

海表白冠覆盖率的散射计资料反演研究^{*}

李 琨¹⁾²⁾ 魏恩泊¹⁾ 宋金宝^{1)†}

1) (中国科学院海洋环流与波动重点实验室, 青岛 266071)

2) (中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2009 年 7 月 13 日收到; 2009 年 8 月 25 日收到修改稿)

针对波浪破碎海况, 采用考虑波浪破碎的 KHCC03 散射模式和散射计卫星遥感资料, 对白冠覆盖率进行了反演研究, 并得到了白冠覆盖率的反演公式. 经检验, 在 10 m 高度处风速取值为 7 m/s—16 m/s 时, 利用文中给出的公式得到的白冠覆盖率反演结果与实测数据相比, 优于以往其他计算公式的对应结果. 这表明, 利用散射计资料和波浪破碎的散射模式, 可以反演白冠覆盖率. 而且, 这种方法不同于人们通常采用的被动遥感方法.

关键词: 白冠覆盖率, KHCC03 散射模式, 波浪破碎

PACC: 9210, 9265M, 5235H

1. 引 言

白冠覆盖率是海表面的重要特征参量, 它不仅是风速的函数, 而且与大气稳定度等有关. 它不仅在海-气相互作用中对海-气动量、热量及质量通量等有着重要的影响, 而且也是海洋生物、海洋化学、环境生态学、天气气候学建模以及海洋工程不可忽视的重要参量. 自上世纪 70 年代以来, 随着海洋遥感测量技术的发展, 海洋白冠作为一个重要的海洋遥感物理参量越来越受到重视, 利用遥感手段反演波浪破碎率或白冠覆盖率对海洋动力学、海气相互作用等具有重要意义.

海洋遥感通常分为主动式和被动式遥感. 海洋表面微波的发射率由于白冠的存在而发生变化, 这种变化通常是被动遥感反演海表白冠覆盖率的基础. 为了从遥感数据中获得白冠对于海表亮度温度的影响, 人们根据微波辐射理论, 提出了很多海表辐射率模型, 例如由 Stogryn^[1], Pandey 和 Kakar^[2], Koepke^[3], Smith^[4], Huang 和 Jin^[5] 提出的半经验模型, 以及由 Droppleman^[6], Rosenkranz 和 Staelin^[7], Guo 等人^[8], Wei 和 Ge^[9] 提出的理论模型. 另外, 通过亮度温度变化的研究, 人们可以从卫星遥感信息

中确定出海面的白冠覆盖率^[10,11].

主动遥感研究海洋白冠通常从波浪破碎对微波散射的影响入手, 大量研究表明, 波浪破碎对海表微波散射有很大的影响. 未考虑波浪破碎影响时, 得到的结果与雷达实际的测量值相差很大, 在雷达频率、入射角变换范围很大的情况下, 模型结果与雷达数据不一致, 尤其是对于 HH 极化, 有些模型即使对于 VV 极化能得到与雷达观测一致的结果, 但对于 HH 极化却不能得到与雷达观测一致的结果^[12,13], 导致模型的极化率与观测的极化率差别很大. 这些模式不能准确地反映在 HH 和 VV 极化状态下, 观测到的方位角以及长波对于散射系数的影响和调制^[14,15]. 这一缺点通常都解释为 non-Bragg 散射的作用(在 HH 极化时比 VV 极化时重要), 实验表明确实如此^[16,17]. 而白冠作为波浪破碎的主要产物对于散射系数的影响是不可忽略的, 前人对此做了一些研究, 如金亚秋等人使用一层粒子模型研究了泡沫对于后向散射的影响^[18,19], 田纪伟等人将海面分为具有两层球形粒子的随机粗糙面, 研究了波浪破碎后飞沫和气泡对于后向散射系数影响^[20], 以及刘叶等人研究了白冠对于散射系数的影响^[21]. 但这些工作未考虑从散射系数直接反演海洋白冠覆盖率.

^{*} 国家自然科学基金(批准号:40876094, 40876012)和国家 863 计划项目(批准号:2009AA09Z102, 2008AA09A403)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: songjb@qdio.ac.cn

本文利用考虑波浪破碎的散射模型,并结合 ERS-1 散射计数据,反演了海表白冠覆盖率(包括波峰处的白浪,泡沫以及沫流带),与实测数据基本符合.

2. KHCC03 散射模式

Kudryavtsev 等人在 2003 年提出了一个考虑波浪破碎影响的散射模型^[22],这个模型简称为 KHCC03 模型.这个模型把海面分为两个部分,非波浪破碎区域以及波浪破碎区域,其中非波浪破碎区域的散射符合 Bragg 散射模型,波浪破碎区域的散射符合 KA 近似,具体的公式为

$$\sigma^p(\theta, \varphi) = \sigma_{br}^p(\theta, \varphi) \cdot (1 - q) + q \cdot \sigma_{wb}(\theta, \varphi), \quad (1)$$

其中 q 为白冠覆盖率, P 表示雷达的极化特性, $\sigma_{br}^p(\theta, \varphi)$ 表示 Bragg 散射系数,具体形式为

$$\sigma_{br}^p(\theta, \varphi) = 16\pi k_r^4 |G_{pp}(\theta)|^2 F_r(k_{br}, \varphi), \quad (2)$$

$G_{pp}(\theta)$ 是 Bragg 散射的极化系数,对于 ERS-1 散射计,雷达的极化形式为 VV 极化,极化系数^[23]为

$$G_{vv} = \frac{\cos^4\theta(1 + \sin^2\theta)^2}{(\cos\theta + 0.111)^4}, \quad (3)$$

k_r 是雷达入射波的波数, θ 是入射角, φ 是天线的方位角, $k_{br} = 2k_r \sin\theta$ 是散射电磁波的表面波波数, $F_r(k, \varphi)$ 是海表位移的 2-D 波数折叠谱,该折叠谱与海浪方向波数谱的关系如下:

$$F_r(k, \varphi) = 0.5(F(k, \varphi) + F(k, \varphi + \pi)), \quad (4)$$

$F(k, \varphi)$ 为海浪方向波数谱. 这里,我们选用 Elfouhail 等人 1997 年提出的波浪方向波数谱^[24].

$\sigma_{wb}(\theta, \varphi)$ 表示破碎区域的散射系数,具体形式为

$$\sigma_{wb}(\theta) = \left(\frac{\sec^2\theta}{s_{wb}^2}\right) \exp\left(-\frac{\tan^2\theta}{s_{wb}^2}\right) + \frac{\varepsilon_{wb}}{s_{wb}^2}, \quad (5)$$

s_{wb}^2 是波浪破碎区域增加的粗糙度的均方斜率, ε_{wb} 代表破碎元的厚度与长度的比率. 根据 KHCC03 模型, $s_{wb}^2 = 0.19, \varepsilon_{wb} = 0.005$.

3. 数据介绍

ERS-1 是欧空局于 1991 年发射,携带有多种有效载荷,包括侧视合成孔径雷达 (SAR) 和散射计

(scatterometer) 等装置. ERS-1 采用了先进的微波遥感技术来获取全天候与全天时的图像,比起传统的光学遥感图像有着独特的优点.

本文所用的散射数据来自于 ERS-1 所携带的散射计,其频段为 C 段 (5.3GHz),极化方式为 VV 极化,资料包括日期(年、月、日、时、分、秒),海区(经度、纬度),风速,风向,3 根天线的入射角,方位角以及散射系数,每组数据均包含上述信息. 所用数据囊括了 1993—2000 年间的不同月份,区域为 17W—19W, 22N—24N 范围内的海域.

4. 反演结果

利用 ERS-1 散射计数据资料提供的入射角、方位角、风速以及散射系数的数据资料,通过 KHCC03 散射模型,反演了白冠覆盖率,根据反演的结果,我们提出如下计算白冠覆盖率的公式,即

$$q(U_{10}) = e^{2.057+0.193(U_{10}-10.84)+0.004(U_{10}-10.84)^2}, \quad (6)$$

其中, U_{10} 为 10 m 高度处的风速.

我们将通过 ERS-1 数据 (1993—2000 年) 反演的白冠覆盖率结果与新得到的白冠覆盖率公式结果绘制成图 1,从图 1 可以看出,新白冠覆盖率计算公式的结果与反演数据符合较好.

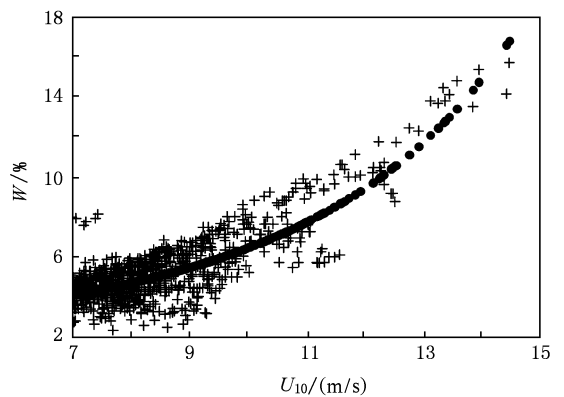


图 1 在风速为 10 m 高度处时,新白冠覆盖率计算公式结果与反演结果的比较 (1993—2000 年), $\cdot$ 代表新的拟合公式结果; $+$ 代表根据 KHCC03 散射模式反演的结果

为了检验白冠覆盖率的 (6) 式的有效性,我们首先将新模式结果与 Ross 等人^[25]的实测数据及 Huang 等人^[5]经验公式进行了比较,比较结果由图 2 给出. 可以看出,对于 20 m 高度处风速在 7 m/s—17 m/s 范围内,新公式结果比以往人们提出的其他方法与实测数据更加符合,新公式的结果与实测数

据的均方根误差为 1.9%,Huang 等人^[5]公式的结果与实测数据的均方根误差为 2.4%,Ross 等人^[25]的结果与实测数据的均方根误差为 6.8%,

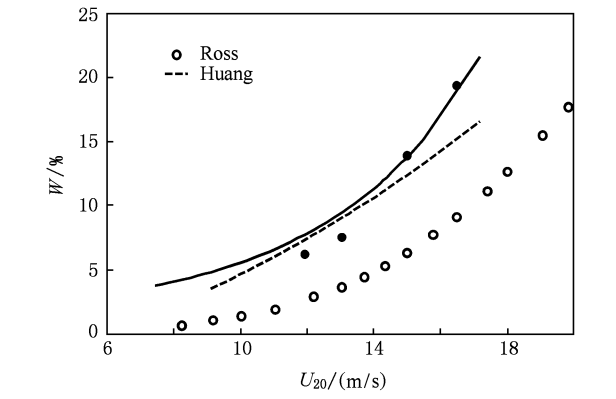


图2 在风速为 20 m 高度处时,新白冠覆盖率计算公式结果(——)与经验公式以及实测数据(·)的比较

此外,根据 Ross 等人^[25]提出的总白冠覆盖率公式

$$W = W_{\text{whitecap}} + W_{\text{foam}} = (1 + R_{\text{sw}}) W_{\text{whitecap}}, \quad (7)$$

其中, W_{whitecap} 为白浪覆盖率, W_{foam} 是泡沫覆盖率, R_{sw} 是泡沫覆盖率与白浪覆盖率的比率,即

$$R_{\text{sw}} = -1.99 + 2.55 U_{20}, U_{20} > 9 \text{ m/s},$$
$$R_{\text{sw}} = 0, U_{20} < 9 \text{ m/s}, \quad (8)$$

U_{20} 为 20 m 高度处的风速.

将上式中 U_{20} 按照下式将其转换为 10 m 高度处的风速 U_{10} :

$$U_{20} = U_{10} \left(1 + \frac{C_{10}^{\frac{1}{2}}}{\kappa} \ln 2 \right), \quad (9)$$

其中 $C_{10} = (0.8 + 0.065 U_{10}) \times 10^{-3}$, $\kappa = 0.4$, 于是(8)式可以写为

$$R_{\text{sw}} = -1.99 + 2.55 U_{10}$$
$$\times \left(1 + \frac{\sqrt{(0.8 + 0.065 U_{10}) \times 10^{-3}}}{\kappa} \ln 2 \right),$$
$$U_{10} > 8.46 \text{ m/s},$$
$$R_{\text{sw}} = 0, U_{10} < 8.46 \text{ m/s}, \quad (10)$$

利用白冠覆盖率(7)和(10)式及 Monahan^[26]和 Wu^[27]的白浪覆盖率公式,

$$W_{\text{Monahan}} = 2.95 \times 10^{-6} U_{10}^{3.52}, \quad (11)$$

$$W_{\text{wu}} = 1.7 \times 10^{-6} U_{10}^{3.75}, \quad (12)$$

计算得到的白冠覆盖率与(6)式结果的对比由图3给出.根据 Monahan^[26]和 Wu^[27]的白浪覆盖率公式计算出的白冠覆盖率结果与实测数据的均方根误差分别为 7.1% 和 6.8%.

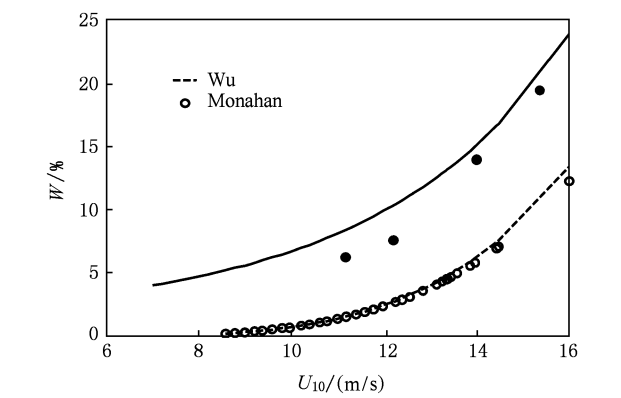


图3 在风速为 10 m 高度处时,新白冠覆盖率公式结果与实测数据以及其他白冠覆盖率计算方法的比较

5. 结 论

利用 ERS-1 的散射计资料,通过 KHCC03 散射模型,反演了海表白冠覆盖率,并得到了计算白冠覆盖率的新公式.该白冠覆盖率计算公式的结果通过与实测数据比较,基本符合,其均方根误差为 1.9%,优于其他白冠覆盖率公式^[5,26,27].同时研究也表明利用散射计数据反演海洋白冠覆盖率是可行的.然而,本文的研究在很多方面尚需进一步完善以提高白冠覆盖率反演精度,例如,Bragg 散射模式在海浪破碎时海浪谱修正问题,气泡、水滴等几何和物理参量对 Bragg 散射的影响,这些问题仍需在下一步的研究工作中进一步完善.

[1] Stogryn A1972 *J. Geophys. Res.* **77** 1658

[2] Pandey P C, Kakar R 1982 *IEEE J. Ocean Eng.* **OE-7** 135

[3] Koepke P 1986 *Remote Sensing Signatures of Whitecaps, Ocean Whitecaps and Their Role in Air Sea Exchange Processes* edited by E. C. Monahan and G. MacNiocaill (Norwell, MA;Reidel) 251

[4] Smith P M 1988 *IEEE Trans. Geosci. and Remote sens.* **26** 541

[5] Huang X Z, Jin Y Q 1995 *IEE Proc. -Microwave Antennas and Propagation* **142** 109

[6] Droppleman J D 1970 *J. Geophys. Res.* **75** 696

[7] Rosenkranz P W, Staelin D H 1972 *J. Geophys. Res.* **77** 6528

- [8] Guo J 2001 *IEEE Trans. Geosci and Remote Sens.* **39** 1019
- [9] Wei E B, Ge Y 2005 *Chin. Phys.* **14** 1259
- [10] Williams G F 1969 *J. Geophys. Res.* **74** 4591
- [11] Anguelova M D, Webster F 2006 *J. Geophys. Res.* **111** c03017
- [12] Plant, W J 1990 *Remote Sensing* Kluwer Acad Norwell Mass 2 P 41-108
- [13] Janssen P A E M, Wallbrink H, Calkoen C J, van Halsema D, Oost W A, Snoeij P 1998 *J. Geophys. Res.* **103** 7807
- [14] Quilfen Y, Chapron B, Bentamy A, Gourrion J, Elfouhaily T, Vandemark D 1999 *J. Geophys. Res.* **104** 11459
- [15] Schmidt A, Wismann V, Romeiser R, Alpers W 1995 *J. Geophys. Res.* **100** 8815
- [16] Thompson D, Elfouhaily T, Chapron B, 1998 IEEE, Piscataway, N. J Proceedings of IGARSS98 [CD-ROM]
- [17] Horstmann J, Koch W, Lehner S, Tonboe R 2000 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **38** 2122
- [18] Jin Y Q, Huang X Z, Yin J Y 1993 *Acta Oceanologica Sinica* **12** 563
- [19] Jin Y Q, Ye H X 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 839 (in Chinese) [金亚秋、叶红霞 2008 物理学报 **57** 839]
- [20] Tian J W, Cao H J, Tan Z C, Liu Z L, Wei E B, Xu J S 2001 *Science in China D* **31** 342 (in Chinese) [田纪伟、曹红杰、覃正才、刘志亮、魏恩泊、许金山 2001 中国科学 D **31** 342]
- [21] Liu Y, Wei E B, Hong J L, Ge Y 2006 *Chin. Phys.* **15** 2175
- [22] Kudryavtsev V, Hauser D, Caudal G, Chapron B 2003 *J. Geophys. Res.* **108** C3 8054
- [23] Plant W J 1986 *J. Geophys. Res.* **91** 10735
- [24] Elfouhaily T, Chapron B, Katsaros K, Vandemark D 1997 *J. Geophys. Res.* **102** 15781
- [25] Ross D B, Cardone V J 1974 *J. Geophys. Res.* **79** 444
- [26] Monahan E C, O' Muircheartaigh I 1980 *J. Phys. Oceanogr.* **10** 2094
- [27] Wu J 1988 *J. Atmos. Oceanic Technol.* **5** 885

Retrieval of whitecap coverage with the ERS-1 scatterometer data^{*}

Li Kun¹⁾²⁾ Wei En-Bo¹⁾ Song Jin-Bao^{1)†}

1) (Key Laboratory of Ocean Circulation and Waves, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

2) (Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(Received 13 July 2009; revised manuscript received 25 August 2009)

Abstract

In this paper, the whitecap coverage is retrieved from the ERS-1 data and the KHCC03 scattering model which takes into account the effect of wave breaking, and a new whitecap coverage formula is obtained based on the retrieval results. The results calculated from this new formula of whitecap coverage have better agreement with the measured whitecap coverage than those obtained by some famous previous formula in the range of wind speed at 10 m height from 7 m/s to 16 m/s. This shows that it is feasible to retrieve whitecap coverage from scatterometer data and the scattering model including the effect of wave breaking. Moreover, this approach is different from those methods usually used in passive remote sensing.

Keywords: whitecap coverage, KHCC03 scattering model, wave breaking

PACC: 9210, 9265M, 5235H

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 40876094, 40876012) and the National High Technology Research and Development Program of China (Grant Nos. 2009AA09Z102, 2008AA09A403).

[†] Corresponding author. E-mail: songjb@qdio.ac.cn