doi:10.11887/j.cn.201604014 http://journal.nudt.edu.cn

船海复合场景面元化快速电磁建模方法及SAR成像仿真*

李 宁,张 民,王 欣,聂 丁
(西安电子科技大学 物理与光电工程学院,陕西 西安 710071)

摘 要:在微波高频段,海面背景或海上船类目标往往具有电大尺寸和复杂精细的结构,这给船海复合场景的电磁建模带来巨大的计算负担。为简化计算,基于海面电磁散射模型面元化思想和图形电磁学,结合计算耦合场的四路径模型,提出一种电大尺寸船海复合场景电磁散射的快速计算方法。在保证海面与目标复合散射场的计算准确性前提下,提高计算效率。仿真并分析不同雷达参数下动态海面与目标的雷达散射截面,计算结果与实测数据以及精确数值方法结果的良好一致性验证了方法的准确性。将复合散射快速计算方法应用于合成孔径雷达成像仿真,仿真结果验证了方法的有效性。

关键词:面元模型;图形电磁学;复合散射;雷达散射截面;合成孔径雷达成像
中图分类号:TN95 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-2486(2016)04-090-06

Facet-based rapid electromagnetic modeling and SAR imaging for composite ship-sea scene

LI Ning, *ZHANG Min*, *WANG Xin*, *NIE Ding*
(School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: In the high frequency of microwave, sea surface or ship target usually has the characteristics of electrically large size and very sophisticated structure, which imposes a huge computational burden for the electromagnetic modeling of the composite ship-sea scene. To simplify the calculation, based on the facet-model theory, the graphical electromagnetic computing method and the four path model, a hybrid method for the electromagnetic scattering computation of electrically-large composite ship-sea scene was presented. Under the precondition of guarantee calculation precision, the efficiency was improved obviously. The radar cross section of time-varying sea surfaces and ship target for different radar parameters were simulated and analyzed. The results show good agreement with the experimental data and the accurate numerical results, which demonstrates the correctness of the method. Application of the model to synthetic aperture radar imaging of marine scenes was developed. Simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed method.

Key words: facet-model; graphical electromagnetic computing; composite scattering; radar cross section; synthetic aperture radar imaging

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)能克服云雾雨雪和夜暗条件的限制对地面目标成像,可在任何时间任何气象条件下以较高的分辨率完成对地观测任务。该优点使得SAR成像仿真技术受到世界各国高度重视并在近年来得到迅速发展,在目标探测、海洋遥感等诸多军事和民用领域发挥了重要作用[1-3]。尤其是近些年来,海洋的战略地位备受各国关注。国际上一系列机载、星载SAR遥感计划相继付诸实施,实现了多波段、多极化、全天候的海洋观测,获得了丰富的信息,充分展示了SAR遥感信息在海洋应用上的意义和价值。因此研究粗糙动态海面及其上目标的SAR成像问题具有重要的科学意义和应用价值。

由于SAR成像系统主要基于相干雷达,利用后向散射信号的连续的多普勒信息获得目标的高分辨,对目标后向散射信号的相位十分敏感,因此,获取准确有效的目标后向雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)计算方法是十分重要的。只有行之有效的电磁散射建模方法,才能精确描述电大尺寸海面或者舰船-海面复合模型的散射贡献。

双尺度理论(Two-Scale Method, TSM)[4-5]自被提出以来,因其物理机理明确,对计算精度和计算效率的合理兼顾而被认为是计算电大尺寸海面非常有效的方法,被相关研究人员广泛采用。该

* **收稿日期**:2015-04-17
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61372004,41306188)
作者简介:李宁(1984—),男,河南商丘人,博士研究生,E-mail:ningli@stu.xidian.edu.cn;
张民(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:mzhang@mail.xidian.edu.cn

方法将海面假设成由大尺度和小尺度两种粗糙度构成,通过分别采用适合不同尺寸粗糙度的电磁建模方法来合理评估其对总散射强度的贡献。本文使用改进的双尺度方法来计算大尺寸海面电磁散射,在近垂直入射区域引入基尔霍夫近似(Kirchhoff Approximation, KA)模型[6]对传统的 TSM 进行修正,提高了在近垂直入射区的计算准确性。在本文中,SAR 图像被描绘成被分割的小面元的个体的回波的叠加。这就需要通过对海面局部区域进行合理近似,将电大尺寸海面分割成许多与雷达成像单元可比拟的微小面元,因此在 SAR 成像仿真中就可以建立针对单个海面面元的瞬时雷达回波模型,即称之为面元散射模型(facet-model)。

目标电磁散射计算方法主要有数值算法和高频近似算法。相对于数值算法,高频近似算法可以在保证一定计算精度的情况下节省很多计算时间。在高频近似算法中,物理光学(Physical Optics, PO)法[7]得到了广泛的应用,而 Rius 等[8]提出了结合图形电磁学(GRaphical Electromagnetic COmputing, GRECO)与物理光学法,利用图形运算卡的强大计算功能,提高了计算效率。但缺乏对海面与目标复合散射耦合场[9-11]的合理预估。而四路径模型[12-13]将目标与粗糙面的耦合散射作用近似为镜像方向上场的相互作用,简化了微起伏粗糙面与目标复合散射的问题,合理有效地对目标与海面的耦合散射场进行了计算,是求解耦合散射场最常用而有效的方法之一。

1　海面面元电磁散射模型

为了得到海面分布特征 SAR 图像,要求海面散射模型必须给出对应各散射面元的散射贡献,就要将海面散射贡献面元化。首先,借助海谱模拟大尺度二维介质海面轮廓,并采用合适的面元表示;然后,利用 facet-model 对各个面元的散射贡献进行计算;最终,假设各面元之间的散射贡献是非相关的,这样总的散射可表示为各个面元散射贡献的叠加。

1.1　海面几何模型

使用 Monte Carlo[14]法对二维介质海面进行几何建模,海面高度起伏 h 在 t 时刻位置 $\boldsymbol{r}=(x,y)$ 处的表达式为:

$$\begin{aligned} h(\boldsymbol{r},t) &= IFFT[A(\boldsymbol{k},t)] \\ &= \sum_{k} A(\boldsymbol{k},t)\exp(\mathrm{j}\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{r}) \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} A(\boldsymbol{k},t) &= \gamma(\boldsymbol{k})\sqrt{S(\boldsymbol{k},\varphi)\delta k_x\delta k_y}\exp(\mathrm{j}\omega t) + \\ &\quad \gamma(-\boldsymbol{k})^{*}\sqrt{S(\boldsymbol{k},\pi-\varphi)\delta k_x\delta k_y}\exp(-\mathrm{j}\omega t) \end{aligned} \tag{2}$$

其中:$IFFT[\cdot]$代表傅里叶逆变换;$\boldsymbol{k}=(k_x,k_y)$表示海浪波数;采样间隔 $\delta k_x=2\pi/L_x$, $\delta k_y=2\pi/L_y$;L_x 和 L_y 是海面长度和宽度;$\gamma(\boldsymbol{k})$是均值是 0,方差是 1 的复高斯随机序列,上标"$*$"表示取共轭;$S(\boldsymbol{k},\varphi)$为二维海谱,选用 Elfouhaily[15]海谱模型。

1.2　面元散射模型

假设平面波入射,单个面元散射几何模型如图 1 所示。$\hat{\boldsymbol{p}}_o$ 是入射波单位极化矢量,$\boldsymbol{k}_i$ 和 $\boldsymbol{k}_s$ 为入射电磁波和散射电磁波,r' 是接收点到面元中心的距离。

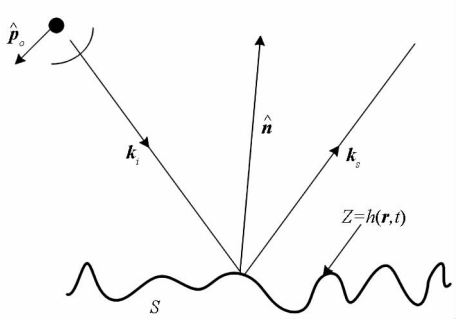


图 1　面元散射几何模型

Fig. 1　Geometry of facet scattering surface

根据 Bass-Fuks 理论[5]可以得到单个面元的 TSM 散射场为:

$$\boldsymbol{E}_{pq}^{\mathrm{TSM}} = \frac{k^2(1-\varepsilon)}{4\pi}\cdot\frac{\mathrm{e}^{\mathrm{j}kr'}}{\mathrm{j}r'}F_{pq}^{\mathrm{pop}}\iint h(\boldsymbol{r},t)\,\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\boldsymbol{q}\cdot\boldsymbol{r}}\mathrm{d}\boldsymbol{r} \tag{3}$$

其中,k 为入射电磁波波数,ε 是海面相对介电常数,$\boldsymbol{q}=k(\hat{\boldsymbol{k}}_s-\hat{\boldsymbol{k}}_i)$,$F_{pq}^{\mathrm{pop}}$为极化因子。

$$\begin{aligned} F_{\mathrm{VV}}^{\mathrm{pop}} &= \frac{1}{\varepsilon}[1+R_v(\theta_i)][1+R_v(\theta_s)]\sin\theta_i\sin\theta_s - \\ &\quad [1-R_v(\theta_i)][1-R_v(\theta_s)]\cos\theta_i\cos\theta_s\cos\phi_s \end{aligned} \tag{4}$$

$$F_{\mathrm{HH}}^{\mathrm{pop}} = [1+R_h(\theta_i)][1+R_h(\theta_s)]\cos\phi_s \tag{5}$$

其中,R_v 和 R_h 分别为垂直极化和水平极化下的菲涅尔反射系数[16],θ_i 和 θ_s 分别为入射角和散射角,ϕ_s 散射方位角。

传统的 TSM 在近垂直入射区的预估值对截断波数具有很强的依赖性,为了提高近垂直入射区的计算精度,引入了 KA 模型对该入射区进行修正,面元 KA 散射场[6]为:

$$\boldsymbol{E}_{pq}^{\mathrm{KA}} = -\mathrm{j}k\frac{\mathrm{e}^{-\mathrm{j}kr'}}{4\pi r'}U_{pq}^{\mathrm{pop}}\iint_S \mathrm{e}^{\mathrm{j}\boldsymbol{q}\cdot\boldsymbol{r}}\mathrm{d}S \tag{6}$$

其中，U_{pq}^{pop} 为基尔霍夫近似模型的极化因子[17]。

将二维介质海面按合理的尺寸划分成不同的单个小面元，近垂直入射区采用 KA 模型计算，其他区域使用 TSM 计算，单个面元散射贡献进行叠加，得出总的散射场为：

$$\boldsymbol{E}_{\text{total}}^{\text{sea}} = \frac{v(\theta_i,\theta_s)}{A}\sum_{p=1}^{M}\sum_{q=1}^{N}[(\boldsymbol{E}_{pq}^{\text{TSM}} + \boldsymbol{E}_{pq}^{\text{KA}})\Delta x\Delta y] \tag{7}$$

其中，$v(\theta_i,\theta_s)$ 是遮挡函数[18]。为了区分大尺度波和毛细波，这里选取截断波数 $k_c = k_o/4$。进而可以得到海面的雷达散射截面。

$$\sigma = \lim_{R\to\infty} 4\pi R^2 \frac{|\boldsymbol{E}_S|^2}{|\boldsymbol{E}_i|^2} \tag{8}$$

对 facet-model 进行验证，计算二维介质海面的后向散射系数，离散点数为 256 × 256，离散间隔为 1 m × 1 m。对于真实海表面，在 4.445 GHz 或更高微波波段，采取 1 m × 1 m 的剖分显然是粗略的，不足以准确描述 1 m × 1 m 面元内海面短波纹理特征。要描述这些微尺度特征，必须采用更精细的几何剖分的方式（至少要到 cm 级），这势必会带来巨大的计算负担，即使采用高频的解析模型，也是难以忍受的。该面元模型就是要在模型中解析地考虑这些短波微尺度波纹对雷达接收器产生的贡献，从而避免采用精细的微尺度剖分。既然微尺度贡献在面元模型中已被计入，在剖分时只需将海表面大尺度轮廓精确描述即可。当然所谓的大尺度对电磁波波长来讲也是相对的，通过大量的仿真和校验发现，在微波波段，海面剖分在 0.5 ~ 2 m 之间（波长较小时，剖分适当加密），均可获得准确的海面 RCS 仿真结果。入射频率为 4.445 GHz，风速为 5 m/s，结果为对 40 个海面样本求平均数，并与实测数据[19]进行对比，如图 2 所示，计算结果在 0° ~ 70° 范围与实测数据吻合较好。图 3 给出了海面后向散射系数随频率变化的结果，入射角为 60°，频率范围 4 GHz 到 14 GHz，从图 3 中可以看出，随着频率增大，后向散射系数先缓慢增大，而后又慢慢下降。

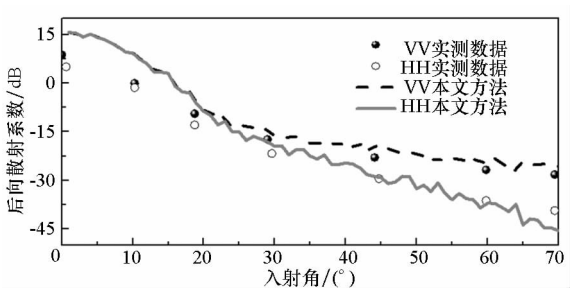


图 2 海面后向散射系数对比

Fig. 2 Comparison monostatic NRCS with experiment data

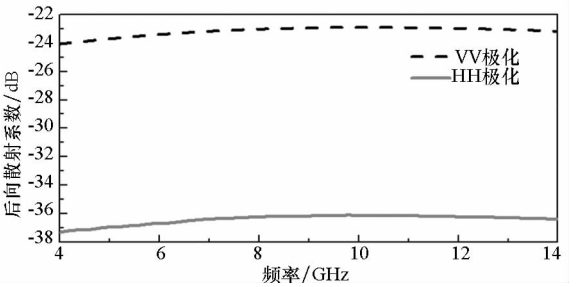


图 3 海面后向散射系数随频率变化结果

Fig. 3 Monostatic NRCS varies with frequencies

2 目标海面复合电磁散射计算

2.1 目标电磁散射计算

利用 GRECO 对目标在高频区电磁散射进行分析。GRECO 利用计算机图形加速卡的强大运算功能，具有可视化、速度快和自动消隐等优点。实现过程为：首先，读取目标模型的剖分文件，利用 OpenGL 函数库自带的三角区域填充函数对所有三角形网格点数据进行处理，即可显示出整个目标模型；然后，设置光照，利用 Phone 光照模型对目标几何模型进行渲染，目标面元的遮挡判断和消隐工作由硬件加速卡自动完成，取代了需要编程由 CPU 计算，提高了计算效率；最后基于高频方法计算各个面元的散射场，并最终得到目标总的散射场。

目标面元散射场使用 PO 方法计算，假设目标表面电流为：

$$J(r') \approx 2\hat{\boldsymbol{n}} \times \boldsymbol{H}_i \tag{9}$$

其中，$\hat{\boldsymbol{n}}$ 为法线单位矢量，$\boldsymbol{H}_i$ 为入射磁场。

根据远场近似及电场积分方程，得到第 i 个面元的物理光学场为：

$$\boldsymbol{E}_i^{\text{PO}} = \frac{\mathrm{j}k}{2\pi}\frac{\exp(-\mathrm{j}kr')\boldsymbol{e}_i}{r'}\hat{\boldsymbol{k}}_s \times [\hat{\boldsymbol{k}}_s \times (\hat{\boldsymbol{n}} \times \boldsymbol{H}_i)] \cdot \exp[\mathrm{j}k(\hat{\boldsymbol{k}}_s - \hat{\boldsymbol{k}}_i)\cdot r']\Delta s_i \tag{10}$$

其中，$\boldsymbol{e}_i$ 为入射电场单位矢量，$\hat{\boldsymbol{k}}_i$ 和 $\hat{\boldsymbol{k}}_s$ 分别为入射波和散射波的波矢量。

利用等效边缘电磁流法对目标棱边的绕射场进行计算。

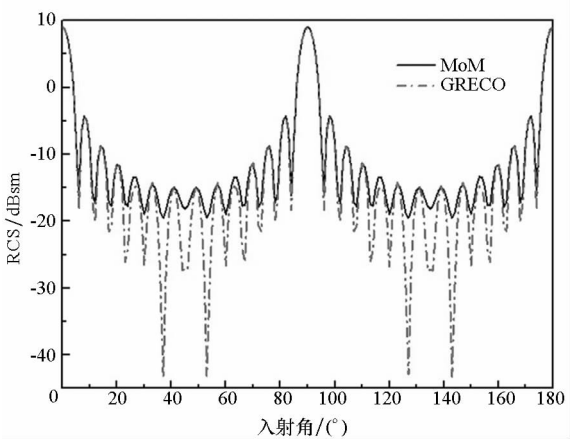
$$\boldsymbol{E}_i^{\text{PTD}} = -\mathrm{j}k\int_e [\eta_0 I(\boldsymbol{r})\,\hat{\boldsymbol{k}}_s \times (\hat{\boldsymbol{k}}_s \times \hat{\boldsymbol{t}}) + M(r)(\hat{\boldsymbol{k}}_s \times \hat{\boldsymbol{t}})]\frac{\exp(\mathrm{j}kr')}{4\pi r'}\mathrm{d}l \tag{11}$$

其中，η_0 是自由空间的特征波阻抗，$\hat{\boldsymbol{t}}$ 为劈边缘切线，I 和 M 分别为等效边缘电流和磁流，$r' = |\boldsymbol{r}_0 - \boldsymbol{r}|$，$\boldsymbol{r}_0$ 为观察点的位置矢量。目标总的散射场包括面元散射场和棱边散射场。

$$\boldsymbol{E}^{\text{target}} = \sum_{i=1}^{N} (\boldsymbol{E}_i^{\text{PO}} + \boldsymbol{E}_i^{\text{PTD}}) \tag{12}$$

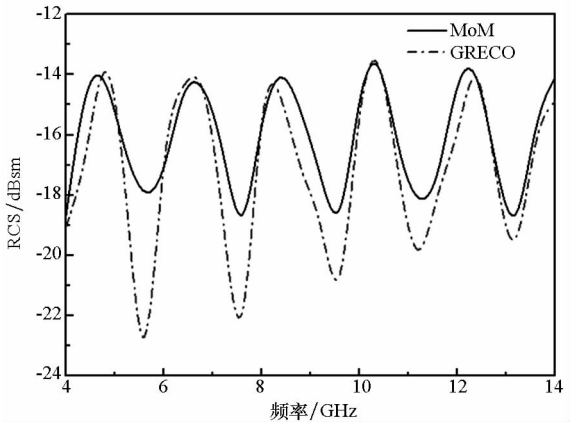
其中 N 为面元个数。

由式(8)可以求得目标 RCS。计算边长为 5 个波长(频率 9.375 GHz)的立方体的后向 RCS 随角度和频率的变化结果,并与矩量法(Moment of Method, MoM)进行对比。随角度变化时,计算频率为 9.375 GHz,入射角从 0°变化到 180°,方位角为 0°;随频率变化时,入射角固定为 60°,方位角为 0°,频率从 4 GHz 变化到 14 GHz,均为 VV 极化,结果如图 4 所示。可以看出两种情况下,GRECO 计算的结果与 MoM 的结果都吻合的比较好。



(a) RCS 随角度变化

(a) RCS varies with incident angles



(b) RCS 随频率变化

(b) RCS varies with frequencies

图 4　立方体后向 RCS 计算结果对比

Fig. 4　Calculation results comparison of monostatic RCS of metal cube

2.2　四路径模型

四路径模型如图 5 所示,其基本思想是将目标与海面之间的耦合散射作用简化为镜像方向上的场的相互作用。路径 1 表示来自目标的单次散射场;路径 2 表示目标散射场经海面反射后的场;路径 3 表示海面反射场经目标散射后的场;路径 4 表示海面反射场经目标散射后再经海面反射后的场。

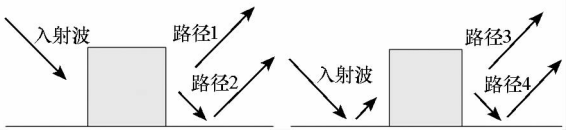


图 5　四路径模型

Fig. 5　Four-path model

耦合场可表示为:

$$\boldsymbol{E}_{\text{couple}} = \boldsymbol{E}_{\text{path2}} + \boldsymbol{E}_{\text{path3}} + \boldsymbol{E}_{\text{path4}} \tag{13}$$

结合镜像方法和一个相关的复反射系数 ρ_r[19] 就可对耦合场进行计算。

$$\boldsymbol{E}^{\text{couple}} = \rho_r \boldsymbol{E}_{\text{obj}}(\hat{\boldsymbol{k}}_i, \hat{\boldsymbol{k}}_s') + \rho_r \boldsymbol{E}_{\text{obj}}(\hat{\boldsymbol{k}}_i', \hat{\boldsymbol{k}}_s) + \rho_r^2 \boldsymbol{E}_{\text{obj}}(\hat{\boldsymbol{k}}_i', \hat{\boldsymbol{k}}_s') \tag{14}$$

其中,$\boldsymbol{E}_{\text{obj}}$代表目标的散射贡献,$\hat{\boldsymbol{k}}_i'$ 和 $\hat{\boldsymbol{k}}_s'$ 分别代表入射方向和散射方向的镜像方向。

根据前面的公式可以得到目标与海面复合散射总场为:

$$\boldsymbol{E}_s^{\text{total}} = \boldsymbol{E}^{\text{sea}} + \boldsymbol{E}^{\text{target}} + \boldsymbol{E}^{\text{couple}} \tag{15}$$

则复合模型的 RCS 为:

$$\sigma = \lim_{R\to\infty} 4\pi R^2 \frac{|\boldsymbol{E}_s^{\text{total}}|^2}{|\boldsymbol{E}_i|^2} \tag{16}$$

舰船-海面复合三维模型如图 6 所示,舰船目标的长宽高分别为 35 m, 7.4 m 和 12 m,海面尺寸为 128 m×128 m。入射频率为 9.375 GHz,海面风速为 1.5 m/s,方位角为 0°,海面剖分尺寸为 1 m,目标剖分尺寸为 $\lambda/8$,计算结果为 20 个样本取平均。RCS 随入射角变化的结果如图 7 所示,单个样本的计算时间为 306.853 s。差场表示总场中减去海面散射场所得的那部分值,可以凸显目标及其与海面之间的相互作用,从图 7 中可以看出,在近垂直入射区,海面的散射贡献占主导地位,随着入射角的增大,差场的值将逐渐占主导地位。

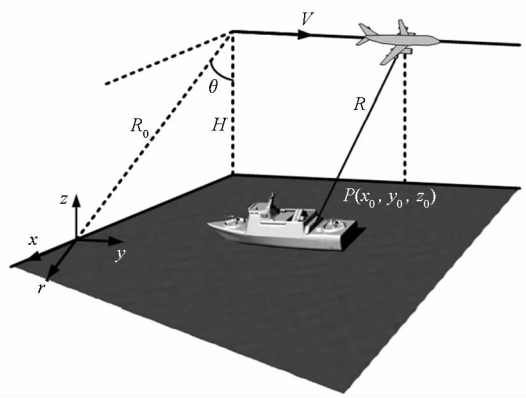
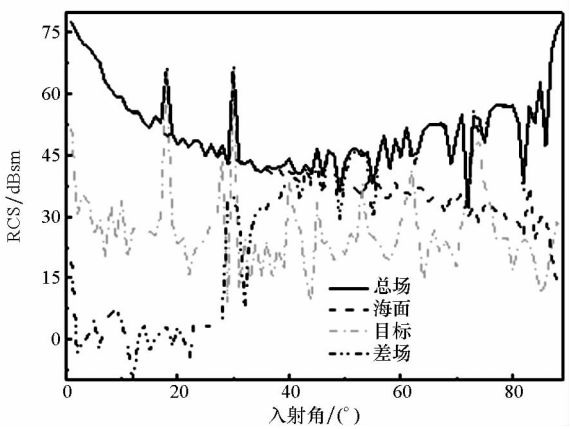


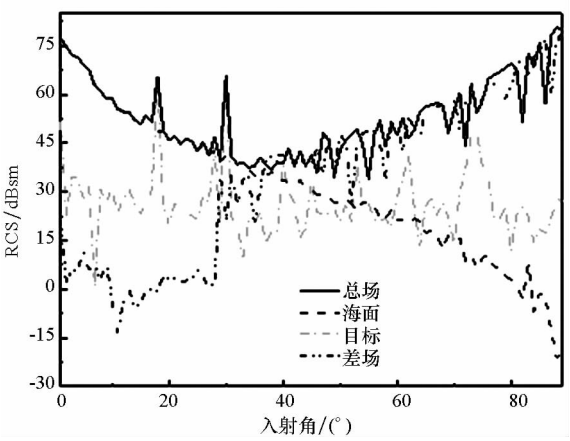
图 6　SAR 成像仿真示意图

Fig. 6　Imaging simulation diagram of SAR



(a) 水平极化

(a) VV polarization



(b) 垂直极化

(b) HH polarization

图 7　舰船 – 海面复合模型后向 RCS

Fig. 7　Monostatic RCS of ship-sea model

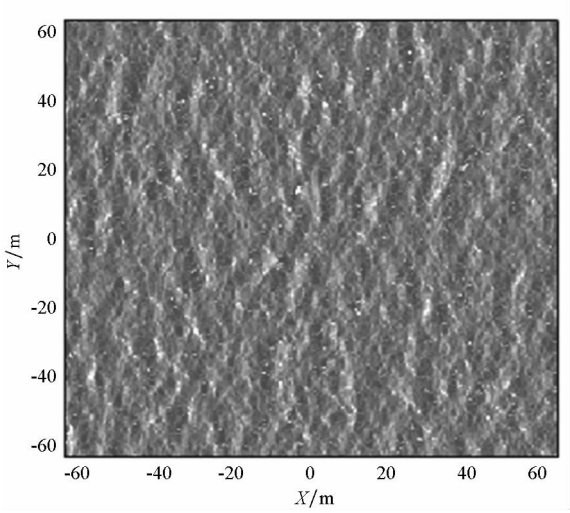
3　SAR 成像应用

SAR 成像因其可以较好地反映海况,波谱等信息而被广泛用于海洋成像,很多理论和系统模型在海洋成像的基础上发展起来。SAR 成像仿真如图 6 所示,SAR 原始回波信号如式(17)所示[20]。

$$s(y',r',t') = \iiint \rho(y,r,t)\exp\{-2\mathrm{j}\alpha_0 r\} \cdot \{g(y'-y,r'-r)\delta(t'-t)\}\,\mathrm{d}y\mathrm{d}r\mathrm{d}t \tag{17}$$

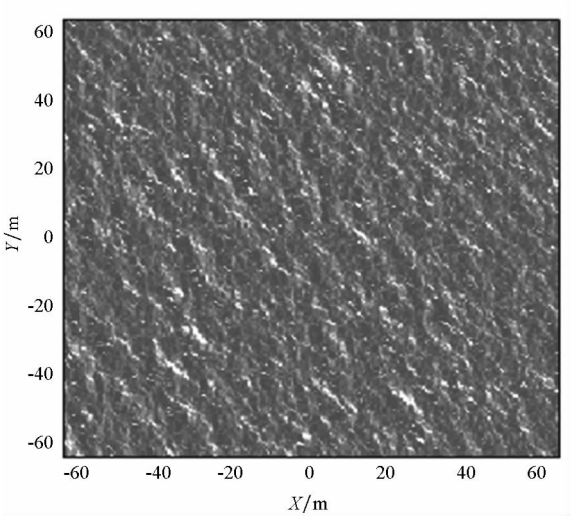
其中:$\alpha_0 = \omega_0\tau/2$,$\omega_0$ 为角频率,τ 为脉冲宽度;$\delta(\cdot)$为狄拉克分布;$\rho(\cdot)$为后向散射函数;$g(\cdot)$为单位响应函数。最终对回波信号利用 R-D算法进行处理,便可得到舰船 – 海面复合模型的高分辨雷达图像。

对二维海面进行 SAR 成像仿真,雷达沿着 x 轴方向,以速度 v 运动,$R/v = 60$ s,入射角为 60°,方位角为 0°,载频为 9.375 GHz,调频宽度 0.2 GHz,海面尺寸为 128 m × 128 m。图 8(a)和图 8(b)分别为风向角为 0°和 45°时,VV 极化的 SAR 图像仿真,风速为 5 m/s。从图 8 中可以看出,海面纹理清晰可见,并且随着风向角的不同产生相应的变化。



(a) 风向角 0°

(a) Wind direction 0°



(b) 风向角 45°

(b) Wind direction 45°

图 8　不同风向角的二维海面 SAR 成像(水平极化)

Fig. 8　SAR image of sea surfaces with different wind direction(VV polarization)

对舰船 – 海面复合场景进行 SAR 成像仿真,如图 9 所示,仿真参数如上所述,风向角为 0°。从 SAR 图像中可以看出舰船的大致轮廓,而且船头、船尾及舰船中部处的天线等精细结构的散射强点可以清晰地反映在图像中,证明该方法是非常有效的。

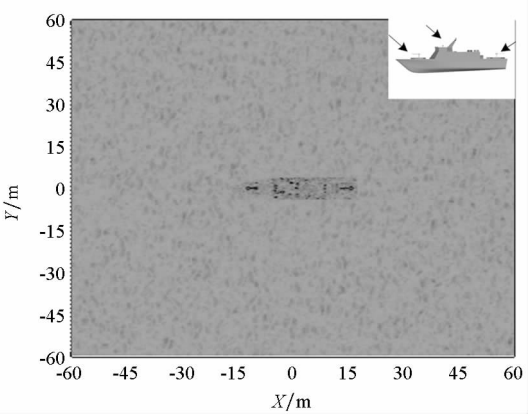


图 9　舰船 – 海面复合场景 SAR 成像

Fig. 9　SAR image of ship-sea model

4　结论

本文提出一种基于 facet-model 和 GRECO 的混合方法,用于研究舰船 – 海面复合电磁散射。对 facet-model 及 GRECO 计算结果分别进行了验证,与实测数据和数值算法结果吻合较好,在此基础上计算了不同极化方式下的舰船 – 海面复合模型的电磁散射 RCS,并对其进行了 SAR 成像仿真,仿真结果验证了算法的可行性和有效性。该方法可以为复杂海洋场景下目标的识别与探测技术提供一定的理论支持。

参考文献(References)

[1] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
BAO Zheng, XING Mengdao, WANG Tong. Radar imaging technology [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005. (in Chinese)

[2] Ausherman D A, Kozma A, Walker J L, et al. Developments in radar imaging[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1984, 20(4): 363 – 400.

[3] Özdemir C. Inverse synthetic aperture radar imaging with MATLAB algorithms[M]. USA: Jone Wiley & Sons, 2011.

[4] Bass F, Fuks I, Kalmykov A, et al. Very high frequency radiowave scattering by a disturbed sea surface part I: scattering from a slightly disturbed boundary [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1968, 16(5): 554 – 559.

[5] Bass F G, Fuks I M. Wave scattering from statistically rough surfaces[M]. UK: Pergamon, 1979: 418 – 442.

[6] Barrick D. Rough surface scattering based on the specular point theory [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1968, 16(4): 449 – 454.

[7] Youssef N N. Radar cross section of complex targets[J]// Proceedings of the IEEE, 1989, 77(5): 722 – 734.

[8] Rius J M, Ferrando M, Jofre L. GRECO: graphical electromagnetic computing for RCS prediction in real time[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 1993, 35(2): 7 – 17.

[9] Chen H, Zhang M, Zhao Y W, et al. An efficient slope-deterministic facet model for SAR imagery simulation of marine scene [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010, 58(11): 3751 – 3756.

[10] Chiu T, Sarabandi K. Electromagnetic scattering interaction between a dielectric cylinder and a slightly rough surface[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1999, 47(5): 902 – 913.

[11] Xu F, Jin Y Q. Bidirectional analytic ray tracing for fast computation of composite scattering from electric-large target over a randomly rough surface [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2009, 57(5): 1495 – 1505.

[12] 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.

[13] Johnson J T. A study of the four-path model for scattering from an object above a half space [J]. Microwave and optical technology letters, 2001, 30(2): 130 – 134.

[14] Mastin G A, Watterberg P A, Mareda J F. Fourier synthesis of ocean [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1987, 7(3): 16 – 23.

[15] Elfouhaily T, Chapron B, Katsaros K, et al. A unified directional spectrum for long and short wind-driven waves[J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(C7): 15781 – 15796.

[16] Fuks I M. Wave diffraction by a rough boundary of an arbitrary plane-layered medium [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2001, 49(4): 630 – 639.

[17] Ulaby F T, Moore R K, Fung A K. Microwave remote sensing[M]. Canada: Addison-Wesley, 1982.

[18] Bourlier C, Berginc G, Saillard J. One-and two-dimensional shadowing functions for any height and slope stationary uncorrelated surface in the monostatic and bistatic configurations [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2002, 50(3): 312 – 324.

[19] Daley J C, Ransone J T, Burkett J A. Radar sea return-JOSS-I[R]. Naval Research Lab, Washington DC, 1971.

[20] Wang Y, Xu X J. On wideband radar signature simulation of ships over sea surface[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(2): 337 – 342.