

海面微波散射系数的一个工程算法^{*}

徐 丰 贾 复

(中国科学院力学研究所 北京 100080)

摘 要 介绍了一个基于微波散射双尺度模型的散射系数工程计算方法,根据 AAFE^[1] 机载雷达散射计数据,拟合确定了计算公式所需参数。该算法可以反映散射系数迎、顺风不对称性的重要特征。计算的精度和效果与现有的若干方法相比也是令人满意的。

关键词 微波 散射系数 工程计算方法

1 问题的提出

自 1979 年美国 Seasat 装载的微波散射计 SASS 成功运作以来,美国国家宇航局、欧空局及学术界,对于如何从海面微波散射反演海面风场的问题,投入很大的力量,发展出基于 SASS 的 SASS-1^[2]、SASS-2^[3] 算法及对应于 ERS-1 的 CMOD^[4] 工程算法。这些算法根据大量微波散射信号及同步海面实测气象数据,进行统计处理和数学拟合而成。其形式简单,应用方便,是当前气象、水文、环境业务中实际运行的工具。然而由于其纯经验性,不能反映散射过程各物理因素的影响,在实测数据散布较大时,这些模式精度及可靠程度也成问题,正像 Woiceshyn^[5] 对 SASS-1 模式所作的深刻分析与批评那样。与纯经验工程模型相平行发展的物理模型是在散射过程的物理、力学规律基础上建立的,例如双尺度模型^[6]。它们有明确的因果关系及对于电磁波与水波相互作用的力学和物理学刻划。这种模式有助于对散射过程的深入认识。但是建模过程中不得不作的许多简化假设,使得模式的预报精度受到限制。例如在若干重要的双尺度模式中(如 Fung 等^[7]、Donelan 等^[8]、Durdan 等^[9])都没有反映出雷达照射方向迎风与顺风时,散射系数的不对称性,而这一特性常是用来确定风场的重要依据。

本文目的是在双尺度模型框架下,在我们另一论文^[1] 提出的一维水波短波谱形式基础上,给出散射系数对方位角 χ 的三项 Fourier 展开式,而 Fourier 展开式的两个系数则通过与实测散射系数拟合确定,由此而得到一个完整的海面散射系数工程算法。该算法可在一定程度上反映出散射系数迎、顺风不对称性。

• 国家自然科学基金资助项目

收稿日期 1995-02-11

(1) 一个修正的短波谱形式及其在散射截面估计中的应用, 1994

2 工程计算模型

基于 Bragg 共振机制的海面微波散射模型^[6], 可得到下述散射系数的双尺度模型的计算式:

$$\sigma_{pp}^o = \iint_{-\infty}^{\infty} 16\pi k_o^4 \cdot \alpha_{pp} \cdot \Phi(k) \cdot P dz_x dz_y \quad (1)$$

式中, k_o 为电磁波波数; k 为 Bragg 水波波数, 它满足 Bragg 共振关系:

$$k = 2k_o \sin\theta \quad (2)$$

θ 为雷达入射角; Φ 为水波谱在 Bragg 共振水波波数处的谱密度; 积分 z_x 和 z_y 分别为沿 x 和 y 方向的海面坡度; α_{pp} 为极化参量(下标 pp 标识其极化方向, 水平极化记为 HH, 垂直极化记为 VV), 极化参量的计算公式如下^[10]:

$$\alpha_{HH} = \cos^4\theta \left| \frac{\epsilon - 1}{[\cos\theta + (\epsilon - \sin^2\theta)^{1/2}]^2} \right|^2 \quad (3)$$

$$\alpha_{VV} = \cos^4\theta \left| \frac{(\epsilon - 1)[\epsilon(1 + \sin^2\theta) - \sin^2\theta]}{[\epsilon\cos\theta + (\epsilon - \sin^2\theta)^{1/2}]^2} \right|^2 \quad (4)$$

其中 ϵ 为水面介电常数。

在散射系数表达式(1)中, 长波斜率 P 一般均采用 Cox 及 Munk^[11] 的实际测量结果, P 为高斯分布^[7]:

$$P = \frac{1}{2\pi S_u S_c} \cdot \exp\left(-\frac{z_x^2}{S_u^2} - \frac{z_y^2}{S_c^2}\right) \quad (5)$$

式中, $S_u^2 = 3.16 \times 10^{-3} U(10)$, $S_c^2 = 0.03 + 1.92 \times 10^{-3} U(10)$, $U(10)$ 为距水面 10m 高处的风速。

从上述分析来看, 散射计算关键之一就是水波谱高频段结构形式的合理决定。我们曾经根据机载散射计数据^[11] 的分析处理经验, 结合 Banner^[12] 对短波谱结构的研究, 提出了一个适于海面散射工程应用的短波谱形式。

$$\Phi = Ak^{-4} \left(\frac{u_*^2 k}{g_*}\right)^{\nu} f(\varphi) \quad (6)$$

式中, u_* 为摩擦速度, A 为常数, $f(\varphi)$ 表示二维水波谱对风向的依赖关系, g_* 为计及表面张力效应的修正重力加速度, $g_* = g + Tk^2$, 这是根据 Mitsuyasu^[13] 短波谱测量经验引入的, 其中 T 为表面张力密度比。

如前所述, 散射系数在迎、顺风时的不对称是实际观测到的重要特征之一。为能提出一个可计及这种影响的工程计算方法, 我们首先考虑 $\varphi=0$ 情况($f(0)=1$), 将(6)式代入到(1)式中可得到迎风的散射系数计算式:

$$\sigma_{pp}^o = \iint_{-\infty}^{\infty} 16\pi k_o^4 \alpha_{pp} k^{-4} A \left(\frac{k}{g_*}\right)^{\nu} P dz_x dz_y \cdot u_*^{2\nu} \quad (7)$$

将(7)式中的积分记作 F , 对于一般方位角情况下, 我们提出 σ^o 具有以下近似形式:

$$\sigma_{pp}^o = F \cdot u_*^{2\nu} \cdot (1 + b\cos\chi + c\cos 2\chi) / (1 + b + c) \quad (8)$$

式中, χ 为方位角(微波照射与风向夹角)。

剩下的问题就是如何确定上述表达式中的参数 A 、 ν 、 b 及 c 。首先,实际计算结果表明,短波谱表达式中的常数 A 可取为 Pierson—Moskowitz 谱常数, $A=0.04$ 。对于 F 的实际计算表明, F 是 θ 和 k 的函数,仅微弱地依赖于风速,这样我们可方便地根据 σ^0 与海面风速的实测数据拟合参数 ν 、 b 、 c 。以 AAFE RADSCAT⁽¹⁾飞行实验为基础,对于微波 K_u 波段(13.9 GHz)可得到下述拟合结果:

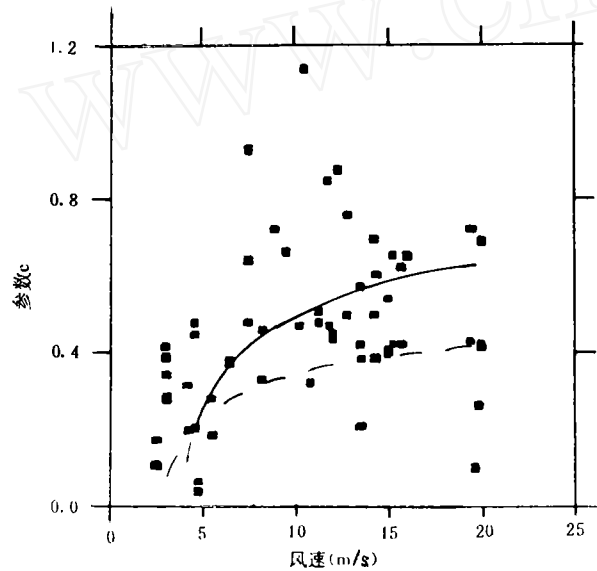
$$\nu = 0.85 \quad (9)$$

$$b = 0.29 \quad (10)$$

$$c = 3(1 - S_c/S_w)/(1 + S_c/S_w) \quad (11)$$

其中参数 c 的形式是借鉴了 Chan 等人的建议⁽¹⁴⁾,并结合实测数据拟合得到的。图 1 给出了(11)式的计算结果与实测值的比较。

表达式(7)–(11)即构成了一个完整的海面微波散射系数工程计算公式。



实线是计算结果,虚线为 Chan 的结果

图 1 参数 c 的计算结果与实测值比较

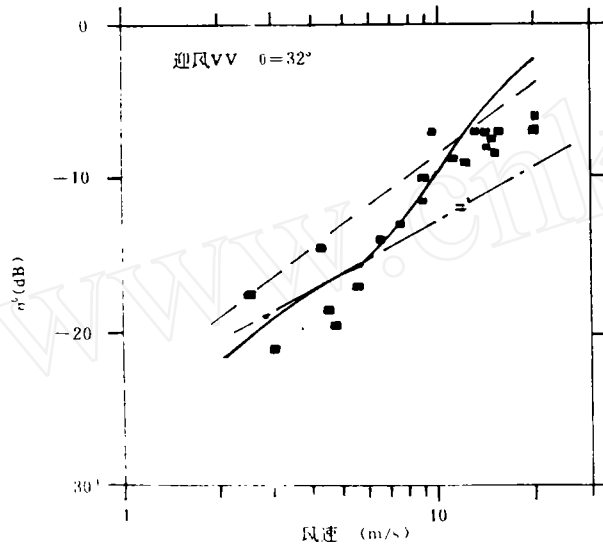
值得注意的是:从以上工程计算模式的导出不难看到它的理论基础是 Bragg 共振的双尺度模式,因而其应用范围也主要适用于中等雷达入射角,实际上 $20^\circ < \theta < 70^\circ$ 效果较好。对于入射角 $\theta < 20^\circ$,散射系数还应包括海面准镜面反射的直接贡献,其计算公式见文献[8]。对于 $\theta > 70^\circ$ 的情形,近来虽有一些称可计算破碎波锋面楔形衍射贡献的研究工作⁽¹⁵⁾,但尚属探索阶段。考察 AAFE 的实测数据,当 $\theta < 20^\circ$ 或 $\theta > 70^\circ$ 时,数据点散布很大,这强烈表明雷达后向散射过程包括了许多复杂的物理因素,需要进一步深入研究。

3 计算实例

考虑到海面长波斜率概率密度 P 为高斯分布,经计算分析可将(7)式的数值积分上下

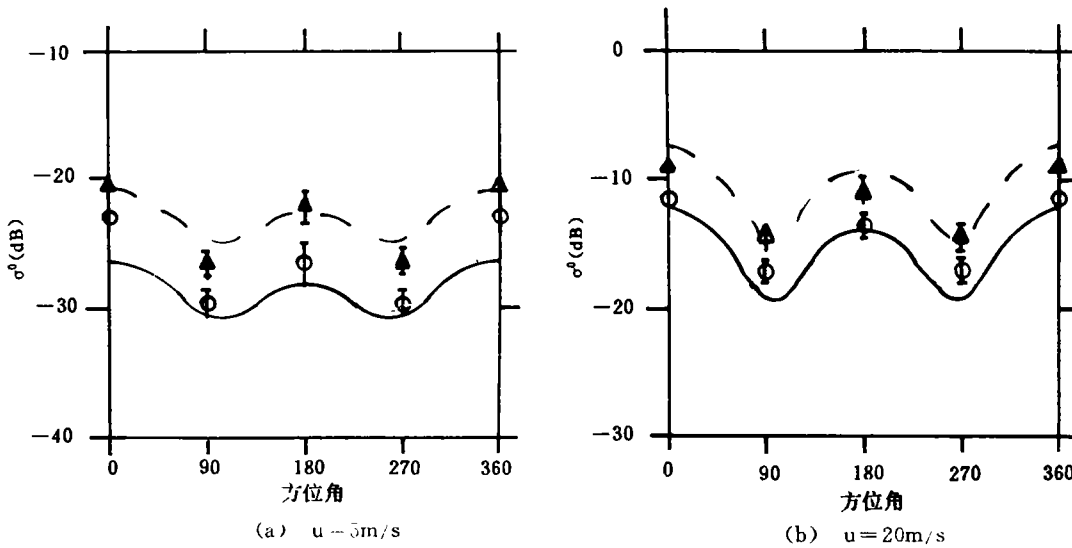
限定在最大计算风速下水波波面斜率方差的 4 倍。

图 2 所示为本文算法计算结果与相应实测结果^[1]之比较。同时示出有 SASS-1^[2]及 Fung 等^[7]的模式计算结果。可看到本文算法给出较满意结果。 σ_{ab} 与风速只有近似的对数关系,对于较大的风速准镜面反射贡献明显。图 3 给出了 σ_{ab} 与方位角 χ 的关系,计算曲线基本落在实测值范围里,计算结果与实测值均表现出迎、顺风的不对称性。上述图例中的实测点均取自 AAFE 飞行数据^[1]。



实线为计算曲线,虚线为 SASS-1 模型,点线为 Fung 提出模型

图 2 散射系数与风速的关系



(a) $u = 5\text{m/s}$

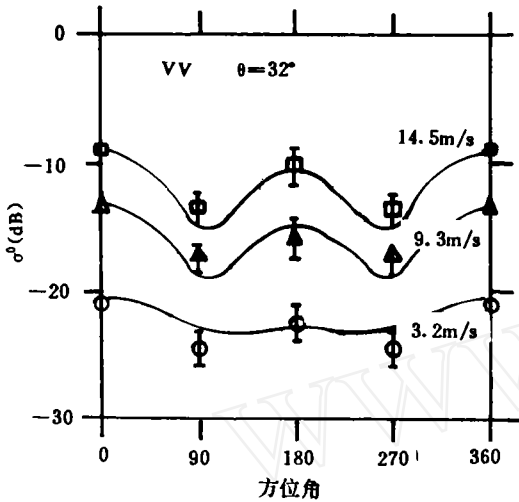
(b) $u = 20\text{m/s}$

实线为 HH 极化,虚线为 VV 极化, $\theta = 40^\circ$ 。

图 3 不同风速散射系数与方位角的关系

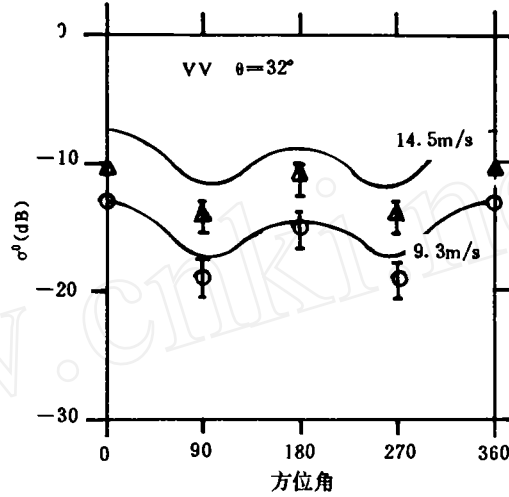
考虑不同微波波段对散射系数的影响,图 4 和图 5 分别给出微波 X 波段(10GHz)和 Ka

波段(34GHz)的计算结果与 Matsuko 等人^[16]的实测比较,计算中风速指数 ν 分别取 0.78 (X 波段)和 1.02(Ka 波段)。从不同微波波段计算与实测的比较不难看出二者有同样好的符合。综上所述,本文提出的散射计后向散射系数应用计算模型得到了良好的实测验证,为散射系数的进一步应用研究提供了十分有价值的参考。



实测点取自 Matsuko 等的实测

图4 X 波段散射系数与方位角的关系



实测点取自 Matsuko 等的实测

图5 Ka 波段散射系数与方位角的关系

4 结束语

本文提出的海面后向散射系数工程计算方法是在双尺度模型框架下建立起来的。该模型对极化和入射角的考虑比纯经验的工程应用模式(如 SASS-1)更合理。同时针对目前物理分析模型存在解释散射系数迎、顺风不对称性上的不足等问题,进行了理论模型结合实测资料拟合改进计算效果的探讨,提高了预报精度。

参 考 文 献

- 1 Schroeder L C, Jones W L, Schaffner P R, et al. Flight Measurement and Analysis of AAFE RADSCAT Wind Speed Signature of the Ocean, NASA TM85646, 1984.
- 2 Wentz F J, Peteherych S, Thomas L A. A Model Function for Ocean Radar Cross Sections at 14.6 GHz. J Geophys Res, 1984, 89, 3689~3704.
- 3 Wentz F J, Mattox L A, Peteherych S. New Algorithms for Microwave Measurements of Ocean Winds Applications to Seasat and the Special Sensor Microwave Imager. J Geophys Res, 1986, 91, 2289~2307.
- 4 Hoffman R N. A Preliminary Study of the Impact of the ERS-1 C-band Scatterometer Wind Data on European Centre for Medium Range Weather Forecasts Global Data Assimilation System. J Geophys Res, 1993, 98, 10233~10244.
- 5 Woiceshyn P M, Wurtele M G, Boggs D H, et al. The Necessity for a New Parameterization of an Empirical Model for Wind/Ocean Scatterometry. J Geophys Res, 1986, 91, 2273~2289.
- 6 Wright J W. A New Model for Sea Clutter. IEEE Trans Antennas Propag, 1968, AP-16, 217~223.
- 7 Fung A K, Lee K K. A Semi-empirical Sea-spectrum Model for Scattering Coefficient Estimation. IEEE J Ocean

- Eng, 1982, OE-7, 166~176.
- 8 Donelan M A, Pierson W J. Radar Scattering and Equilibrium Ranges in Wind-generated Waves with Application to Scatterometry. *J Geophys Res*, 1987, 92, 4971~5029.
 - 9 Durden S L, Vesecky J F. A Physical Radar Cross-section Model for a Wind-driven Sea with Swell. *IEEE J Ocean Eng*, 1985, OE-10, 445~451.
 - 10 Valenzuela G R. Teories for the Interaction of Electromagnetic and Oceanic Waves—A Review. *Boundary Layer Meteorology*, 1978, 13, 61~85.
 - 11 Cox C, Munk W. Measurement of the Roughness of the Sea Surface from Photographs of the Sun Glitter. *J Opt Soc Amer*, 1954, 44, 838~850.
 - 12 Banner M L, Jones IAN S F, Trinder J C. Wavenumber Spectra of Short Gravity Waves. *J Fluid Mech*, 1989, 198, 321~344.
 - 13 Mitsuyasu H. Measurements of the High-frequency Spectrum of Ocean Surface Waves. *J Phys Ocean*, 1977, 7, 883~891.
 - 14 Chan H L, Fung A K. A Theory of Sea Scatter at Large Incident Angles. *J Geophys Res*, 1977, 82, 3439~3444.
 - 15 Lyzenga D K, Maffett A L, Shuchman R A. The Contribution of Wedge Scattering the Radar Cross Section of the Ocean Surface. *IEEE Trans Geosci Electron*, 1983, GE-21, 502~505.
 - 16 Matsuko H, Okamoto K, Shmada M, et al. Measurement of Macrowave Backscattering Signature of the Ocean Surface Using X-Band and Ka-Band Airborne Scatterometers. *J Geophys Res*, 1986, 91, 13065~13083.

A Practical Algorithm for Computing Normalized Radar Backscattering Cross Section from Sea Surface

Xu Feng Jia Fu

(*Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080*)

Abstract

Presented in this paper is a practical algorithm for computing radar backscattering cross sections from sea surface based on the so called "Two-Scale Model". The dependence of backscattering coefficients are expanded into Fourier series and two of the first three Fourier coefficients are determined by fitting the AAFE RADSCAT measurements. The short wave spectrum adopted in the algorithm is proposed by the present authors and will be detailed in a separate paper. The capability of predicting the well documented upwind-downwind asymmetry of backscatter cross section constitutes one of the features of the present algorithm. Several sets of measurements of microwave backscatter from sea surface by different authors covering X (10 GHz) band, Ku (13.4GHz) band and Ka (34GHz) band were used for comparison with the prediction of the present model. Mean-time the predictions by engineering model (SASS-1 algorithm) and physical model were compared with that of the present algorithm as well. The results of all of such comparisons were satisfactory.

Key words Microwave, Scattering coefficient, Practical algorithm