

适用于不同频率的微波海面散射计算方法^{*}

徐 丰 贾 复

(中国科学院力学研究所 北京 100080)

摘 要 根据微波海面散射及风场实测数据库发展起来的若干算法, 如 SA SS-1、RADSCAT^[4]、CMOD 等, 基本由相应实测数据统计处理而成, 因而受所使用微波器自身的工作频率所限, 这些算法应用于不同频率的实测数据时, 误差相当大。算法对微波器频率的依赖性限制了自身的应用范围。在对频率从 0.428~34.4 GHz 范围的五组海面散射数据分析基础上, 提出一个风生短波谱形式及散射系数算法。用此算法与不同频率的海面散射实测数据进行了比较, 均获得满意的结果。

关键词 微波频率 雷达散射系数 海面散射

1 引 言

为可靠地实现微波散射计对海面的遥测, 近几十年来, 国际上已进行了很多次陆基、机载、星载海面微波散射实验, 理论、工程应用及实测方面均积累了丰富的成果。在微波散射计的实际应用方面, 信号的诠释反演还是以所谓的工程模式为主, 如 Seasat 的 SA SS-1、SA SS-2^{[1][2]}及 ERS-1 的 CMOD^[3]等。由于这些工程模式是在对大量微波信号及同步地面物理量的测量数据进行统计、拟合基础上产生的, 因此每个模式中所包含的经验参数常局限于该微波器的工作频率。随各个微波散射计发展起来的工程反演模式, 往往难以彼此协调。尤其是当把计算模式应用于不同频率的微波数据进行比较时, 会发现有很大的误差。图 1 给出了根据 SA SS-1^[1](频率为 14.6 GHz) 模式、Schroeder 从 AAFE^[4]导出的模式(微波器工作频率 13.9 GHz)及 Matsuko 模式(工作频率 34.4 GHz)^[5]计算出的散射系数与风速的关系曲线, 同时图中标出 0.428 GHz 微波器的实测数据^[6]。从图 1 可以看出, 一般的工程模式计算结果和微波散射实测数据之间存在较大的误差。

本研究的目标在于建立一个在相当宽的范围内, 能适用于不同频率的海面散射工程计算方法, 使其能与迄今发表的若干重要不同频率微波器所测量的散射——风速实测数据有较好的符合。要解决这个问题, 自然要考虑到如下两个现实: 现有的诸工程模式均有确定的

* 本研究得到国家自然科学基金的资助。

第一作者简介: 徐丰, 男, 1965 年 9 月出生, 助理研究员, 现主要从事环境流体力学及微波遥感应用研究工作。

收稿日期 1995-10-30 收修改稿 1996-04-12

函数形式及经验参数; 既然 Bragg 共振在微波段仍被普遍认为是海面散射的主要机制, 那么采用双尺度模型这样的物理模式作为框架, 着眼于提出水波短波谱的恰当形式, 以实现所提目标是较现实的途径。这正是本文的思路。

2 适用于不同频率的微波散射工程模式

我们沿用迄今普遍接受的观点, 对于微波入射角小于 70° ; 海面微波散射系数 σ 主要由风生水波的 Bragg 散射 σ_B° 及准镜面反射 σ_S° 组成:

$$\sigma^\circ = \sigma_S^\circ + \sigma_B^\circ \quad (1)$$

一般来说入射角小于 20° 时, 准镜面反射占主导地位, 可用 Kirchhoff 近似来表述^[7]:

$$\sigma_S^\circ = \left| \frac{R(0)}{2S_w S_c} \right|^2 \sec^4 \theta \exp(-\tan^2 \theta / 2S_w^2) \quad (2)$$

式中 $R(0)$ 为 Fresnel 反射系数, S_w, S_c 为海面水波斜率, 其具体表达式见文献^{[7][8]}。

关于 Bragg 散射, Wright^[9]给出了非常明确的物理表述——双尺度模型:

$$\sigma_B^\circ = \iint 6\pi k_o^4 \alpha_{pp} \Phi P dZ_x dZ_y \quad (3)$$

式中 α_{pp} 代表微波的极化参量 (足标 pp 表示 HH 或 VV 极化方向), P 为海面长波斜率概率密度, 二者具体表达式见文献^[8], k_o 为微波波数, Z_x, Z_y 为水波斜率积分变量, Φ 为二维风生水波短波谱。

海面散射系数与微波自身频率的依赖关系应该从风生水波的短波谱函数形式中推究, 为此我们有必要来探讨恰当的短波谱形式。考虑水气界面的能量平衡, 设风的能量输入率 S_w 与水波破碎能量耗散率 S_d 相平衡, 而不同波数间能量传输可略去, 因此有:

$$S_w = S_d \quad (4)$$

沿用 Plant^[10]的风能输入率:

$$S_w = g(u_*^2/c)\Phi \quad (5)$$

式中 c 为水波相速, u_* 为摩擦风速, g 为重力加速度。

水波破碎的能量耗散非常复杂, 依照文献^[11]的论述可按量纲分析写成下述形式:

$$S_d = gk^{-4}(k\Phi)^n \quad (6)$$

将(5)式和(6)式代入到(4)式中, 可推导出平衡谱的基本形式:

$$\Phi = A \cdot k^{-4} \cdot \left(\frac{u_* k^{1/2}}{g^{1/2}} \right)^v \quad (7)$$

式中 $g_* = g + Tk^2$, 其中 T 为水表面张力密度比, k 为水波波数, v 为水波波数的函数。

考查现有的工程应用模式, 普遍的观点是散射系数 σ 为风速幂函数, 而其指数通常令其为常数或入射角的函数 (如 SA SS-1)。我们通过对现有微波散射实验数据的分析, 特别是图 1 所反应的问题来看, 风速指数不仅是入射角 θ 的变量, 还与微波频率相关。考虑到 Bragg 共振机制 ($k = 2k_o \sin \theta$), 结合微波散射实测数据, 将风速指数与水波波数作相关分析示于图 2, 从中可见二者有近似的对数关系。根据不同微波频率海面散射数据的大量分析、试算, 我们给出(7)式中的 v 与水波波数 K 有下述的关系:

$$V = \log(k/k_a) \quad (8)$$

式中 $k_a=6.5/\text{m}$ 。

将 (7) (3) 式代入到 (1) 式中, 考虑到微波方位角 χ 的贡献^[8], 可得到散射系数 σ 如下的计算表达式:

$$\sigma^\circ = \sigma_s^\circ + \iint 6\pi k_o^4 \alpha_{pp} \cdot A \left(\frac{u \cdot k^{1/2}}{g^{1/2}} \right)^v (P dZ_x dZ_y \cdot f(\chi)) \tag{9}$$

式中 $f(\chi) = (1 + b \cos \chi + c \cos 2\chi) / (1 + b + c)$, 根据我们的计算与实测的对比分析, 参数 $a=0.04, b=0.29, c=3(1 - S_c/S_u)/(1 + S_c/S_u)$ 。

(9) 式即为我们建立的适用于不同微波频率的散射工程模式。

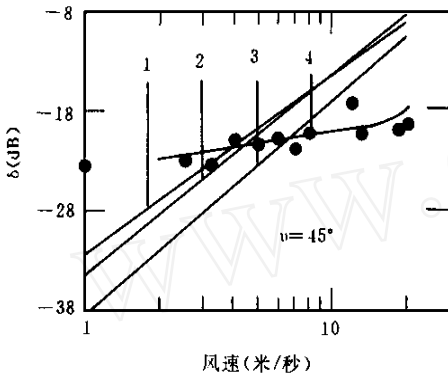


图 1 计算与实测的散射系数

· 实测数据, 迎风 VV 极化, 0.428GHz
1 SASS-1 模式 [1] 2 Schroeder 模式 [4]
3 Matsuko 模式 [5] 4 本文计算结果

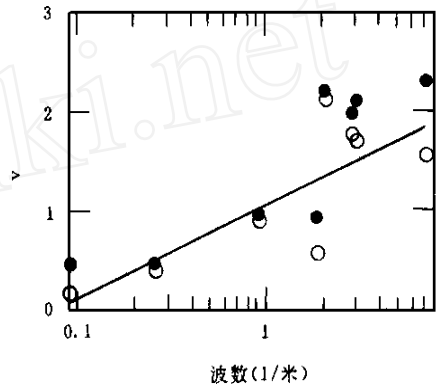


图 2 风速指数与水波波数的关系

· HH 极化, ° VV 极化

3 与实测数据的比较

为考查表述为 (9) 式形式的海面散射模式对于不同微波频率的适用情形, 我们采用了几组有代表性的微波散射实测数据作为对本文模式的考核基础。所用数据来源列于表 1, 包括的微波器工作频率范围从 0.428 到 34.4 GHz。本文模式计算结果与实测数据对照示于图 1、图 3、图 4、图 5、图 6。不难看出计算结果与实测数据的符合程度是令人满意的。因此可以说, (9) 式给出了能恰当反映散射系数对微波频率依赖关系的工程计算方法。

表 1 采用的实测资料一览表

作者	数据测量时间	微波器频率 (GHz)
Daley	1965~ 1971 年 ^[6]	0.428、1.228、4.455、8.91
Schroeder 等	1973~ 1976 年 ^[4]	13.9
Matsuko 等	1980~ 1981 年 ^[5]	10、34.43

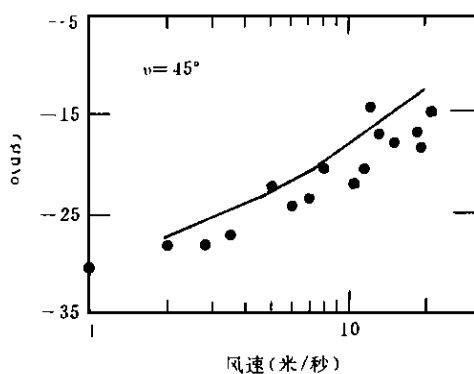


图3 散射系数与风速的关系
迎风、VV 极化、4.455GHz

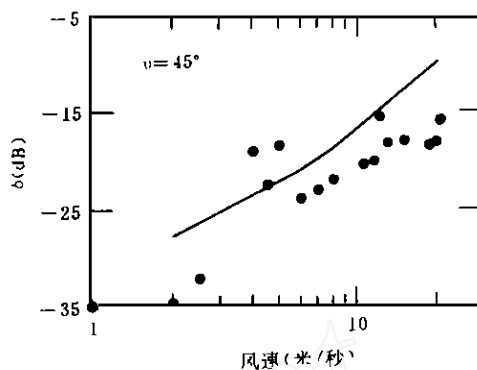


图4 散射系数与风速的关系
迎风、VV 极化、8.91GHz

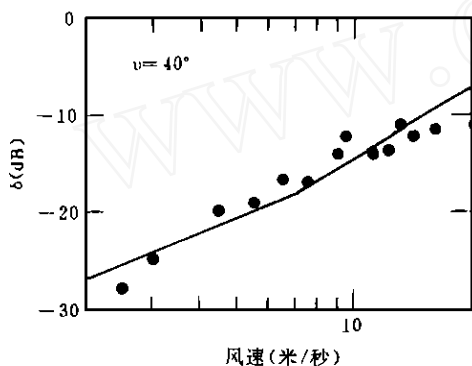


图5 散射系数与风速的关系
迎风、VV 极化、13.9GHz

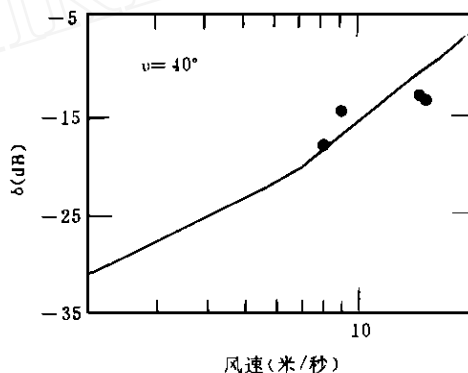


图6 散射系数与风速的关系
迎风、VV 极化、34.4GHz

4 结 语

与一般工作频率范围的多组微波散射数据相比较的良好符合程度,清楚地表明散射计工作频率对于散射系数的影响是不可忽略的。迄今针对某一频率发展的散射计算工程模式,不宜延用到不同的工作频率范围。本文建立的(表述为(9)式)散射系数算法,可以在一定精度范围内应用于从 0.428~34.4 GHz 的常用微波器工作频率范围,而实测数据与计算结果之间误差是可接受的,因此文中的模式为海面微波散射计算提供一个有实际参考价值的方法。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 Wentz F J, Cattox 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: 2269~ 2307.
- 3 Hoffman R N. Aprilinary Study of the Impact of the ERS-1 C-Band Scatterometer Wind Data on Eu-

- ropean Centre for Medium Range Weather Forecasts Global Data Assimilation System. J Geophys Res, 1993, 98: 10233~ 10244
- 4 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 TM 85646, 1984
 - 5 Matsuko H, Okamoto K, Shmada M, et al Measurement of Microwave Backscattering Signature of the Ocean Surface Using x- Band and ka- Band Airborne Scatterometers J Geophys Res, 1986, 91: 13065 ~ 13083
 - 6 Daley J C. Eind Dependence of Radar Sea Return. J Geophys Res, 1973, 78: 7823~ 7833
 - 7 Valenzuela G R. Theories for the Interaction of Electromagnetic and Ocean Waves-A review. Boundary Layer Meteorol, 1978, 13: 61~ 85
 - 8 徐 丰, 贾 复 海面微波散射系数的一个工程算法 遥感技术与应用, 1995, 10(3): 7~ 12
 - 9 Wright J W. A New Model for Sea Clutter. IEEE Trans Antennas Propag, 1968, AP- 16: 217~ 223
 - 10 Plant W J. A Relationship Between Wind Stress and Wave Slope, J Geophys Res 1982, 87: 1961~ 1967.
 - 11 Phillips O M. Spectral and Statistical Properties of the Equilibrium Range in Wind-generated Gravity Waves J Fluid Mech, 1985, 156: 505~ 535

An Algorithm of Sea Surface Radar Scatter Applicable to Wide Frequency Band

Xu Feng Jia Fu

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of sciences, Beijing, 100080)

Abstract

Some most widely applied models computing radar scattering coefficients from sea surface, i.e. SASS-1, RADSCAT, CMOD. are all derived from extensive data processing of corresponding radar scattering signals along with the sea surface geophysical measurements. As a result, such models are all radar frequency dependent. The discrepancies between model prediction and measurements would be rather serious if such an algorithm is applied to a frequency band quite away from the frequencies, from which the algorithm is derived. Such frequency dependence of models is inconvenient and limits their wider applications. Based on an investigation of radar scattering data sets of different frequencies, a spectrum form of short wind wave and then an algorithm computing radar scattering coefficients from sea surface is proposed in the present paper. The present model is constructed to be applied to wider frequency band. The predictions of sea surface radar scattering by the present model agree well with the measurements made by radar scatterometries working at frequencies varied as widely as from 0.428~ 34.4 GHz.

Key words Microwave frequency, Normalized radar backscattering cross-section