

韦尹煜, 吴振森, 路越. 粗糙海面上舰船 Kelvin 尾迹的电磁散射仿真[J]. 电波科学学报, 2016, 31(3): 438-442. DOI: 10.13443/j.cjors.2015071002

WEI Y Y, WU Z S, LU Y. Electromagnetic scattering simulation of Kelvin wake in rough sea surface[J]. Chinese journal of radio science, 2016, 31(3): 438-442. (in Chinese). DOI: 10.13443/j.cjors.2015071002

粗糙海面上舰船 Kelvin 尾迹的电磁散射仿真

韦尹煜¹ 吴振森^{1,2} 路越¹

(1. 西安电子科技大学物理与光电工程学院, 西安 710071

2. 西安电子科技大学信息感知技术协同创新中心, 西安 710071)

摘 要 基于点源扰动方法建立了舰船的 Kelvin 尾迹模型, 模拟了不同船速下的 Kelvin 尾迹. 实际中, 舰船尾迹除了受到舰船自身参数影响外, 还会受到风驱海浪的调制. 为了建立更为符合实际的 Kelvin 尾迹模型, 借助 PM(Pierson-Moscowitz)海谱生成粗糙海面, 将其与 Kelvin 尾迹模型进行线性叠加后, 得到了粗糙海面上舰船尾迹. 在该复合模型基础上, 利用物理光学法获得了不同入射情况下的单站、双站的雷达散射截面, 实现了海面舰船尾迹电磁散射的模拟仿真. 这一过程的实现, 有利于更好地模拟舰船尾迹在合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)中的成像仿真, 同时为 SAR 成像中舰船尾迹以及舰船自身的识别奠定了基础.

关键词 Kelvin 尾迹; PM 谱; 物理光学法; 雷达散射截面(RCS)

中图分类号 O451

文献标志码 A

文章编号 1005-0388(2016)03-0438-05

DOI 10.13443/j.cjors.2015071002

Electromagnetic scattering simulation of Kelvin wake in rough sea surface

WEI Yinyu¹ WU Zhensen^{1,2} LU Yue¹

(1. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. Collaborative Innovation Center of Information Sensing and Understanding,

Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract Based on the Kelvin wake model by the point-source disturbance method, ship wakes at different speeds are simulated. In practical terms, the ship wake is not only affected by the parameters of ship, but also modulated by the wind-driven ocean waves. In order to build a better model, the ship wake in the rough sea surface is obtained by the linear summation of the rough sea surface produced by the Pierson-Moscowitz (PM) spectrum and the Kelvin wake. Utilizing the composite model, the variation of the single and bistatic radar cross sections (RCS) with scattering angles are investigated by the physical optics (PO) method. The simulation of the electromagnetic scattering of ship wake in rough sea surface is achieved. The realization of this process will be useful for a better simulation of the Kelvin wake in synthetic aperture radar(SAR) imaging, and provide a foundation for the recognition of vessel and its wakes.

Keywords Kelvin wake; PM spectrum; PO; RCS

收稿日期: 2015-07-10

资助项目: 国家自然科学基金(61571355)

联系人: 韦尹煜 E-mail: xdlywyy@163.com

引言

对于水面舰船目标,传统探测方法都是以目标本身作为探测客体,而探测的信号源就是来自水中航行舰船的声反射性质、电磁性质等。但是,随着各种先进消声技术、声对抗技术、消磁技术等隐身技术的发展和运用,使传统探测手段的工作能力被严重削弱。

然而,在舰船航行过程中,其产生的尾迹具有尺度大、存在时间较长的特点,且无论采用什么隐身技术也很难被消除掉,完全满足被用作探测信号源的要求。同时,随着合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)的兴起,可以用星载或机载 SAR 图像中的船尾迹来识别运动舰船,并可通过尾迹形态得到舰船的吃水深度、航速等重要信息,因此研究舰船尾迹在海上目标探测中具有重要作用。

近几十年来,国内外学者对舰船尾迹,尤其是对 Kelvin 尾迹进行了大量研究,Tuck 等人^[1]于 1971 年在 Kelvin 驻相法的基础上计算了船行波。2000 年,Fontaine 等^[2]在考虑了舰船形状和大小的情况下,求解了在无粘流体中的船行波。2010 年,孙荣庆等^[3]对运动舰船的 Kelvin 尾迹和湍流尾迹的电磁散射建模作了相关研究。2013 年,巩彪等^[4]对 Kelvin 尾迹作了 SAR 图像仿真。2015 年,Zilman 等人^[5]研究了粗糙海面上 Kelvin 尾迹在 SAR 成像中的识别问题。

本文在不同环境条件下,对上述模型进行了模拟验证,建立了更为符合实际的 Kelvin 尾迹模型;同时,利用 PM 海谱生成粗糙海面,并结合物理光学(Physical Optics, PO)法,实现了粗糙海面上舰船尾迹的电磁散射的模拟仿真。

1 Kelvin 尾迹/海面线性叠加模型

1.1 Kelvin 尾迹建模

舰船尾迹主要由分歧波和横断波组成,二者干涉形成尖头波,由于尖头波的波长短,因而每个波前不能够被独立地分辨开来而表现为亮线,形成开尔文臂。开尔文臂的尾迹角约为 $\pm 19.5^\circ$,如图 1、图 2 所示。

点源扰动模型是模拟 Kelvin 尾迹的基础,其原理是:将舰船目标看作一个以速度 v 移动的椭球体,对椭球体上每一个点按照航迹模式进行计算,再将每个点的航迹的近似值相叠加,从而得到整个 Kelvin 尾迹。

舰船 Kelvin 尾迹的自由波模形如下:

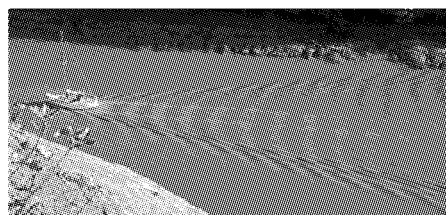


图1 舰船尾迹实例

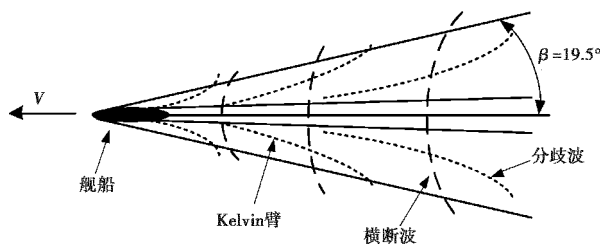


图2 尾迹模式示意图

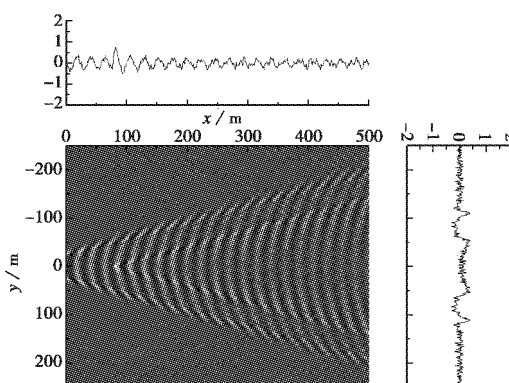
$$\zeta(x, y) = \operatorname{Re} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} F(\theta) \cdot e^{-jk_0 \sec^2 \theta (x \cos \theta + y \sin \theta)} d\theta. \quad (1)$$

$F(\theta)$ 表示舰船的自由谱,根据筒体舰船理论得到。将 $\zeta(x, y)$ 的积分分成船首和船尾两部分,考虑到粘性的影响,对船尾部分乘以粘性系数 $C = 0.6$,得到 Kelvin 尾迹模型公式:

$$\begin{cases} \zeta(x, y) = \frac{4b}{\pi k_0 l} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} (1 - e^{-k_0 d \sec \theta}) \cdot \\ \sin[k \sec^2 \theta (x \cos \theta + y \sin \theta)] d\theta, \\ \zeta(x, y) = \zeta(x - l, y) + C \zeta(x + l, y). \end{cases} \quad (2)$$

式中: d 为吃水深度; b 为半船宽; l 为半船长。

图 3 为不同船速下的 Kelvin 尾迹。Kelvin 尾迹轮廓形如扇形,横断波沿舰船的航行方向传播,具有明显的周期特性。船速较小时, Kelvin 波长较短,相应的尾迹高度起伏较小,随着船速的增加,波长与振幅明显增加,这与实际情况相符合。



(a) 船速 $v_1 = 5 \text{ m/s}$

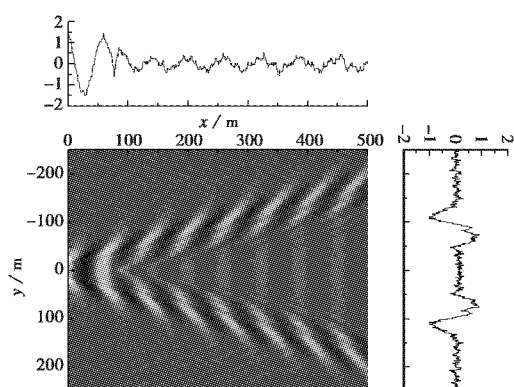
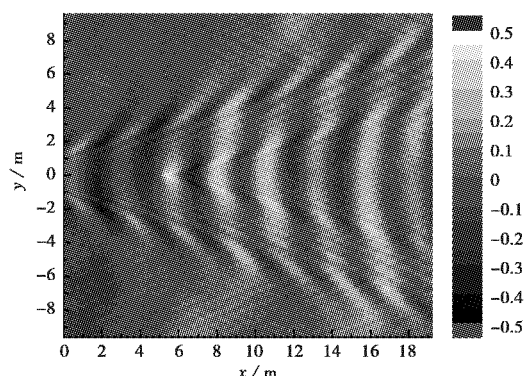
(b) 船速 $v_2 = 10$ m/s

图3 不同船速下的 Kelvin 尾迹

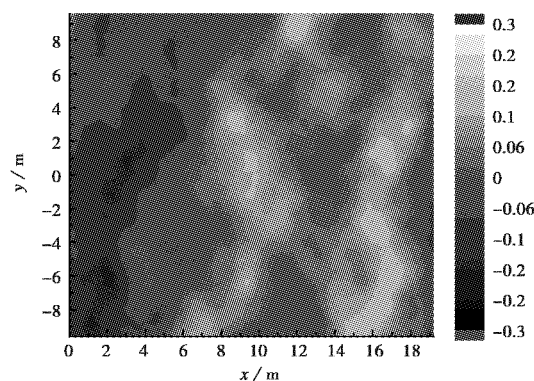


(c) PM 海面叠加 Kelvin 尾迹

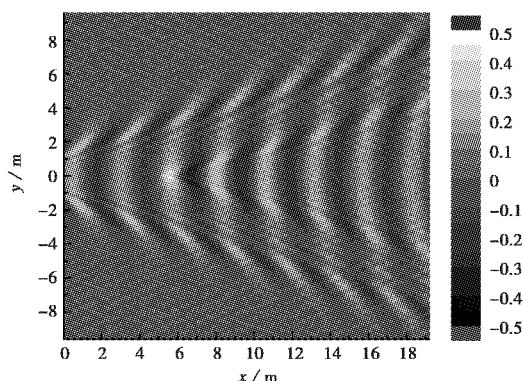
图4 Kelvin 尾迹与海面的线性叠加

1.2 Kelvin 尾迹与海面的线性叠加模型

高频利用 PM 海谱^[7-8]生成海面模型, 风速 $u_{19.5} = 3.5$ m/s, 风向 $\varphi_w = 0^\circ$, 如图 4(a) 所示. 同时, 建立小型舰船尾迹模型, 如图 4(b) 所示, 相关参数为 $d = 1.5$ m, $l = 5$ m, $b = 2.5$ m, $v = 2$ m/s. 仿真区域 $L_x = L_y = 19.2$ m, 取样点数为 $M = N = 512$, 面元尺寸为 0.0375 m \times 0.0375 m. 将海面模型与 Kelvin 尾迹模型进行线性叠加, 得到海洋中的舰船尾迹模型, 如图 4(c) 所示. 之后, 将利用此模型进行电磁散射计算.



(a) PM 海面



(b) Kelvin 尾迹

2 物理光学法

PO 法是求解 Helmholtz 积分方程的近似方法, 在求解电磁散射问题中应用广泛, 其基本思想是: 当入射波的波长 λ 和粗糙表面曲率半径 ρ 满足条件 $\rho > 10\lambda$ 时, 粗糙面可视为由许多小平面对拼接而成, 电磁波在粗糙面的边缘和尖点绕射、面元间的多次散射等作用可以忽略. 入射波不能直接照射的区域是暗区, 入射波可以直接照射的区域是亮区, 计算每一个亮区散射场, 叠加后得到总散射场. 粗糙面表面面元电磁流为:

$$\begin{cases} \mathbf{J} = \hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{H}^i \\ = \frac{1}{\eta_0} \{ -(\hat{\mathbf{e}}_i \cdot \hat{\mathbf{h}})(\hat{\mathbf{n}} \cdot \hat{\mathbf{k}}_i)(1 - R_H)\hat{\mathbf{h}} + \\ (\hat{\mathbf{e}}_i \cdot \hat{\mathbf{v}})(\hat{\mathbf{n}} \times \hat{\mathbf{h}})(1 + R_V) \} E_0 p(x, y) e^{-j\hat{\mathbf{k}}_i \cdot \mathbf{r}}, \\ \mathbf{M} = \mathbf{E}^i \times \hat{\mathbf{n}} \\ = -\{ (\hat{\mathbf{e}}_i \cdot \hat{\mathbf{h}})(\hat{\mathbf{n}} \times \hat{\mathbf{h}})(1 + R_H)\hat{\mathbf{h}} + \\ (\hat{\mathbf{e}}_i \cdot \hat{\mathbf{v}})(\hat{\mathbf{n}} \cdot \hat{\mathbf{k}}_i)(1 - R_V) \} E_0 p(x, y) e^{-j\hat{\mathbf{k}}_i \cdot \mathbf{r}}. \end{cases} \quad (3)$$

式中, R_H, R_V 为局部极化反射系数. 由此得到散射场:

$$\begin{cases} \mathbf{E}^s(\mathbf{r}) = -j \frac{\omega \mu_0}{4\pi r} e^{-jkr} \cdot \int_S ds' \left\{ \mathbf{J}(\mathbf{r}') - \right. \\ \left. [\mathbf{J}(\mathbf{r}') \cdot \hat{\mathbf{k}}_s] \hat{\mathbf{k}}_s + \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} [\mathbf{M}(\mathbf{r}') \times \hat{\mathbf{k}}_s] \right\} e^{j\mathbf{k}r' \cdot \hat{\mathbf{k}}_s} \\ \mathbf{H}^s(\mathbf{r}) = -j \frac{\omega \mu_0}{4\pi r} e^{-jkr} \cdot \int_S ds' \left\{ \mathbf{M}(\mathbf{r}') - \right. \\ \left. [\mathbf{M}(\mathbf{r}') \cdot \hat{\mathbf{k}}_s] \hat{\mathbf{k}}_s + \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} [\mathbf{J}(\mathbf{r}') \times \hat{\mathbf{k}}_s] \right\} e^{j\mathbf{k}r' \cdot \hat{\mathbf{k}}_s} \end{cases} \quad (4)$$

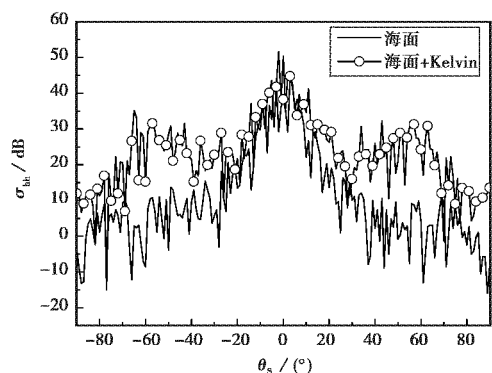
3 仿真结果及分析

利用物理光学法对 1.2 节中所建立的复合模型

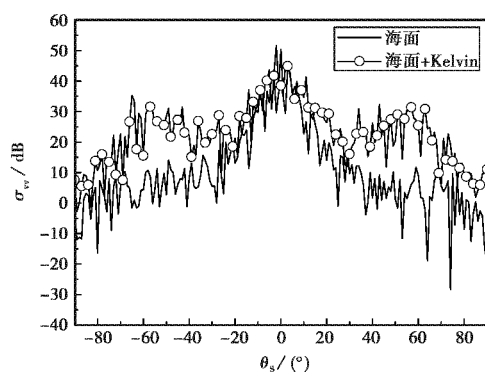
进行电磁散射计算,得到其单、双站雷达散射截面(Radar Cross-Section,RCS).

3.1 单站电磁散射

单站散射系数的仿真结果如图5所示.



(a) HH 极化



(b) VV 极化

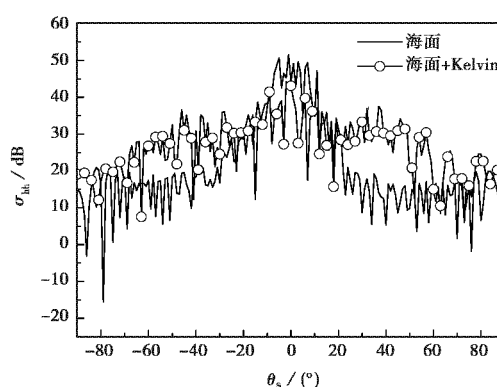
图5 HH极化、VV极化下的单站 RCS

可以看到:镜像区域中,来自介质海面的平均后向 RCS 明显大于带有舰船 Kelvin 尾迹的后向 RCS;随着入射角的增大,来自单纯海面的后向 RCS 明显小于叠加有 Kelvin 尾迹海面的 RCS.这是由于尾迹的存在增大了海面起伏,改变了海面的粗糙度,使散射效果增强.

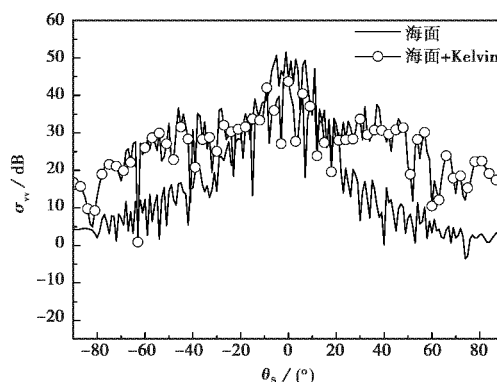
3.2 双站电磁散射

图6给出了入射角分别为 0° 和 30° 情况下的双站 RCS.

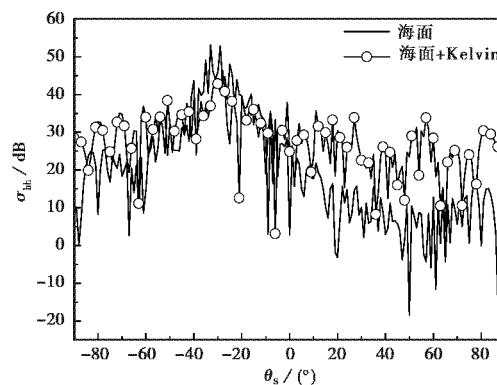
仿真结果表明:在镜像区域,单纯海面的 RCS 明显大于带有舰船 Kelvin 尾迹的 RCS.而在远离了镜像区域,单纯海面的 RCS 明显小于叠加有舰船 Kelvin 尾迹的 RCS.原因是:尾迹的存在改变了海面粗糙度,使得在镜像区域相应的散射减弱,在其他区域的散射增强.



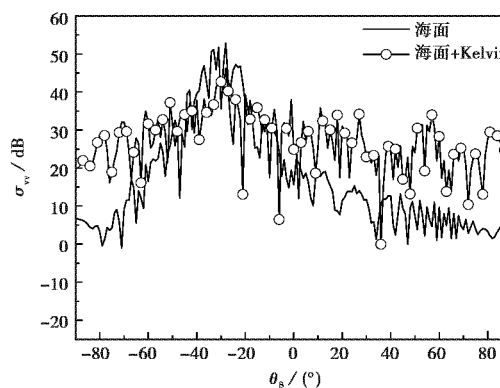
(a) $\theta_i = 0^\circ$, HH 极化



(b) $\theta_i = 0^\circ$, VV 极化



(c) $\theta_i = 30^\circ$, HH 极化



(d) $\theta_i = 30^\circ$, VV 极化

图6 不同入射角、不同极化情况下的双站 RCS

4 结 论

本文利用点源扰动模型建立了舰船的 Kelvin 尾迹模型,模拟了不同船速下的舰船尾迹,发现当船速越大时,尾迹波长越长,波高也越大.同时,借助 PM 海谱生成粗糙海面,将其与 Kelvin 尾迹模型进行线性叠加得到了海面上的舰船尾迹.最后,针对舰船尾迹对粗糙海面电磁散射影这一问题进行了模拟仿真,利用 PO 获得了不同入射情况下的单、双站 RCS,发现由于尾迹的存在增大了海面起伏,改变了海面的粗糙度,从而在镜向方向上的电磁散射减弱,非镜向方向上的散射效果增强.

参考文献

- [1] TUCK E. O. On line distribution of Kelvin sources [J]. Journal of ship research, 1971, 12(2): 105-112.
- [2] FONTAINE E, FALTINSEN O M, COINTE R. New insight into the generation of ship bow waves [J]. Journal of fluid mechanics, 2000, 421(1): 15-38.
- [3] 孙荣庆, 罗根, 张民, 等. 运动舰船的开尔文尾迹和湍流尾迹的电磁散射模型[C]//2010 全国电磁散射与逆散射学术年会. 2010.
- [4] 巩彪, 黄韦良, 陈鹏. Kelvin 尾迹 SAR 图像仿真研究 [J]. 海洋通报, 2013, 32(2): 208-213.
GONG B, HUANG W G, CHEN P. Study on the SAR imaging simulation of kelvin ship wake[J]. Marine science bulletin, 2013, 32(2): 208-213. (in Chinese)
- [5] ZILMAN G, ZAPOLSKI A, MAROM M. On detectability of a ship's Kelvin wake in simulated SAR images of rough sea surface[J]. IEEE transactions on geoscience & remote sensing, 2015, 53(2): 609-619.
- [6] OUMANSOUR K, WANG Y, SAILLARD J. Multi-frequency SAR observation of a ship wake[J]. IEE proceedings-radar, sonar and navigation, 1996, 143(4): 275-280.
- [7] 李钦, 管荣生. 双尺度粗糙面的电磁波散射问题[J]. 电波科学学报, 1990, 5(3): 59-66.
LI Q, GUAN R S. Wave scattering from rough surfaces with two scale[J]. Chinese journal of radio science, 1990, 5(3): 59-66. (in Chinese)
- [8] PIERSON W J, LIONEL M. A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S[J]. Journal of geophysical research, 1964, 69: 5181-5190.

作者简介



韦尹煜 (1990—), 男, 甘肃人, 西安电子科技大学博士研究生, 研究方向为目标与环境复合电磁散射及并行计算方法。



吴振森 (1946—), 男, 湖北人, 西安电子科技大学教授, 博士生导师, 近年来主要从事复杂介质、非均匀介质中的电磁波/光波的传播与散射、目标激光散射特性和电磁散射等方面的研究。