

极化合成孔径雷达海面成像模拟及分析

郭 丁^{1,2}, 顾行发^{1,2}, 余 涛², Fernando N³, 李 娟², 陈兴峰²

1. 电子科技大学, 四川 成都 610054
2. 遥感科学国家重点实验室, 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101
3. 那不勒斯大学, 意大利 那波里 80133

摘要 海浪极化 SAR 成像模拟对海面散射的研究有重要的意义。基于海浪谱理论, 在考虑大、小尺度海浪影响的基础上, 构建了双尺度的随机粗糙海面。根据该海面模型, 利用 Bragg 散射模型, 小扰动模型与速度聚束理论, 模拟了不同状况下海浪的极化 SAR 图像。并针对海浪参数对极化图像的影响进行了分析, 结果符合成像统计特性, 得出了一些有益于海浪信息提取的结论, 并可以为海洋卫星的设计与海洋研究提供一种行之有效的手段。

关键词 SAR; 极化; 电磁散射; 成像模拟; 海洋表面

中图分类号: O433.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)10-2643-04

引言

海洋是一个复杂的环境, 其监测过程与气象学、气候学密切相关。在这方面, 遥感观测手段可以提供全面的、详细的测量, 尤其是在海洋环境监测和海洋资源勘察方面, 遥感技术的应用更加广泛。在过去的二十多年中, 对海洋的研究和监测采用了越来越多的遥感技术。

主动微波传感器具有全天时、全天候的特点。其中, 合成孔径雷达(SAR)可以在卫星平台上提供高分辨率成像海洋信息。它通常采用单天线来发射和接收雷达信号, 这种成像过程利用了经过海洋表面散射的相干信号, 因此合成孔径雷达图像通常包含乘性噪声^[1]。

海洋的极化 SAR 系统成像机制是相当复杂的, 与海洋的很多物理参数相关, 如海面风速, 涌浪, 风浪, 海浪谱等。目前针对极化 SAR 海面成像仿真处理主要有两种理论: 分布表面模型(DS)^[2]和速度聚束模型(VB)^[3]。DS 模型符合分布式场景中后向散射信号的时变特性, 描述了非线性海浪与粗糙表面电磁散射的相互作用。VB 模型则强调长波海浪运动引起的归一化的雷达后向散射截面(NRCS)图像在方位向上的模糊, 即所谓的速度聚束调制。

在本文中, 提出了一种基于速度聚束理论的 SAR 海洋表面波浪模拟器。该模拟器是在 Matlab 环境和图形用户界

面下开发的。通过图形用户界面, 可以设置传感器的随机参数、海洋场景参数和噪声参数来随机模拟海洋 SAR 图像。

1 成像模拟原理

通常, 星载和机载 SAR 系统的入射角范围在 20°和 70°之间, 因此针对中低纬度的海洋, 作用于其表面的电磁散射符合后向散射机制。根据布拉格散射理论, 当海浪波长和入射电磁波波长相近时能被 SAR 探测。而较大的波长根据振幅和相位调制, 能够被真实孔径雷达(RAR)成像进而通过运动效应而被间接识别^[4]。

RAR 的成像过程是一个线性的过程, 与长波浪场的归一化雷达截面(NRCS) $\bar{\sigma}^{\circ}(\cdot)$ 相关

$$\bar{\sigma}^{\circ}(x_0) = \sigma_{tr}^{\circ} \left\{ 1 + \sum_{l=1}^L |R_{SAR}(K_l)| \cdot z(K_l) \cos(K_l x_0 + \phi_l - \Psi_l) \right\} \quad (1)$$

式中, $|R_{SAR}(K_l)|$ 和 Ψ_l 是 SAR MTF 的模和相位, $z(\cdot)$ 是二维海浪谱, 通过频率和方向的采样函数来描述假设的海洋能量分布, x_0 是海洋参考平面中的方位向坐标, y_0 是距离向坐标, $x_0 = (x_0, y_0)$, K 是长波波数, φ 是均匀分布的随机变量, L 是长波波数。 σ_{tr}° 是根据小扰动模型(SPM)计算出的 NRCS

$$\sigma_{tr}^{\circ} = 8k^4 h^2 \cos^2 \vartheta | \alpha_{tr} |^2 W(K_{Lx} = 2k \sin \vartheta, K_{Ly} = 0) \quad (2)$$

收稿日期: 2010-07-29, 修订日期: 2010-11-26

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2008BAC35B03), 国家(863 计划)项目(2008AA12120142), 中国科学院遥感应用研究所和北京师范大学遥感科学国家重点实验室开放基金项目(08Y01563KZ)资助

作者简介: 郭 丁, 1980 年生, 电子科技大学自动化工程学院博士研究生 e-mail: guoding@263.net

式中, k 是电磁波数, h 是对海洋表面测算出的均方根高度^[5], 是全波频谱的高频部分。 α_{tr} 是发射和接收的极化菲涅尔系数, (t 和 r 分别代表水平与垂直极化方式) 并取决于介电常数 ϵ , 介电常数由 Ellison 模型^[6] 计算得出。 $W(K_x, K_y)$ 是二维海浪谱的布拉格共振波数采样。

海洋 SAR 的调制传递函数是由倾斜调制, 速度聚束和流体力学调制三部分构成

$$R^{SAR}(K) = \frac{j4\cot\vartheta}{1 \pm \sin^2\vartheta} K_y + \frac{j|K|}{\tan\vartheta} \pm 4.5\Omega |K| \frac{\Omega + j\mu}{\Omega^2 + \mu^2} \cos^2\varphi_B \quad (3)$$

其中 j 代表虚部, 正负号分别表示不同的极化方式, φ_B 是值介于长波和布拉格波之间的方位角, μ 是松弛率。

运动效应是 SAR 的固有性质。这是因为 SAR 为了达到较高的方位向分辨率, 记录了在一段时间内散射信号的相位信息。因此, 长波运动造成了径向分量的变化^[7]。轨道速度的径向分量变化引起速度聚束现象, 而轨道加速度的径向分量造成了方位向分辨率的降低。这种现象可通过针对固定场景的相干时间内成像模拟出来。轨道速度 $u_r(\cdot)$ 和距离向的加速度 $a_r(\cdot)$ 如下^[8-10]

$$u_r(x_0) = \sum_{l=1}^L z(K_l) \Omega_l (\sin^2\vartheta \sin^2\phi_l + \cos^2\vartheta)^{1/2} \sin(K_l x_0 + \nu_l) \quad (4)$$

$$a_r(x_0) = - \sum_{l=1}^L z(K_l) \Omega_l^2 (\sin^2\vartheta \sin^2\phi_l + \cos^2\vartheta)^{1/2} \cos(K_l x_0 + \nu_l) \quad (5)$$

SAR 的图像强度 $I(x)$ 与散射系数 $\bar{\sigma}^0(\cdot)$ 之间的关系可以描述为^[9]

$$I(x) = \int \frac{\bar{\sigma}^0(x_0)}{\rho_a^2(x_0)} \delta(y - y_0) \cdot \exp\left\{-\frac{\pi^2}{\rho_a^2(x_0)} \left[x - x_0 - \frac{R}{v} u_r(x_0)\right]^2\right\} dx_0 \quad (6)$$

式中, $x_0 = (x_0, y_0)$ 是 SAR 图像平面的方位向和距离向坐标, R 是 SAR 到探测目标的斜距, v 是平台速度, $\delta(\cdot)$ 是狄拉克 δ 函数。降级的方位向分辨率 $\bar{\rho}_a(\cdot)$ 如下^[11]

$$\bar{\rho}_a(x) = \left\{ \rho_a^2 + \left[\frac{\pi}{2} \frac{TR}{v} a_r(x_0) \right]^2 + \frac{\rho_a^2 T^2}{\tau_s^2} \right\}^{1/2} \quad (7)$$

式中, T 是 SAR 积分时间, τ_s 为场景的相干时间, 而 ρ_a 是静

止目标的单视方位向分辨率。由此, 式(6)可写为^[7]

$$I(x) \approx \frac{\pi^{1/2}}{2} T^2 \rho_a \frac{\bar{\sigma}^0(x_0)}{\left| 1 + \frac{R}{v} \frac{\partial}{\partial x_0} u_r(x_0) \right|} \quad (8)$$

2 结果与讨论

依据原理, 本文针对单色波与真实海浪进行了成像模拟。实验参数设定按照 ERS-1 C-SAR, 见表 1。考虑当前海面为理想状态, 松弛率与表 1 中参数相关。在模拟过程中, 长波前进方向参照风向同时也可被单独设定, 像素大小为二分之一分辨单元。

Table 1 SAR imaging parameters

SAR 参数		噪声参数	
频率/GHz	5.30	基噪/dB	-23
航向/(°)	8	Weibull 分布系数	2
观测角/(°)	20.355		
脉冲宽度/MHz	15.549 9		
平台高度/km	785		
平台速度/(km · s ⁻¹)	6.628		
积分时间/s	0.6		
极化方式	VV		
天线长度 L/m	10		
天线宽度 W/m	1		
		海洋参数	
		海温/°C	15
		盐度/psu	0.035
		风速/(m · s ⁻¹)	10
		Phillips 系数	0.008 1
		峰值扩散因子	1

实验一模拟了一个波长为 60 m、沿方位向传播的单色波。SAR 图像见图 1(a)。为便于分析, 在图 1(a)中作一截面, 如图 1(a)中白线所示, 并查阅了相应的长波。在图 1(a)谱线中, 截取 200 个像素点并考虑移动方向, 可从图中看出图像的非线性。印证了速度聚束所产生非线性的效果。若将参数 C 设为 1, 倾斜调制设为 0, 则速度聚束所造成的非线性效果将更加明显。

实验二模拟了波长为 100 m、沿距离向传播的单色波, 图像如图 1(b)。和第一个实验相似, 在 SAR 图像中作一个横截面, 如图 1(b)中右图白线所示, 将参数 C 设置成 0, 可看出速度聚束的影响在线性成像过程中消失, 同时真实孔径雷达的 MTF 也达到最大值。

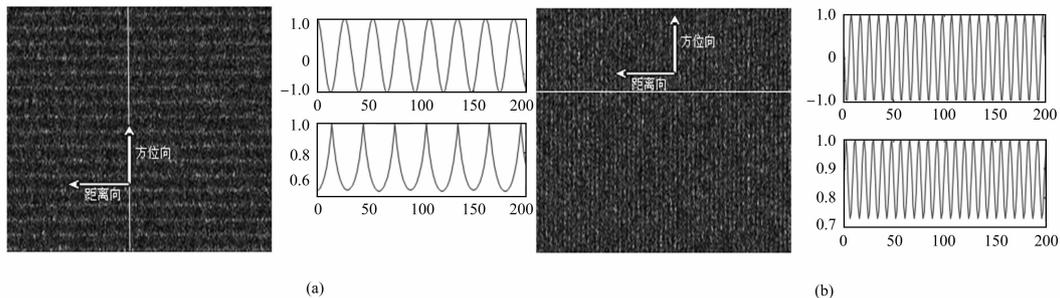


Fig. 1 Experimental results and spectrum analysis

(a): Experiment I; (b): Experiment II

通过对单色波的模拟, 可以发现 RAR 的 MTF 与速度聚束之间的关系是非常紧密的。在下面的模拟实验中, 其输

入参数见表 1。经过充分发展的 JONSWAP 谱的波数接近 60。

实验三模拟了最大波长为 125 m 的方位向传播海浪, 如图 2(a)。像先前的实验一样, 进行分析, 可以看到 SAR 图像的谱能量集中在低波数处^[12]。

实验四模拟了最大波长为 125 m 的距离向传播海浪, 其 SAR 图像如图 2(b)。

在最后的实验中, 将弥散系数设置成 10, 共有 30 个波

数。图 2(c)为波长 100 m 的海浪所对应的 SAR 亮度图像。从上述两幅图中, 我们可以明显地看出其扩散效应。在图 2(c)中, 通过分析参数 C 、最大波长和传播方向, 我们可以看出速度聚束是一个高度的非线性过程, 而在图 2(d)中则是一个线性过程。

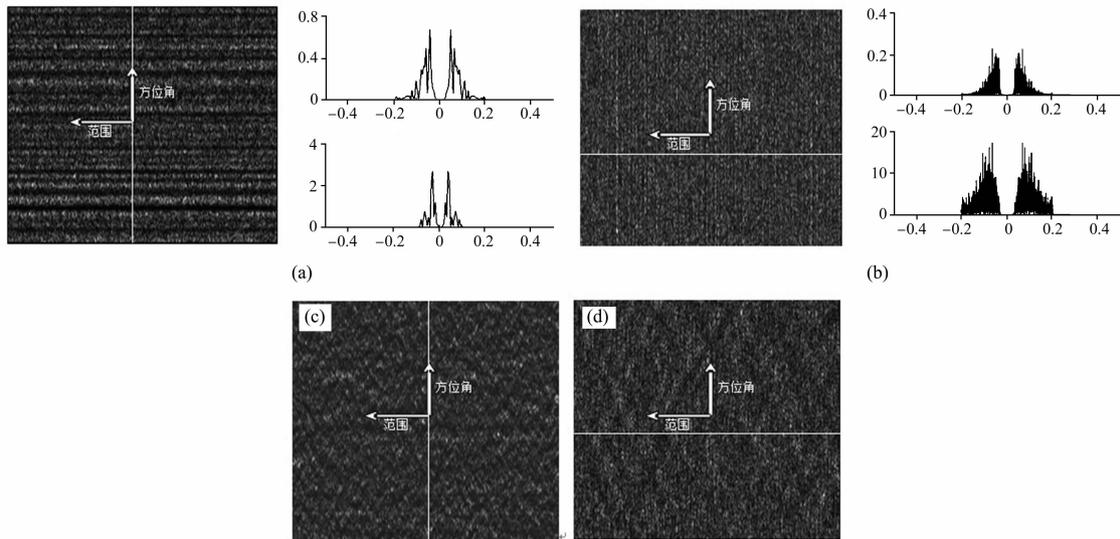


Fig. 2 Experimental results and spectrum analysis

(a): Experiment III; (b): Experiment IV; (c): Experiment V; (d): Experiment VI

3 结论

本文在考虑海洋动力学与电磁散射的基础上, 根据速度聚束模型与 Bragg 散射模型进行了海洋场景的 SAR 成像模拟, 并将该方法的应用条件扩展至二维和倾斜入射的情况。

在模拟过程中, 根据需要输入海浪信息, 输出海浪 SAR 成像信号, 结果证明在考虑海洋的动态性和电磁后向散射模型共同作用下的成像过程是非线性的。成像信号主要依赖于后向散射, 并与速度聚束模型有关, 尤其是成像的非线性性, 是由平台及海面运动速度和非线性的流体动力学的调制

共同引起。对于后向散射模型, 有多种原因会使其非线性化: 如速度聚束调制、海浪毛细波电磁散射的影响等^[13,14]。

为了模拟真实情况, 我们做了一系列的模拟实验。统计结果体现了模拟器的正确性, 因为海洋波浪属性在仿真模型中根据输入参数确定, 并非在输出图像中人为添加, 因此在结果中速度聚束效应体现的既真实又比较直观。这意味着海表浪场分布在初始阶段就应考虑, 而不在成像时再引入系统, 可见小尺度短波对海洋 SAR 成像的重要性。

在后继工作中, 将建立包含更多卫星参数与海洋内波、海底地形在内的典型数据集, 同时考虑和海面特定目标相结合, 以进行复杂真实场景的 SAR 回波模拟和图像仿真工作。

References

- [1] Jackson C R, Apel J R. NOAA, Washington, DC, 2004.
- [2] Harger R O. Radio Science, 1980, 15: 749.
- [3] Alpers W, Ross D, Rufenach C. Journal of Geophysical Research, 1981, 86(7): 6481.
- [4] Brüning C, Alpers W, Hasselmann K. International Journal of. Remote Sensing, 1990, 11(10): 1695.
- [5] Sabia R, Vall-llossera M, Migliaccio M. Proceedings. IGARSS'03, Tolosa (France), 2003, 4: 2786.
- [6] Ellison W, Balana A, Delbos G, et al. Radio Science, 1998, 33(3): 639.
- [7] Alpers W, Rufenach C. IEEE Transaction on Antennas Propagat., 1979, 27(5): 685.
- [8] Bao M, Alpers W. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(3): 922.
- [9] Miles M D, Funke E R. Proceedings OMAE, 1987.
- [10] Yoho P, Long D. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(11): 2692.
- [11] Bucciarelli T, Lombardo P, Oliver C J, et al. Proceedings IGARSS, 1995, 1: 181.
- [12] Alpers W. Imaging Ocean Surface Waves by Synthetic Aperture Radar-A Review" in Satellite Microwave Remote Sensing, Allan T D, Ed. Chichester, U K Ellis Horwood, 1983. 107.

- [13] Hasselmann K, Raney R K, Plant W J, et al. *Journal of Geophysics Research*, 1985, 90: 4659.
- [14] Alpers W. "SAR Imaging of Ocean Waves-A Review", in Proc. IGARSS'92, Houston, TX, 1992. 451.

Simulation of Polarization SAR Imaging of Ocean Surface

GUO Ding^{1,2}, GU Xing-fa^{1,2}, YU Tao², Fernando N³, LI Juan², CHEN Xing-feng²

1. University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China
2. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China
3. Dipartimento Tecnologie, University Napoli, Napoli 80133, Italy

Abstract The polarization synthetic aperture radar (SAR) imaging simulation is of great significance to ocean surface scattering. According to the theory of wind-wave spectrum, rough ocean surface was modeled in the present paper using the two-scale-model. This treatment takes both the large scale and small scale surface into account. By using the velocity bunching (VB) theory, Bragg scattering model and the small perturbation model (SPM), the polarization SAR system can simulate the ocean surface with various parameters and ocean states. The effects of the parameters of ocean waves and the parameters of SAR system were analyzed. Finally, some useful conclusions were drawn, which are helpful for extracting the information of ocean surface. The method is an effective way in the ocean SAR design and the ocean surface research.

Keywords SAR; Polarization; Electromagnetic scattering; Imaging simulation; Ocean surface

(Received Jul. 29, 2010; accepted Nov. 26, 2010)

关于《光谱学与光谱分析》收取审稿费的通知

尊敬的《光谱学与光谱分析》广大作者、读者同志们,本刊自 2006 年底采用由“北京玛格泰克科技发展有限公司”开发的投稿系统实现网络采编以来,进一步扩展了审稿专家队伍。本刊参考同类期刊的现行做法,决定自 2010 年 12 月 1 日以后登记的稿件向投稿作者收取审稿费 100 元/篇,在您投稿之前,为免受经济损失,请您必须考虑:

1. 没有创新的一般性稿件,请您不要投稿。
2. 没有国家级基金资助的稿件,请您不要投稿。
3. 不是光谱专业的稿件,请您不要投稿。
4. 与其他文章重合率超过 10% 的稿件,请您不要投稿。

作者在投稿后,将会收到缴纳审稿费的通知。请作者及时从我刊网站(<http://www.gpxygpfx.com>)查询稿件是否处于交审稿费状态,在收到通知后,请及时缴纳审稿费;如在 10 天之内没有收到您的审稿费,被视为自动放弃,本刊不再受理。汇款时,请写明详细通信地址、邮政编码、收件人姓名等信息,以便准确寄回发票。

汇款方式(在附言里写明审稿费):

邮局汇款:北京市海淀区学院南路 76 号,光谱学与光谱分析期刊社(收)

邮政编码:100081 联系电话:010-62181070, 62182998

电子邮箱: chngpxygpfx@vip.sina.com

感谢您多年来对《光谱学与光谱分析》的支持和厚爱!

《光谱学与光谱分析》期刊社

2010 年 12 月 1 日