

文章编号: 1007-4619 (2002)06-0435-05

内波海面海浪等效谱与 SAR 内波图像模型的关系

董 庆^{1,2}, 郭华东¹, 周成虎², 王长林¹, 李 震¹, 邵 芸¹

(1. 中国科学院 遥感应用研究所遥感信息科学重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101)

摘 要: 内波海面的电磁计算模型一般把流体力学-电磁波模型简单处理并与 SAR 图像模式相结合。根据电磁散射模型的计算要求, 提出了一个等效的海浪谱模式, 并用在电磁散射的计算, 最后, 用 SIR-C/X-SAR 在中国南海海面的内波表面图像进行了对比, 对 L-和 X-波段具有很好的计算结果。

关键词: 内波; SAR 图像; 后向散射

中图分类号: TP722.6/P71 **文献标识码:** A

1 引 言

海洋内波在 SAR 图像上可视是由于表面粗糙度的变化, 这种粗糙度的变化又是与由内波导致的表面流有关的, 表面流的变化与流经水下地形因子的海面变化有类似的情况, 因此对海面粗糙度和与内波有关的雷达后向散射的变化的建模与浅水水下地形的建模的原理基本一致。对这类问题已有一些处理方法, 如: Lyzenga^[1], Alpers 和 Hennings^[2], Alpers^[3], Thompson 和 Gasparovic^[4]用波作用平衡方程计算波谱密度中的各变化量, 把简单 Bragg 散射模型与波浪谱的扰动项与雷达散射截面积 SAR 图像密度结合起来, 形成内波海面的流体力学-电磁波模型的 SAR 图像模型。

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 谱等。这些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。从海浪谱模式的多种选择来看, 虽

然各模式在使用时讨论了使用条件和各自的有效范围, 但各模型的结果在相似条件下的可比性差别很大。因此, 基于这些海浪谱模式的雷达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的解决, 如在利用 Hassenmann 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。这表明, 海面的电磁散射的正演和反演问题都不存在惟一的对应解的问题。尤其是面向未来全(多)极化、多波段、多工作模式的 SAR 提供的数据, 物理海洋的雷达定量遥感对海面后向散射的计算要求更高, 寻找适合海面电磁散射定量计算分析的海浪谱模式显得十分重要。同时, 寻找适合海面电磁散射定量计算分析的海浪谱模式进行海面的电磁散射的计算对于主动微波遥感领域的高度计、散射计和激光雷达的应用也有很大参考价值。

海浪是振幅不等、相位杂乱、周期、波长和波向分散的波动, 它的发生是随机的, 形状是极不规则的。海浪的研究以海浪谱为基础, 有 Newmann 谱、Pierson-Moscowitz 谱、Jonswap 谱, 这三种谱为深水情况下的能量谱, 此外, 还有 Philips 谱形式。对浅水波, 波兰、日本学者提出过无因次谱。在电磁计算中还有常用的 Longuet-Higgins 方向谱。对于以上这几

收稿日期: 2002-05-01; 修订日期: 2002-06-01

基金项目: 国家自然科学基金项目 49989001, 40001015, 中国科学院遥感应用研究所遥感信息科学重点实验室项目 SK010005, 中科院创新项目 KZCK2-312, KZCX2-303 联合资助项目。

作者简介: 董庆(1965—), 男, 2000年于中国科学院遥感应用研究所获博士学位, 现在中国科学院资源与环境信息系统国家重点实验室进行博士后研究工作。主要从事微波遥感的应用基础研究, 已发表论文 10 余篇。

个海浪谱模式,目前还没有哪个能直接用于电磁波后向散射模型的计算中,也没有证据表明哪个模式更适合于电磁波后向散射模型的计算。

电磁散射二尺度混合模型研究发现,Bragg 模式阐明长波倾斜作用产生扰动成分,但对遵守高斯统计规律的海面二尺度模型把表面被看作由两个统计上独立的成分组成,大尺度的成分由小于某波数的波高谱组成;而小尺度成分由剩余的谱成分描述。分离波数的选择依据是小尺度结构满足扰动分析有效的要求的。对当前的各种海浪谱模式,它们都是非线性的解析式,因此对多波段雷达而言,海面二尺度的分离波数的选择依据需要进一步研究。本文根据电磁散射模型的计算要求,分析了一个等效的海浪谱模式在电磁散射的应用效果。

2 内波海面流体力学模型

解译 SAR 图像要求有波浪的振幅的空间变化理论,这样一个方程很难用能量和物质平衡方程推导,但是,假设存在围绕一个给定波数的连续谱,则可以导出有力的近似理论用于描述这组谱的时间和空间变化,该理论称为作用守恒定理,表示为一个波群 E 的能量,通过流体传播波长随流速 U 的变化,用群速矢量 C_g 把水深等参数结合起来。固有频率 ω 和波数 k 通过弥散关系相联系。

对内波海面,计算时假定:流速独立于空间坐标的选择或者说流向近似直线的,流体力学方程看作一阶偏微分方程, x, y, t, k_x 和 k_y 为独立变量,降低模型中方程的维数,内波海面的流体力学方程表达式为:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + (u + C_{gx}) \frac{\partial A}{\partial x} + (v + C_{gy}) \frac{\partial A}{\partial y} - (k_x \frac{\partial u}{\partial x} + k_y \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial \omega}{\partial x}) \frac{\partial A}{\partial k_x} - (k_x \frac{\partial u}{\partial y} + k_y \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial y}) \frac{\partial A}{\partial k_y} = 0 \quad (1)$$

$A(x, y, t, k_x, k_y)$ 表示固定波数和固定坐标系的动能。

假定波长与水深相比很小;结果,包含(1)式中 ω 的偏微分假设为零,定义波数模 k 和角 ϕ 为:

$$k = (k_x^2 + k_y^2)^{1/2} \quad \phi = \tan^{-1}(\frac{k_y}{k_x}) \quad (2)$$

(1)式可写作:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + (u + C_{gx}) \frac{\partial A}{\partial x} + (v + C_{gy}) \frac{\partial A}{\partial y} + [- \cos^2 \phi \frac{\partial u}{\partial x} - \cos \phi \sin \phi (\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y})]$$

$$- \sin^2 \phi \frac{\partial A}{\partial y}] \frac{\partial A}{\partial (\ln k)} \quad (3)$$

$$+ [- \cos^2 \phi \frac{\partial u}{\partial y} - \cos \phi \sin \phi (\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial x}) + \sin^2 \phi \frac{\partial v}{\partial x}] \frac{\partial A}{\partial \phi} = 0$$

对从风中接收到的能量与通过弥散损失的能量的短波浪,(3)式的左边可以用源函数代替,这里假定具有以下形式^[5]:

$$- \beta \frac{A}{A_0} (A - A_0) \quad (4)$$

这是 β 为波生长的松弛系数, A_0 为等效谱密度,对 β 根据 Plant(1982)的生长参数可得到:

$$\beta = 0.04 (\frac{u_*}{c})^2 \omega | \cos(\phi - \phi_w) | \quad (5)$$

这是 u_* 为磨擦风速, $c = \omega/k$ 为相速度, ϕ_w 为风向,计算时假定在坐标系内流速稳定,所以有:

$$\frac{\partial A}{\partial t} = - U_d \frac{\partial A}{\partial x} - V_d \frac{\partial A}{\partial y} \quad (6)$$

这里, U_d 和 V_d 分别为内波传播速度的分量。

(3)要求的边界条件是把 x, y, k_x 和 k_y 的范围限制在方程可以预测的波数之内,在空间域内,模型把作用谱密度等效于流入点的本地等效值,在谱域内,其解在从短波到长波浪足够大的范围内(即每个截止波数点可以看作等效值)给出。目前,实际计算程序把范围限制在 1cm 到 5 倍峰值波长之内(内波的外的等效谱之内的);这个宽范围不会影响表达的结果,但是并不增加计算代价。例如,把模型用于 K 波段雷达,则最短波长可降至 1mm,波数的计算间隔可增加到大约 20%,类似地,长波范围对目前的计算是足够的,因为等效谱在 5 倍等效峰值时的波长是很小的。如果模型用于长波涌浪成分时,计算间隔可以扩展到涌浪的波长。

3 电磁模型

粗糙表面的电磁散射二尺度混合模型从 60 年代来就有一些研究者进行探索。Wright^[6] 试图用散射模型来解译入射角和极化的独立于海面的雷达散射截面,Wright 使用的模型启发性推导包括了 Bragg 模式或者由于长波倾斜作用产生的扰动理论分量,该模型能包括镜面反射或者说物理光学分量。对中等入射角下的垂直极化而言 Wright 得到的模型结果并不明显不同于单纯的 Bragg 模型结果。包括大尺度倾斜作用的扩展模型改进了 L-波段(1228MHz)在大入射角水平极化情况下的雷达散射截面的预测

值,但有同样条件下对 X-波段(89.0MHz)雷达散射截面却不能预测,Wright^[6]于是得出结论:可能一阶散射理论对水平极化 X-波段的雷达散射截面是不精确的。

对服从高斯统计规律的表面二尺度模型更为严格的推导由 Brown^[7]给出,在 Brown 的推导中,表面被看作由两个统计上独立的成分组成,大尺度的成分由小于 k_d 的波数的波高谱组成;而小尺度成分由剩余的谱成分描述。分离波数 k_d 的选择依据是小尺度结构满足扰动分析有效的要求,即: $4k_0^2\xi_x^2 \ll 1$, 这里 k_0 为电磁波波数, ξ_x^2 为小尺度结构的均方差高度。雷达散射截面也被分为两部分,第一部分为大尺度结构的物理光学近似结果,第二部分为小尺度结构应用扰动分析的结果,对 k^{-4} 谱,第一项当入射角小于 15° 时为主导项,第二项当入射角大于 20° 时为主导项,如果分离波数按照 $4k_0^2\xi_x^2 \approx 0.1$ 选择的话则这两个区域上有一个平滑的过渡。

Brown 的小尺度计算对雷达散射截面的贡献的表达式近似地等价于 Wright^[6]的倾斜 Bragg 模型,此外其结果是按照波数的积分而不是表面倾角计算的,并且小尺度谱密度在表面波数小于 k_d 时合理地设为零,计算中对雷达散射截面的贡献利用下面的积分计算:

$$\sigma_B(\theta, \phi) = 8\pi k_0^4 \iint |G(\theta, \xi_x, \xi_y)|^2 S(2k_0 \sin \theta', \phi) \times p(\xi_x, \xi_y) d\xi_x d\xi_y \quad (7)$$

这里 θ 为入射角, ϕ 为观测方位(雷达视向) ξ_x 为入射平面上的表面倾斜, ξ_y 为正交方向上的表面倾斜, $G(\theta, \xi_x, \xi_y)$ 为依赖于极化的散射系数, $S(k, \phi)$ 为表面高程谱密度, $p(\xi_x, \xi_y)$ 为倾斜概率密度函数,利用 Wright^[6]讨论的小尺度近似,垂直和水平极化的散射系数由下式给出:

$$G_m(\theta, \xi_x, \xi_y) = \frac{(\epsilon - 1)[(\epsilon - 1)\sin^2 \theta' + \epsilon]}{[\epsilon \cos \theta + (\epsilon - \sin^2 \theta')^{1/2}]^2} \cos^2 \theta' \quad (8)$$

$$G_{hh}(\theta, \xi_x, \xi_y) = \frac{(\epsilon - 1)\cos^2 \theta'}{[\cos \theta + (\epsilon - \sin^2 \theta')^{1/2}]^2} + G_{vv} \frac{\xi_y^2}{\sin^2 \theta'} \quad (9)$$

这里 ϵ 为海水的相对介电常数, $\theta' = \theta + \tan^{-1} \xi_x$ 为入射平面上具倾斜为 ξ_x 的小散射面所在的本地入射角。

(7)式中斜率分布函数 $p(\xi_x, \xi_y)$ 和小尺度谱密度 $S(k, \phi)$ 表示的单位面积的雷达散射截面,平均倾斜假设为零,倾斜概率密度函数因此就由均方差

倾斜 $\langle \xi_x^2 \rangle$ 和 $\langle \xi_y^2 \rangle$ 表示,这些平均方差倾斜前述的波流作用模型对小于 k_d 的扰动波数上的积分得到:

$$\langle \xi_x^2 \rangle = \int_0^\pi \int_0^{k_d} k^2 \cos^2 \phi' S(k, \phi') k dk d\phi' \quad (10)$$

$$\langle \xi_y^2 \rangle = \int_0^\pi \int_0^{k_d} k^2 \sin^2 \phi S(k, \phi') k dk d\phi' \quad (11)$$

上撇号表示本地入射角校正后的确坐标系,这里 $S(k, \phi')$ 作用谱密度的关系方程为:

$$S(k, \phi' = \omega[A(k, \phi')] + A(k, \phi' + \pi)) \quad (12)$$

其中 ω 为波频率, ϕ 为相对于雷达视向的波浪传播方向,小尺度谱密度必须在标称 Bragg 波数附近的波数范围内计算

$$k_B = 2k_0 \sin \theta \quad (13)$$

均方根(有效)倾斜:

$$\xi_{rms} = [\langle \xi_x^2 \rangle + \langle \xi_y^2 \rangle]^{1/2},$$

如果海水介电常数 ϵ 不变,则 ξ_{rms} 值的依据不同层次的谱形式有不同的算式,同时对不同的波段,因为相应的分离波数较大也是变化的。雷达截面与海浪谱模式的关系就体现在对 ξ_{rms} 的相异性。

4 SAR 模型

合成孔径雷达系统通过记录回波信号的相位和振幅,并且回波信号经过二次相位变化,因此在飞行方向上有较高的空间分辨率,这使得诸如内波这样的特征能在很长距离由能够成像。但是由于海面的运动而造成的信号中相位的变化对 SAR 图像有重要影响,按照 Hasselmann 等^[8]研究的理论,表面运动影响可用平均图像脉冲函数描述,该函数与归一化 Doppler 表面反射谱有关。如果反射率具有时间独立性,则脉冲函数等于天线增益方向图的 Fourier 变换,由此产生标称分辨率: $\rho_x = \frac{\lambda R}{2VT}$, 这里 λ 为雷达波长, T 为积分时间, R 为从 SAR 平台到散射面的斜距, V 为平台速度,注意,对诸如海洋这样的随机表面,脉冲响应函数可以假设具有 Gaussian 形状。整个 SAR 的建模过程可以用来计算雷达截面 σ_0 , 对给出的脉冲响应函数把雷达截面转换成一幅模拟的 SAR 图像,实际成像过程产生许多斑点的图像平均密度,因此在大于或等于标称 SAR 分辨率图像上的每一点都能得到成像。

5 组合模型结果

前述流体力学-电磁学模型结果与实际数据的

比较都没有统一的可比性, Thompson^[9] 提出过基础等效谱由下式给出:

$$A(k, \phi) = \frac{B \exp[-2(k_0/k \cos(\phi - \phi_w))^2]}{\omega[k^2 - 2kk_1 \cos(\phi - \phi_w) + k_0k_1]^2} \quad (14)$$

这里 ϕ_w 为风向, 参数 $B = 0.0013$, $k_0 = 0.59g/u_w^2$, $k_1 = 0.4k$, 该谱近似地等效于风速为 U_w 时的 Pierson-Moskowitz 谱, 这与 Hasselmann 等^[8] 推荐使用的近于谱峰的频率类似, 并对较大 K 接近于半各向同性分布。

对内波海面, 能量往往集中于某一特定频率, 内波波包线的振动频率远远小于风成波面的变化频率。另外海面电磁散射主要与海面粗糙度有关, 而海面粗糙度主要与波高变化相关。基于这种情况, 我们提出如下等效谱:

$$A(k, \phi) = 7.1 \exp[2.38(\phi^2 \cos \frac{k_y}{k_x} - 1.63)] + 0.0036 \phi^{-3} \exp(\phi \cos^2 \frac{k_y}{k_x}) \quad (15)$$

式中的实际计算选在南海海面的内波区, 根据国家海洋预报中心提供的数据, 实验区的海况见表 1, 对应 SIR-C/X-SAR 的三个波段, L 波段(1.294Hz)、C 波段(5.298Hz)和 X 波段(9.6Hz)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。

表 1 试验区内波及风况

Table 1 Wind conditions and internal wave parameters

	最大内波流速	内波宽	内波相速度	风速	风向
	m/s	m	m/s	m/s	deg
海南区 1	0.37	72	0.93	7.8	135
海南区 2	0.38	125	0.67	7.8	135

雷达视向与内波传播方向的夹角在 10°到 43°之间, 按照等效谱(15)实际计算的雷达截面与 SIR-C/X-SAR 的结果进行了比较。结果表明, 在 L 波段, 等效谱模型得到的雷达截面接近于简单 Bragg 模型的结果, 但与实际 SIR-C/X-SAR 相比偏小, 并且随着雷达视向与内波传播方向的夹角的增大, 这种差异迅速增加; 而 X 波段, 雷达视向与内波传播方向的夹角模型得到的雷达截面大于简单 Bragg 模型, 但与实际 SIR-C/X-SAR 相比吻合的相当好, 随雷达视向与内波传播方向的夹角的增大, 吻合得越来越差, 同时接近于 Thompson^[9] 提出过基础等效谱; 在 C-波

段, 等效谱模型得到的雷达截面值有明显的不稳定性, 雷达视向与内波传播方向的夹角在 21°到 30°结果也较吻合。

6 结 论

本文讨论了海洋内波海面的 SAR 成像过程中的流体力学、电磁散射和 SAR 模型, 针对性地提出等效谱, 与已有的等效谱相比减少了参数变量, 更便于应用。最后, 用 SIR-C/X-SAR 在中国南海海面的内波表面图像进行了对比, 对 L-和 X-波段具有很好的数值结果。我们的等效谱模型的结果表明, 长波影响在有些情况下是可以忽略不计的(如低风况、垂直极化、大入射角); 而对中等风况下, 使用 L 波段时, 当雷达视向垂直于内波传播方向时, 这些影响就非常重要。而在 X 在这种情况下, 雷达后向散射可用简单 Bragg 模型计算, 但要考虑雷达视向与内波传播方向的夹角的变化。

参 考 文 献 (References)

- [1] Lyzenga, D. R. and R. A. Shuchman, Analysis of scatterer motion effects in Marsen X band SAR imagery [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1983, **88**(14):9769—9775.
- [2] Alpers W. R. and Clause Brünig, On the relative importance of motion-related contributions to the SAR imaging mechanism of ocean surface waves [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1986, GE-24(6):873—885.
- [3] Alpers, W., Monte Carlo simulations for studying the relationship between ocean wave and synthetic aperture radar image spectra [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1983, **88**(C3):1745—1759.
- [4] Thompson, D. R., R. F. Gasparovic, Intensity modulation in SAR images of internal waves [J]. *Nature*, 1986, **320**(27):345—348.
- [5] Hughes. B. A., J. F. R. Gower, SAR imagery and surface truth comparisons of internal waves in Georgia Strait, British Columbia, Canada [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1983, **88**(C3):1809—1824.
- [6] Wright, J. W., A new model for sea clutter [J]. *IEEE Transactions on antennas and propagation* 1968, AP-16(2):217—223.
- [7] 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.
- [8] Hasselmann, K. and S. Hasselmann, 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):10,173—10,729.
- [9] Thompson, D. R., Calculation of radar backscatter modulations from internal waves [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1988, **93**(C10):12,371—12,380.

Relation Between Ocean Wave Equivalent Spectrum and SAR Image Model

DONG Qing^{1,2}, GUO Hua-dong¹, ZHOU Cheng-hu², WANG Chang-lin¹, LI Zhen¹, SHAO Yun¹

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

2. *National Laboratory of Resources and Environment Information System, CAS, Beijing 100101, China*)

Abstract: The backscattering coefficients calculation is carried out with variable ocean wave spectrum and SAR image models. The results are not comparable with others because of variable spectrum. The present paper gives an equivalent spectrum to calculate the backscattering coefficients calculation of surface of internal wave. Finally, the calculation results are comparable with the SIR-C/X-SAR images of internal wave of South-China Sea.

Key words: internal wave; SAR image; backscattering