(7): 103-106.
ZHUANG Y Q, ZHANG C X, ZHOU C, et al. Simulation of dynamic RCS series of aircraft[J]. *Electronics Optics & Control*, 2014, 21(7): 103-106 (in Chinese).
- [7] 晏青,熊峻江,游思明. 基于动态RCS的无人机航迹实时规划[J]. *北京航空航天大学学报*, 2011, 37(9):

