

文章编号: 1007-4619 (2001) 03-171-06

基于粗糙海面高度频谱函数的 雷达后向散射系数计算

董 庆^{1,2} 郭华东¹, 王长林¹

(1. 中国科学院 遥感应用研究所遥感信息科学开放研究实验室, 北京 100101;
2. 国家海洋局 海洋技术研究所, 天津 300111)

摘 要: 海面雷达后向散射系数是主动微波遥感量化研究海洋的基础。基于各种海浪谱模式的后向散射系数计算可比性差。鉴于风成粗糙海面的波面斜率呈非 Gaussian 分布的特点, 本文给出依据自由海面的二维高度谱计算海面的雷达后向散射系数, 并与实际 SIR-C/X-SAR 数据进行对比。

关键词: 雷达; 频谱; 海面; 后向散射系数

中图分类号: TP721.2 **文献标识码:** A

1 引 言

随着机载和星载成像雷达在海洋领域的应用展开, 普遍需要在海面的雷达成像过程中引入海面的电磁后向散射模型。海面的雷达后向散射的研究主要依赖于随机粗糙表面的电磁散射模型。随机粗糙表面的电磁散问题已经采用低频和高频近似方法研究过, 并且在 20 世纪 60 年代已经获得一此有用的结果^[1]。之后, 产生了二尺度模型^[2-5], 二尺度模型与实验测量结果吻合得很好。到 20 世纪 80 年代, 二尺度模型逐渐成为较实用的模型。但二尺度模型仍有一个明显的缺陷, 即: 实际随机表面可能没有二尺度的分布。相反, 实际随机表面的粗糙度也许是连续分布的, 尤其是运动的海面。另外, 目前尚没有简单的办法将一个随机表面划分为两个粗糙度的散射表面, 于是便出现了组合表面散射模型。从 20 世纪 70 年代开始到整个 80 年代, 为寻找比二尺度更有效、更为广泛的模型做了很多尝试^[5-10]。20 世纪 80 年代后期, 表面散射增强现象在实验和计算机模型均见报道^[11-13], 这一现象对 rms(方均根)斜率近似均匀和较大 rms 高度的表面尤其明显。计算机模拟复杂表面的电磁散射逐渐取得进展, 通过计算机模拟可以得到复杂表面的平均散射功率和散射系

数。90 年代以来, 随着表面散射模型的继续发展, 面向微波遥感实际问题的研究取得了一些成果^[14-16]。

由于风成粗糙海面的理论研究一部分建立在流体力学方程的基础之上, 在数学上存在大量的困难, 理论研究的结果与实际数据之间存在一定的差距。随着主动微波遥感技术发展而逐渐建立的海面电磁散射模型, 虽然其电磁散射理论部分有严格的辐射传输理论上的数学推导, 但是在具体应用时考虑影响电磁散射方程的关键参数诸如均方差高度、波面斜率的分布及相关长度等的计算时均采用不同的海浪谱模式, 如 Neuman 谱、Pierson-Moskowitz 谱或 Phillips 谱^[17-19]。而现代物理海洋学研究广泛使用的谱方程都是建立在试验数据分析之上的半经验公式和经验参数, 缺乏严谨的数据推导。从这些谱式的多种选择来看, 虽然各模式在使用时讨论了使用条件和其有效范围, 但各模型的结果在相似条件下的可比性差别很大。因此, 基于常规海浪谱的后向散射计算方法有明显的缺陷, 对一些常见的问题不能合理地解决, 如在利用 Hassenmann^[20]的模式作合成孔径雷达(SAR)图像谱转换到海浪谱时碰到这样的问题, SAR 图像密度一维谱表现为双峰, 而一般海浪谱是单峰的, 二者之间并非一一对应关系。

本文从自由海面方程式出发, 对波面高的二维

收稿日期: 2000-04-24; 修订日期: 2000-08-22

基金课题: 国家自然科学基金重点项目“新型成像雷达对地观测机理及地物识别技术”(编号: 49989001)资助项目、国家自然科学基金项目(编号: 4000119)和中国科学院创新项目(编号: 199912A0303)及中国科学院遥感信息科学开放实验室课题资助。http://www.cnki.net

作者简介: 董庆(1965—), 男, 中国科学院遥感应用研究所博士生, 主要从事雷达海洋遥感领域的应用基础研究, 已发表相关论文 9 篇。

频谱进行分解,计算风成海面的相关长度、均方根高度、波面斜率,利用 Huang^[21]和 Wright^[22]的模型直接计算风成海面的后向散射系数,计算结果不依赖海浪谱模式的选择,并与中国南海 SIR-C/X-SAR 数据进行对比分析。

2 粗糙海面高度函数及其频谱的表示

考虑实际海面,建立如图 1(a)所示的坐标系:

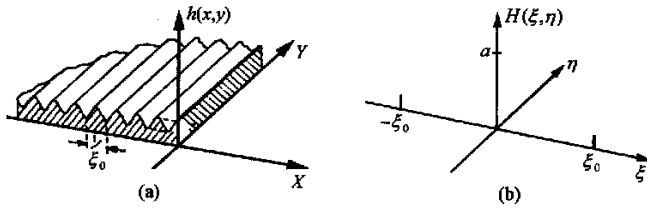


图 1 海面高度坐标系海面高度函数的空间频谱

Fig. 1 The coordinate system and the spatial spectrum of the surface height function of sea surface

$$h(x, y) = f(x)g(y) \quad (2)$$

其中,

$$f(x) = a \cos(kx - \omega t) \quad (3)$$

$$g(y) = 1$$

显然, $h(x, y)$ 是对 x 和 y 可分离变量的二元函数, 则 $h(x, y)$ 的空间频谱 $H(\xi, \eta)$ 也是可分离变量的二元函数 (ξ, η 对应 x, y 坐标见图 1(b)), 利用 Fourier 变换, 可得下式:

$$\begin{aligned} H(\xi, \eta) &= \iint_A h(x, y) \exp[-i2\pi(\xi x + \eta y)] dx dy \\ &= \int_A f(x) \exp(-i2\pi \xi x) dx \\ &\quad \cdot \int_A g(y) \exp(-i2\pi \eta y) dy \\ &= a \int_{RR} \cos(kx - \omega t) \exp(-i2\pi \xi x) dx \\ &\quad \cdot \int_{AR} g(y) \exp(-i2\pi \eta y) dy \end{aligned} \quad (4)$$

其中 A 为雷达分辨单元面积, RR 为距离向分辨率, RA 为方位向分辨率。利用 Fourier 变换, 对积分式利用 Bragg 谐振条件, 以边长为 $\lambda_e/2\sin\theta$ (λ_e 为电磁波长, θ 为倾斜波面的本地入射角) 围成的面积为最小散射单元统计, 作集合平均。实际计算时由于雷达照射方向与海浪的传播方向有夹角 φ , 需要进行坐标旋转, 很多文献中也是这么处理的, 但旋转坐标

使 y -轴平行于海浪波面, x -轴为传播方向, 则任一自由海面的高度 $h(x, y)$ 为:

$$h(x, y) = a \cos(kx - \omega t) \quad (1)$$

式中 a 为振幅, k 为波数, $k=2\pi/\lambda$, ω 为基频, 对深水波, $\omega^2 = gk$, g 为重力加速度, t 为雷达系统的单次脉冲时间。这里注意到式(1)之所以写成二元函数的形式, 是便于下面作二维频谱分析。

为求海面高度的二维频谱, 注意到式(1) $h(x, y)$ 与变量 y 无关, 可以写成下面形式:

后式(4)不一定是可分离变量的, 给计算带来很多不利。本次研究为了保持式(4)的可分离变量特性, 先按式(4)进行计算, 然后再将计算结果转换到雷达坐标系中。

3 波面高度和波面斜率的分布

在对 SAR 成像的模型分析中, 海面的波高分布一般假定为 Gaussian 分布^[15, 19], 在这前提下也得出一些与实验数据相符的结论, 但随着研究的深入, 就发现模型计算与实际不相符的例子^[22]。Huang 从自由海面方程出发, 推导出波面高度和波面斜率的联合概率表达式为^[21]:

$$\begin{aligned} \rho(\xi, \eta) &= \frac{NM}{2\pi} \left[1 - 4\eta\sigma_k + \left(11.5\eta^2 - 4 \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{9M^2\xi^2}{2N^2} \right) \sigma^2 k^2 \right] \exp(-0.5 \left\{ N^2\eta^2 + M^2\xi^2 \right. \\ &\quad \left. - [2\eta N^2(\eta^2 - 1) - 4\eta\xi^2 M^2] \sigma_k \right. \\ &\quad \left. + \sigma^2 k^2 \left[N^2 \left(4.125\eta^4 - 6\eta^2 + 1 \right. \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{9M^2}{4N^2} \eta^2 \xi^2 \right) + M^2(9.125\eta^2 \xi^2 \right. \\ &\quad \left. \left. \left. - 4\xi^2 + \frac{9M^2}{4N^2} \xi^4 \right] \right\} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $N = (1 + 8\pi^2 s^2)^{1/2}$, $M = (1 + 16\pi^2 s^2)^{1/2}$, $\sigma_k = 2\pi s$, σ 为海面高度标准离差, s 为有效波面斜率, k 为波数。

数值计算结果显示,只有当有效波面斜率 $s=0$ 时,亦即只有在小振幅波时,波面高度的分布符合 Gaussian 型;并且随着 s 的增大,也就是当海浪向高海况发展时,波面高度愈来愈不符合 Gaussian 分布,但仍关于波面延长线对称。如图 2 给出了当有效波

面斜率见图 2(a) $s=0$ 和 $s=0.056$ 见图 2(b) 时波面高度随 y -轴和 x -轴方向波面斜率变化的二维等值线和三维图。可以看出,在雷达后向散射分析时,对波面高度作 Gaussian 分布假设是不完全合理的。

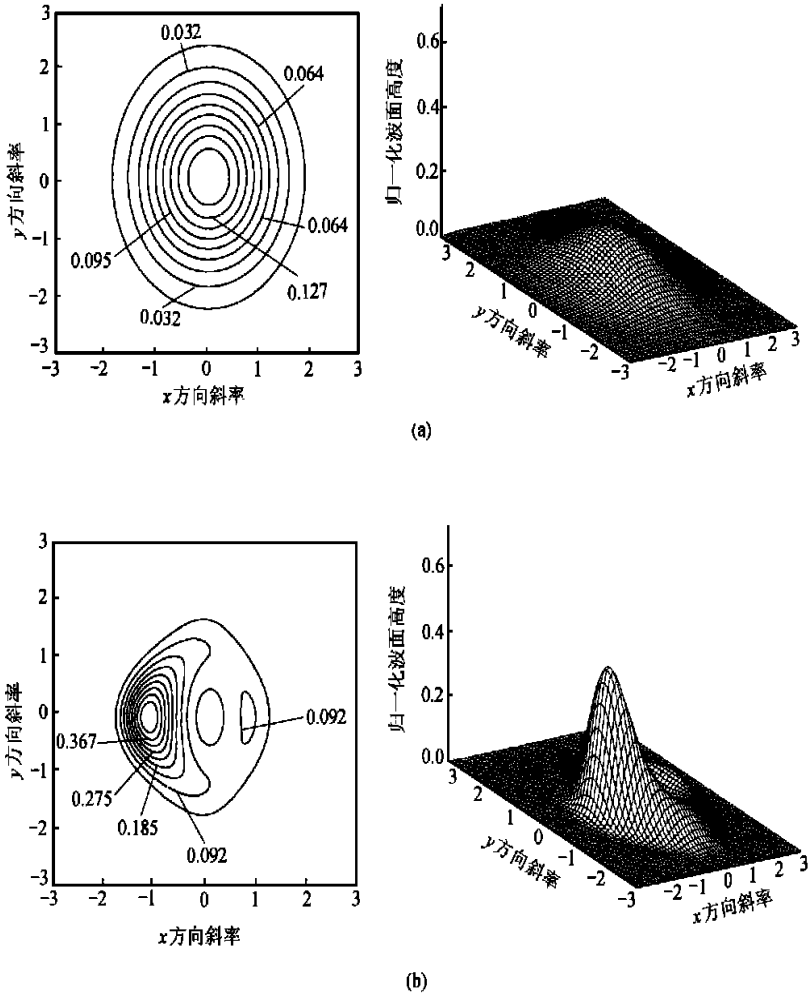


图 2 $s=0$ 时归一化海面高度分布(a)和 $s=0.056$ 时归一化海面高度(b)
Fig. 2 Normalized elevation of sea surface with $s=0$ (a) and $s=0.056$ (b)

4 后向散射系数的计算

海面散射理论研究过程中,流体力学参数进入后向散射调制方程有两种方式,一是通过波高或波面斜率的分布函数^[15,18],二是通过二维波高或波面斜率的 Fourier 变换^[23],本文利用后者,即式(4)的计算结果。

根据电磁散射的微扰模型, Wright 给出一阶后向散射系数为^[2]:

$$\sigma^0(\theta)_{ij} = 4\pi k_e^4 \cos^4 \theta |g_{ij}(\theta)|^2 W(2k_e \sin \theta, 0) \quad (6)$$

式中: i, j 代表系统发射和接收的极化方式; k_e 为电磁波波数。本地入射角用 $\theta + \tan^{-1}(\xi/\eta)$ 代替 θ , 它表示入射平面上具倾斜为 ξ/η 的小散射面所在的本地入射角, ξ 和 η 的关系由式(5)确定, $W(2k_e \sin \theta, 0)$ 用式(4)的结果代替。 $g_{ij}(\theta)$ 为反射系数,与入射角和海水的相对介电常数 ϵ_r 有关,由下式计算

$$g_{hh}(\theta) = \frac{\epsilon_r - 1}{[\cos \theta + (\epsilon_r - \sin^2 \theta)^{1/2}]^2} \quad (\text{水平极化})$$

$$g_w(\theta) = \frac{(\epsilon_r - 1)[\epsilon_r(1 + \sin^2\theta) - \sin^2\theta]}{[\epsilon_r \cos\theta + (\epsilon_r - \sin^2\theta)^{1/2}]^2}$$

(垂直极化)

其中的 ϵ_r 采用 Ulaby 等^[24]使用的 Debye 公式计算, ϵ_r 主要与海水的盐度和温度有关。计算时盐度采用全球平均值 32.54‰, 温度为 28℃*, 则对应 SIR-C/X-SAR 的 L 波段 (1.249 Hz)、C 波段 (5.298 Hz) 和 X 波段 (9.6 Hz) 的 ϵ_r 值分别为: 70.37 - i69.60, 66.81 - i33.17 和 59.61 - i34.37; i 为单位虚数。其它相关参数采用 SIR-C/X-SAR 与 1994 年 4

月 18 日在南海海面(中心坐标为北纬 17°12'24", 东经 108°24'30")成像时的天气和海况实时资料*, 海面风力 3 级, 风向近东, 浪高约 1.0 m, 有 1.5 m 涌浪, 周期 5-7 Hz。如图 3 为根据上述方法选取实际参数计算得到的后向散射系数理论曲线, 与 SIR-C/X-SAR 在该海区获得的实际数据是一致的。相同海况条件下 X-波段的后向散射系数要大于其它两个波段; 而同一波段, 垂直极化相同海况条件下的后向散射系数要大于水平极化。

图 4 为实际南海内波海面的 C 和 L 波段后向散

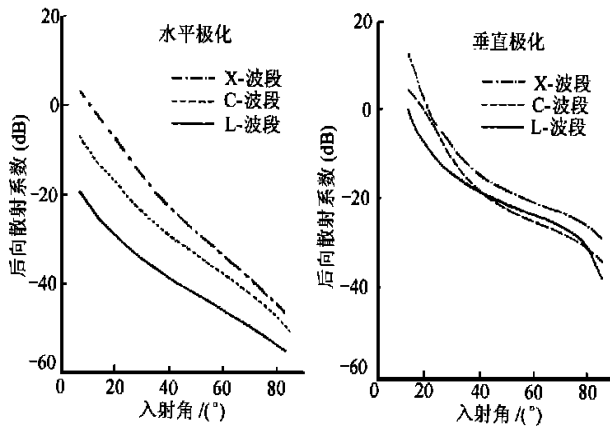


图 3 后向散射系数与入射角的关系曲线

Fig. 3 Backscattering coefficient plots vs incident angle

射系数在空间的变化曲线, 横轴为像元距离。本次研究的 SIR-C/X-SAR 图像为单视图图像, 距离向和方位向每一像元都代表空间 12.5 m。由于 X-SAR 只

有 VV 图像, 不便于为比, 故曲线中未包含。可以看出, 实际海面的后向散射与理论曲线还是很符合的。该曲线穿切内波中心, 曲线上跨距大的起伏为内波

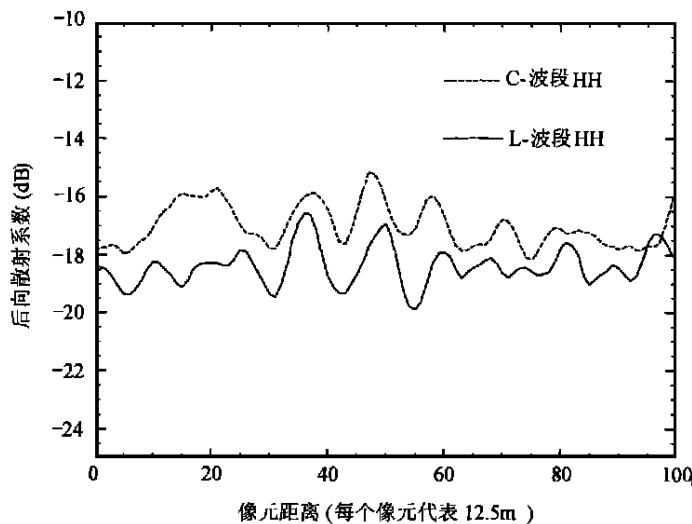


图 4 南海内波海面的后向散射系数随距离的变化曲线

Fig. 4 Plots of backscatter coefficients of internal wave in South-China Sea

* 据国家海洋预报中心预报资料。

所在的区域。C 和 L 波段对两类波都有反映,但 C 波段对内波的反映优于 L 波段。

从上面的计算结果对比可以看出,直接从自由海面方程的二维频谱计算雷达后向散射系数是有效的,其结果不依赖于海浪谱模式的选择,结果具有较好的可对比性,便于相似条件下的海面后向散射特性的对比。但本次计算未考虑风向,风向与海浪的传播方向是有定量关系的,在今后的研究中应予以考虑。

5 结论与讨论

从上面的计算结果对比可以得出以下结论:(1)海面高度只有在非常低海况时(即海面非常平静)才满足 Gaussian 分布,后向散射模型计算时海面粗糙度谱 $W(2k_e \sin \theta, 0)$ 在选择解析形式时利用 Gaussian 分布的假设作前提对多数海况是不适宜的;(2)直接从自由海面方程的二维频谱计算雷达后向散射系数是有效的,其结果不依赖于海浪谱模式的选择,结果具有较好的可对比性,便于相似条件下的海面后向散射特性的对比。但本次计算未考虑风向,风向与海浪的传播方向是有定量关系的,在用 SAR 图像反演风向时,式(5)得出的波面高度的非对称性可以作为消除风向 180° 模糊的潜在方法,今后的研究中应予以考虑。

参 考 文 献 (References)

- [1] Barrick D E. Rough surface scattering based on the specular point theory [J]. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 1968, AP-16(4): 449—454.
- [2] Wright J W. A new model for sea clutter [J]. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 1968, AP-16(2): 217—223.
- [3] Valenzuela G R. Depolarization of EM waves by slightly rough surfaces [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1967, AP-15(4): 552—557.
- [4] Wu J. Sea surface slope and equilibrium wind wave spectra, The physics of fluids, 1972, 15(5): 741—747.
- [5] Brown G S. The average impulse response of a rough surface and its applications [J]. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 1977, AP-25(1): 67—74.
- [6] DeSanto J A. Scattering from random rough surface diagram method for elastic media [J]. *Journal of Mathematical Physics*, 1974, (34)(3): 283—388.
- [7] Chaudhry A H, Richard K Moore. Tower-based backscatter measurements of the sea [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1984, OE-9(5): 309—316.
- [8] Bahar E. Scattering cross sections for composite surface with large mean square slopes—full wave analysis [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1982, 3(3): 327—337.
- [9] Bahar E and Fitzwater M A. Comparison of backscatter cross sections for composite rough surfaces with different mean square slopes [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1984, 5(2): 451—462.
- [10] Fung A K, Pan G W. A scattering model for perfectly conducting random surface: I. Model development [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1987, 8(11): 1579—1593.
- [11] Maradudin A A, Mendez E R, and Michel T. Backscattering effects in the elastic scattering of polarized light from a large-amplitude random metallic grating [J]. *Optical letters*, 1989, 14(1): 151.
- [12] Gu Z H, Dummer R S, Maradudin A A. Experimental study of the opposition effect in the scattering of light from a randomly rough metal surface [J]. *Applied Optics*, 1989, (28)(4): 537—543.
- [13] Macklin J T and Cordey R A. Ocean wave imaging by synthetic aperture radar: results from the SIR-B experiment in the N. E. Atlantic [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1989, 27(1): 28—35.
- [14] Long D G, Collyer R S, Reed R and Arnold D V. Dependence of the normalized radar cross section of water waves on Bragg wavelength—wind speed sensitivity [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(3): 656—666.
- [15] Lyzenga D R, and Ericson E A. Numerical Calculations of Radar Scattering from Sharply Peaked Ocean Waves [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(2): 636—646.
- [16] Johnson J T, Shin R T, Kong J A, Tsang L and Pak K. A numerical study of the composite surface model for ocean backscattering [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(1): 72—83.
- [17] Hasselmann K and Hasselmann S. On the nonlinear mapping of an ocean wave spectrum into a synthetic aperture radar image spectrum and its inversion [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1991, 96(C6): 10,713—10,729.
- [18] Holliday D, ST-Cyr G and Woods N E. A radar ocean imaging model for small to moderate incidence angles [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, 7(12): 1809—1834.
- [19] Larson T R, Moskowitz, L I, Wright T W. A note on SAR imagery of the ocean [J]. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 1976, AP-24(3): 393—394.
- [20] Hasselmann K, Raney R K, Plant W J et al. Theory of synthetic aperture radar ocean imaging: a MARSEN view [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1985, 90(C3): 4659—4686.
- [21] Huang N E, S R Long, L F Bliven, et al. The non-Gaussian joint probability density function of slope and elevation for a nonlinear gravity wave field [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1984, 89(C2): 1961—1972.
- [22] Mcleish W, Ross D, Shuchman R A, et al. Synthetic aperture radar imaging of ocean waves; comparison with wave measurements [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1980, 85(C9): 5003—5011.
- [23] Fung A K. Microwave scattering and emission models and their application [M]. Artech House, 1995, 305—338.
- [24] Ulaby F T, Moore R K and Fung A K. Microwave remote sensing

Radar Backscattering Coefficient Calculation Based on Spectrum Function of Sea Surface Elevation

DONG Qing^{1,2}, GUO Hua-dong¹, WANG Chang-lin¹

(1. Lab of Remote Sensing Information Science, Institute of Remote Sensing Application, CAS, Beijing 100101, China;

2. Institute of Ocean Technology, State Ocean Administration, Tianjin 300111, China)

Abstract: Backscattering coefficients play an important role in active microwave remote sensing applications in oceanography. In general, the backscattering coefficients can be calculated from scatter models. But the results are different from the choice of ocean wave spectra that there exist some different forms under some similar wind conditions. Additionally, the models are due to the Gaussian distribution of sea surface elevation, which exists only within very low wind condition. Thus model predictions are not faithful reproductions of radar cross section very often. The paper presents a method to calculate the backscattering coefficients with the use of two dimensional spectrum function of sea surface elevation with the prediction of non-Gaussian distribution of the elevation and slope of wave surface. This method does not use a single wave spectrum. The results are comparable with SIR-C/X-SAR data of South-China sea.

Key words: radar; spectrum function; sea surface; backscattering coefficients