

利用双波段补偿法提高卫星高度计海面风速反演精度*

陈戈^{1,2)} 方朝阳²⁾ 徐萍²⁾

¹⁾(中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101)

²⁾(青岛海洋大学海洋遥感研究所, 青岛 266003)

摘要 提出了一种利用卫星高度计测量的同步双波段雷达散射截面数据(σ_{Ku}^0 和 σ_C^0)提取海面风速特别是高风速信息的补偿算法。这一方法的基本思想是假定在正常情况下,高度计测量的Ku和C波段的后向散射截面对于某一风速存在一种“标准”关系,降雨和大浪等异常大气海洋过程的出现会导致 σ_{Ku}^0/σ_C^0 偏离其“标准”位置而产生一个系统误差,通过对这一系统误差进行修正和补偿,可以有效地消除其影响并显著提高高度计海面风速的反演精度。实验表明,与通常采用的单波段海面风速反演算法相比,双波段补偿法可提高精度10%左右。

关键词 卫星高度计 海面风速 双波段补偿技术

0 引言

经过20多年的实验和业务化运行,卫星高度计已被证明是一种从空间获取海面风速信息的有效手段。全球第一张可靠的海面风速分布图(尤其是南大洋海区)即来自1978年发射的Seasat高度计^[1]。此后,许多研究者相继提出了一系列针对Ku波段的高度计海面风速反演算法^[2],我们将其中一些有代表性的算法^[3-12]及其精度列于表1。这些算法中的绝大多数是通过雷达后向散射截面与独立测量的浮标、散射计或模式风速进行拟合而得到的^[3-7,10],另外一些算法考虑了有效波高的影响^[9,11],也有少数作者提出了完全基于散射理论的反演算法^[8,12]。尽管采用的方法各不相同,但所有研究者的一个共同目标是使他们的算法给出的海面风速与实测海面风速的均方差为最小。然而,从表1可以看出,在过去的近20年中,高度计海面风速算法的精度提高缓慢,2米/秒的公认设计精度几乎没有改变。这一事实表明,要使海面风速反演精度有显著提高,必须引入新的反演思想和遥感信息。基于上述认识,本文将探讨利用高度计测量的同步双波段雷达后向散射数据提取高精度海面风速信息的可行性。

表1 几种有代表性的高度计海面风速反演算法

作者(年份)	参考高度计	均方根误差(m/s)
Brown <i>et al.</i> (1981) ^[3]	GEOS-3	1.74
Chelton and McCable (1985) ^[4]	Seasat	2.37
Chelton and Wentz (1986) ^[5]	Seasat	2.20
Witter and Chelton (1991) ^[6]	Geosat	1.90
Carter <i>et al.</i> (1992) ^[7]	Geosat	1.46
Wu (1992) ^[8]	Geosat	1.92
Glazman and Greysukh (1993) ^[9]	Geosat	1.63
Freilish and Challenor (1994) ^[10]	Geosat	1.69
Lefevre <i>et al.</i> (1994) ^[11]	TOPEX	1.75
Hwang <i>et al.</i> (1998) ^[12]	TOPEX	1.49

1 卫星与浮标数据

1992年8月10日美、法两国联合发射的TOPEX/Poseidon卫星上装载的传感器中包括一台双波段(Ku:13.6GHz,C:5.3GHz)雷达高度计——TOPEX和一台三波段(18,21和37GHz)微波辐射计——TMR^[13]。该卫星的轨道设计为精确重复模式,重复周期为9.9156天,对应于254条固定地面轨迹,经度覆盖全球,纬度覆盖66°S—66°N;每条地面轨迹上相邻两个采样点的空间间隔为6.8公里,

* 本文研究受国家“863”计划课题项目(No. 818-06-01)资助
收稿日期:1999-10-27

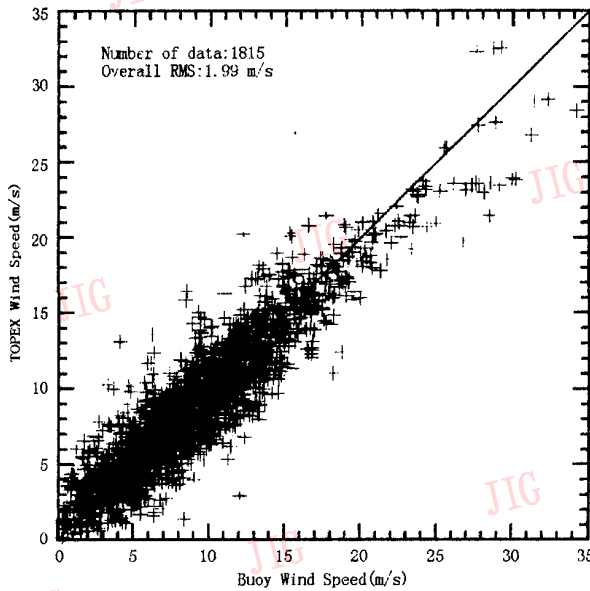
时间间隔为 1 秒。在本项研究中,我们使用了 6 年(1993 年 1 月至 1998 年 12 月)的 TOPEX/TMR 数据,从每一个测量点中提取了下列信息:观测时间、经纬度、Ku 和 C 波段的后向散射系数,以及 18、21 和 37GHz 的辐射亮温(Tb_{18} 、 Tb_{21} 和 Tb_{37})。这些数据在使用前经过了严格的质量控制,凡是仪器工作状态或海洋大气环境出现异常,或卫星姿态角偏离正常位置 0.55° 以上的测量数据均被剔除。

本项研究中所使用的海面印证数据来自日本气象厅(JMA)的 3 个海洋浮标(详见表 2)。测量风速和风向的传感器安装在距海面 7.5m 的风杆上。正常情况下每 3 小时读取一次数据;当风速超过 35 节(约 18m/s)时,仪器自动转为 1 小时测量一次。我们从每个数据记录中提取了浮标编号、观测日期、观测时间和海面风速等信息。为了与高度计数据同步,所选取的浮标数据的时间跨度亦为 1993 年 1 月至 1998 年 12 月。在预处理过程中,浮标风速被统一放大 3%,以转换为高度计所对应的 10m 风速。

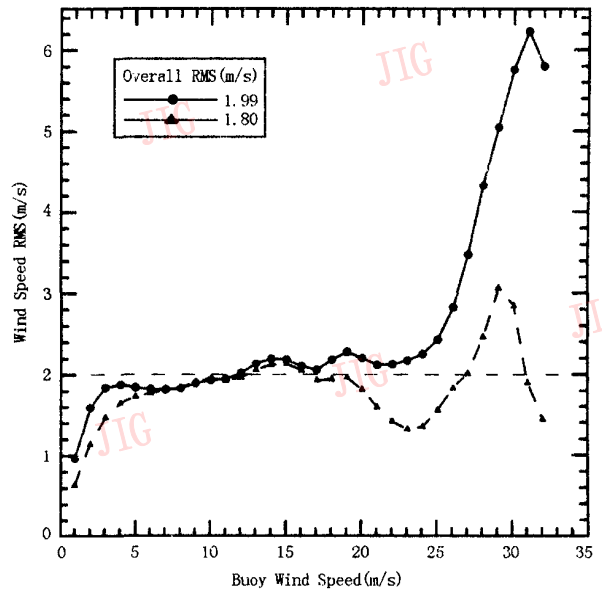
表 2 JMA 浮标的有关信息

浮标编号	位置	水深(m)
B22001	(28.17°N, 126.33°E)	140
B21002	(37.92°N, 134.55°E)	2675
B21004	(29.00°N, 135.00°E)	4860

在上述卫星/浮标数据的基础上,我们建立了一个 TOPEX/JMA 同步风速数据集。根据我们最近的一项研究结果^[14],对应于浮标 B22001 和 B21004 的时空窗口分别选为 0.8 小时和 80 公里,而 B21002 选为 0.5 小时和 50 公里。所建立的数据集共包括 1815 对同步风速,见图 1(a),相应的均方根误差分布见图 1(b)(实线部分)。从图中可以看出,高度计的测风误差随风速而显著变化。对于 12m/s 以下的风速,误差均在 2.0m/s 以下,满足设计精度;对于 12—25m/s 的中等风速,误差由 2.0m/s 缓慢增至 2.5m/s;而对于 25m/s 以上的高风速,相应的误差则由 2.5m/s 急增至 6m/s。各种风速下的平均误差为 1.99m/s,刚好达到 2.0m/s 的设计要求。



(a) TOPEX(Witter 和 Chelton 算法^[6])/JMA 同步海面风速对应分布图,图中直线代表 1:1 的理想情形



(b) 与(a)相对应的均方根误差随浮标风速的变化,实线和虚线分别代表补偿前后的情形

图 1

2 σ_{Ku}^0 与 σ_C^0 的“标准”关系

TOPEX 是国际上第一颗双波段卫星高度计,能够同时获得 Ku 和 C 波段的后向散射系数。但一般认为,对于风浪的散射而言,Ku 波段比 C 波段更为灵敏。因此,迄今为止的高度计海面风速反演算法

几乎全部是针对 Ku 波段的,C 波段的数据很少有人问津。然而,我们的一项研究表明,使用 TOPEX 双波段同步数据不仅能够挖掘新的地学信息,而且还能够开辟新的应用领域,例如海洋降雨的观测^[15]。

如前所述,本文的目的是提出一种基于 TOPEX 双波段后向散射强度的补偿算法,以提高高度计海面

风速的反演精度。这一方法的前提是假定在理想条件下, Ku 和 C 波段对于各种风速的散射强度保持一种“标准”关系,一旦对这一关系的系统偏离,则意味着存在某种海洋或大气的干扰因素。图 2 给出了利用 6 年(1993 年至 1998 年)的 TOPEX 资料得出的 σ_{Ku}^0/σ_C^0 “标准”关系。可以看出, σ_{Ku}^0 与 σ_C^0 呈单调而非线性的函数关系。实验表明,这一关系对于不同的年份和不同的海区是相当稳定的。

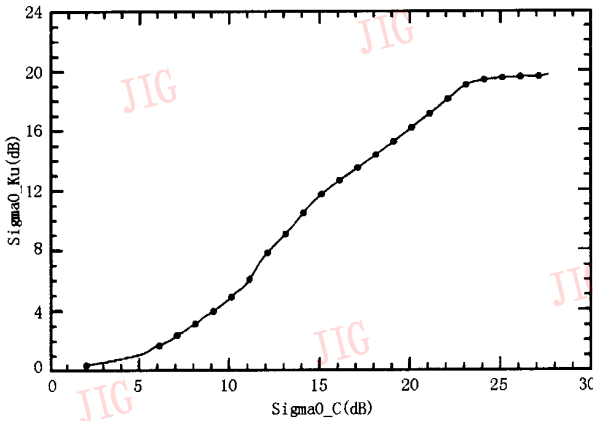
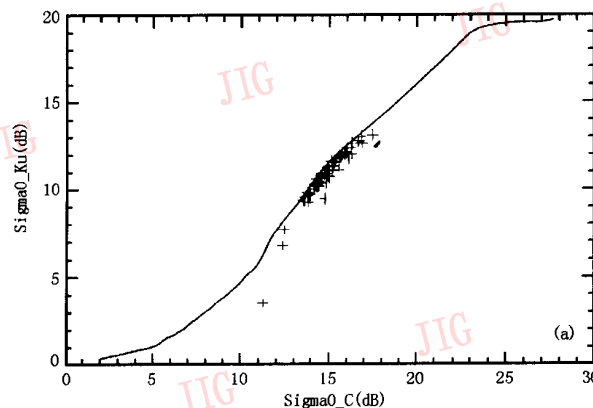


图 2 σ_{Ku}^0 和 σ_C^0 的“标准”关系

3 降雨引起的系统偏差及其补偿

降雨过程的出现会给高度计测风带来严重的误差,必须进行修正和补偿。研究表明,在大多数风速下,雨水对 Ku 波段的吸收比 C 波段大一个数量级左右^[16]。根据这一事实并考虑到 σ_{Ku}^0 和 σ_C^0 在海上的实际分布,我们定义了如下形式的 TOPEX 降水概率指数:



(a) 71 个降雨个例的同步 σ_{Ku}^0/σ_C^0 对应分布图

$$P_A = \frac{\sigma_{Ku}^0 - f(\sigma_C^0)}{N_1 s(\sigma_C^0)} \quad (1)$$

其中 f 为 σ_{Ku}^0 和 σ_C^0 的“标准”关系(图 2), s 为相应的标准偏差, $N_1=2.5$ 为归一化因子。与此同时,我们还定义了一个独立的 TMR 降水概率指数:

$$P_R = L_z/N_2 \quad (2)$$

其中 $N_2=1000\mu\text{m}$ 为归一化因子, L_z (单位: μm) 为大气水汽含量,其解析表达式为 TMR 亮温 Tb_{18} 、 Tb_{21} 和 Tb_{37} (单位: $^\circ\text{K}$) 的二次多项式:

$$\left. \begin{aligned} L_z &= a + b \\ a &= -2280.4 - 12.241Tb_{18} - \\ &\quad 5.128Tb_{21} + 28.964Tb_{37} \\ b &= 0.43(a - 600) + \\ &\quad 0.00035(a - 600)^2 \quad (\text{if } a > 600) \\ b &= 0 \quad (\text{if } a \leq 600) \end{aligned} \right\} (3)$$

最后,我们引入一个 TOPEX/TMR 联合降水概率指数:

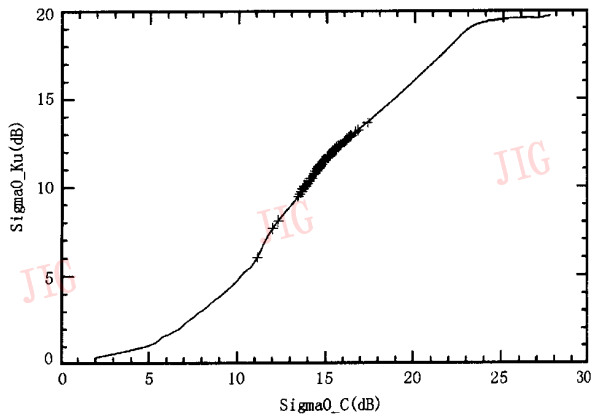
$$P_J = w_1 P_A + w_2 P_R \quad (4)$$

其中 $w_1=0.75, w_2=0.25$ 为归一化权重因子。

根据(4)式,我们在 TOPEX/TMR 数据集中判定了 71 个降雨个例($P_J \geq 1.0$), 它们的 $\sigma_{Ku}^0, \sigma_C^0$ 分布绘于如图 3(a) 所示。不出所料,所有的降雨个例均位于“标准”曲线之下,从而说明雨水的吸收会导致 σ_{Ku}^0 系统地偏低。为了补偿这一效应,我们将所有偏离点根据“标准”曲线调整至正常位置,如图 3(b) 所示。利用调整后得到的新的 σ_C^0 按下式对海面风速进行了重新计算:

$$U = \sum_{n=1}^5 a_n (\sigma_{Ku}^0)^n \quad (5)$$

其中的系数见表 3。



(b) 对(a)进行降雨效应补偿后的同步 σ_{Ku}^0/σ_C^0 对应分布图

图 3

表 3 对 Witter 和 Chelton^[6]海面风速换算表进行 5 次多项式拟合得到的回归系数

$\sigma_{k_u}^0$ 范围(dB)	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
$\sigma_{k_u}^0 < 10.8$	51.045307042	-10.982804379	1.895708416	-0.174827728	0.005438225
$10.8 \leq \sigma_{k_u}^0 < 19.6$	317.474299469	-73.507895088	6.411978035	-0.248668296	0.003607894
$\sigma_{k_u}^0 \geq 19.6$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

为了检验上述补偿方法的有效性,我们将 71 个降雨个例补偿前后的 TOPEX/JMA 同步风速绘于图 4,其精度的改善是显而易见的。经计算,它们的均方差和平均偏差分别从补偿前的 3.24m/s 和 2.98m/s 降为补偿后的 2.0m/s 和 0.43m/s。

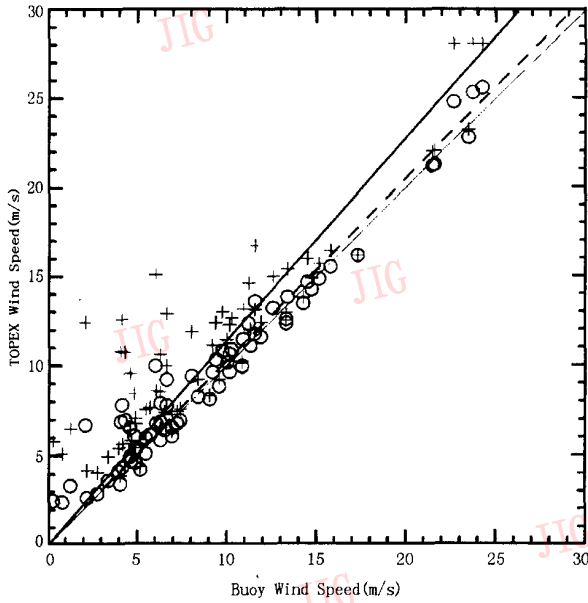


图 4 71 个降雨个例的 TOPEX/JMA 同步海面风速对应分布图

(加号和圆圈分别代表补偿修正前后的情形,粗实线和虚线为相应的线性拟合结果。细线代表 1:1 的理想情形)

4 大浪引起的系统偏差及其补偿

与降雨不同,波浪效应曾被一些研究者作为一个影响因子考虑在他们的海面风速反演算法之中^[9,11]。对于由此而带来的精度上的改善,不同的研究者说法不一。Lefevre 等^[11]认为改善是显著的,而 Glazman 和 Gresukh^[9]则认为改善的效果不甚明显。因此,发展包含有效波高因子的海面风速反演算法的必要性仍是一个有争议的问题。为了对其进行探讨,我们先来看两张图,一张是 TOPEX/JMA 同步风速之差随浮标风速的变化(图 5),另一张是 TOPEX 观测的同步海面风速与有效波高的关系(图 6)。从图 5 可以看出,高度计反演的中高风速与实测结果相比显著偏低(如图中的拟合实线所示)。

从图 6 可以看出,海面风速随有效波高的增加而增加。因此,图 5 显示的高度计风速的系统误差应当与有效波高相关。为了验证这一判断,我们将有效波高大于 3m 的测量点(不含降雨情形)的 $\sigma_{k_u}^0/\sigma_c^0$ 分布绘于图 7(a)。显然,这 270 个高海况情形确实存在明显的系统偏差。与降雨的情形相仿,我们根据“标准”关系将这些偏差调整至正常位置,如图 7(b)所示。修正后的风速其离散程度明显降低(见图 8),均方根误差亦从 2.92m/s 降为 1.95m/s。

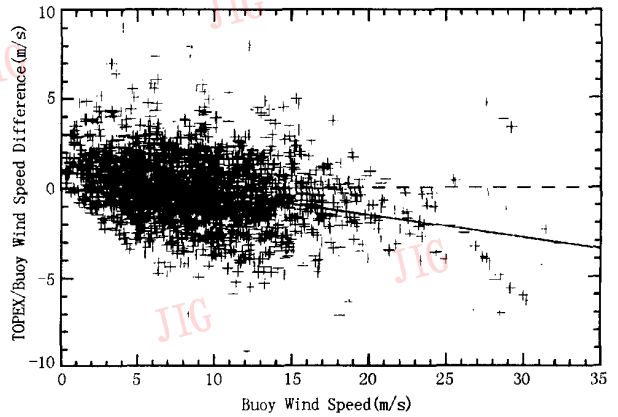


图 5 TOPEX/JMA 同步海面风速之差随浮标风速的变化(实线为最小二乘法拟合结果,虚线代表零偏差)

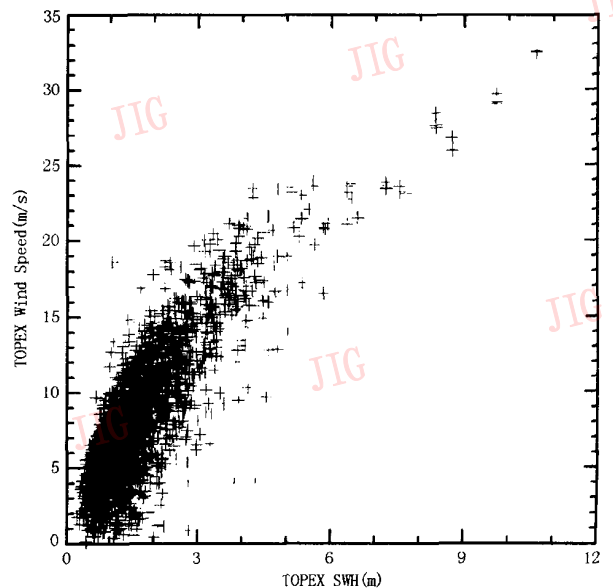
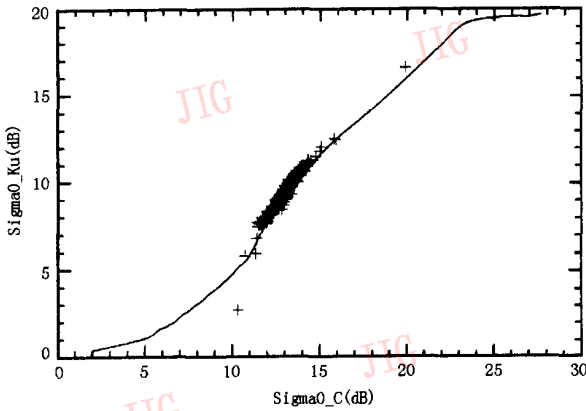
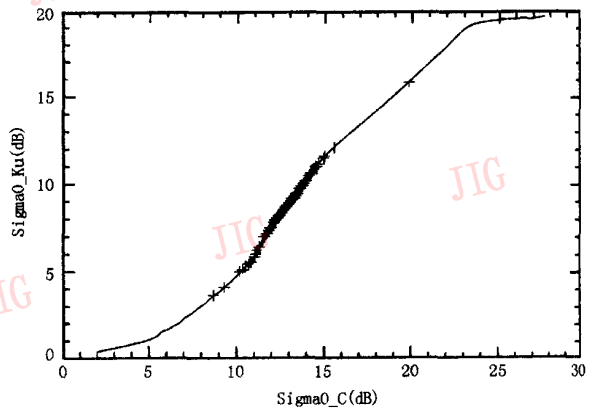


图 6 TOPEX 获取的同步海面风速与有效波高的对应分布(仅包括 TOPEX/JMA 同步数据集中的 1815 个数据)



(a) 270 个大浪个例的同步 σ_{Ku}^0/σ_C^0 对应分布图



(b) 对(a)进行大浪效应补偿后的同步 σ_{Ku}^0/σ_C^0 对应分布图

图 7

(图中实线为 σ_{Ku}^0/σ_C^0 的“标准”关系)

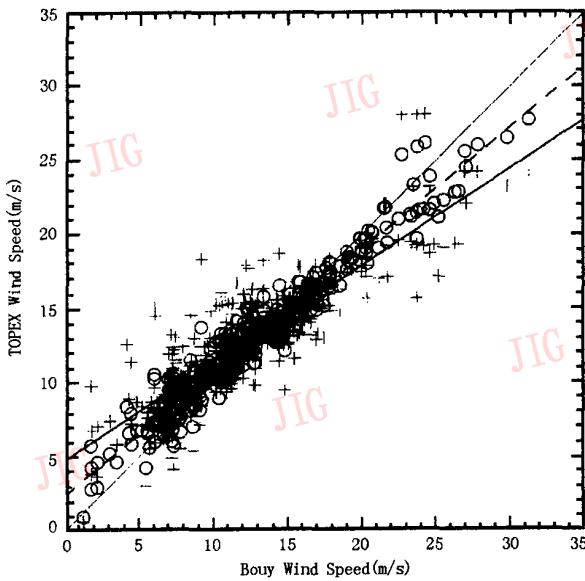


图 8 270 个大浪个例的 TOPEX/JMA 同步海面风速对应分布图

(加号和圆圈分别代表补偿修正前后的情形,粗实线和虚线为相应的线性拟合结果。细线代表 1:1 的理想情形)

5 结束语

作为总结,我们将降雨补偿和大浪补偿后的遥感风速均方差随浮标风速的变化用虚线绘于图 1 (b)。可以看出,补偿后的平均反演精度提高约 10% (均方差由 1.99m/s 降为 1.80m/s),在高风速和低风速区的改善尤为明显。

最后应当强调以下几点:

(1) 多波段技术在遥感应用中有其不可替代的

优势。随着双波段 TOPEX 卫星的发射,这一优势首次 in 高度计中得以实现,为其数据处理和应用研究开辟了新的途径。本项研究是这方面的一个初步尝试,旨在从双波段 TOPEX 数据中更为有效地挖掘海面风速特别是高风速信息。

(2) TOPEX 高度计测量的 σ_{Ku}^0 和 σ_C^0 对于各种风速具有良好的一致性和稳定性, σ_{Ku}^0/σ_C^0 相对其“标准”关系的偏离往往是由于海洋或大气中的异常扰动引起的,其偏离程度通常与扰动强度有关,利用这种关系可以对高度计反演的海面风速进行补偿修正。

(3) 本项研究的一个重要结果是提出了一种修正降雨引起的风速反演误差的有效方法,对于改善现有模式函数的反演精度具有重要意义。

(4) 我们的研究表明,有效波高在海面风速反演中是一个重要的因子,它与同步 TOPEX/TMR 风速之差和 σ_{Ku}^0/σ_C^0 的系统偏离直接相关。对此进行补偿亦可明显提高海面风速的反演精度。

参 考 文 献

- 1 Chelton D B, Hussey K J, Parke M E. Global satellite measurement of water vapour, wind speed and wave height. Nature, 1981, 294(5841):529~532.
- 2 陈 戈. 卫星高度计反演海面风速——模式函数与应用实例. 遥感学报, 1999, 3(4).
- 3 Brown G S, Stanley H R, Roy N A. The wind speed measurement capability of spaceborne radar altimeters. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1981, 6(1):59~63
- 4 Chelton D B, McCabe P J. A review of satellite altimeter measurement of sea surface wind speed: With a proposed new algorithm. Journal of Geophysical Research, 1985, 90(C3):4707~

- 4720.
- 5 Chelton D B, Wentz F J. Further development of an improved altimeter wind speed algorithm. *Journal of Geophysical Research*, 1986, 91(C12):14250~14260.
 - 6 Witter D L, Chelton D B. A Geosat altimeter wind speed algorithm and a method for altimeter wind speed algorithm development. *Journal of Geophysical Research*, 1991, 96(C5):8853~8860.
 - 7 Carter D J T, Challenor P G, Srokosz M A. An assessment of Geosat wave height and wind speed measurements. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97(C7):11383~11392.
 - 8 Wu J. Near-nadir microwave specular returns from the sea surface—Altimeter algorithms for wind and wind stress. *Journal of Physical Oceanography*, 1992, 9(10):659~667.
 - 9 Glazman R E, Greysukh A. Satellite altimeter measurements of surface wind. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98(C2):2475~2483.
 - 10 Freilich M H, Challenor P G. A new approach for determining fully empirical altimeter wind speed model functions. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(C12):25051~25062.
 - 11 Lefevre J M, Barckicke J, Menard Y. A significant wave height dependent function for TOPEX/POSEIDON wind speed retrieval. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(C12):25035~25049.
 - 12 Hwang P A, Teague W J, Jacobs G A *et al.* A statistical comparison of wind speed, wave height, and wave period from satellite altimeters and ocean buoys in the Gulf of Mexico region. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(C5):10451~10468.
 - 13 AVISO. AVISO User Handbook: Merged TOPEX/POSEIDON Products. AVI-NT-02-101-CN, 3rd, AVISO, Toulouse, France, 1996.
 - 14 Chen G, Lin H. Impacts of the collocation window on the accuracy of altimeter/buoy wind speed comparison—A simulation study. *International Journal of Remote Sensing*, 1999. (published)
 - 15 Chen G, Chapron B, Tournadre J *et al.* Global oceanic precipitation: A joint view by TOPEX and the TOPEX microwave radiometer. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(C5):10,457~10,471.
 - 16 Olsen R L, Rogers D V, Hodge D B. The aR^b relation in the calculation of rain attenuation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1978, 26(4):318~329.

Using A Dual-Frequency Adjustment Approach to Improve the Accuracy of Altimeter Retrieved Sea Surface Wind Speed

Chen Ge^{1),2)}, Fang Chaoyang²⁾ and Xu Ping²⁾

¹⁾(Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

²⁾(Ocean Remote Sensing Institute, Ocean University of Qingdao, Qingdao 266003)

Abstract Based on simultaneous measurements of Ku and C bands' radar cross sections (σ_{Ku}^0 and σ_C^0) from satellite altimetry, this paper proposes a dual-frequency approach to enhance the performance of existing wind speed algorithms, especially at high wind speeds. A simple scheme of σ_{Ku}^0/σ_C^0 adjustment is developed, assuming that altimeter measured radar cross sections of Ku and C bands follow a "standard" relationship for various wind speeds under normal conditions. Rain and significant wave height (SWH) induced systematic deviations of σ_{Ku}^0/σ_C^0 with respect to their "standard" positions are observed and corrected using the proposed scheme. Validation of our results against buoy observations suggests that the dual-frequency scheme improves the accuracy of altimeter measured sea surface wind speeds by nearly 10% compared to single frequency algorithms.

Keywords Satellite altimeter, Wind speed, Dual-frequency adjustment technique