

引用格式: Zhang Yong, Sun Qiang, Lv Daren. Overview of Sea Surface Wind Vector Retrieval Using Fully Polarimetric Microwave Signal [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2013, 28(3): 533-542. [张勇, 孙强, 吕达仁. 全极化微波信号海面风场反演技术现状与发展趋势[J]. 遥感技术与应用, 2013, 28(3): 533-542.]

全极化微波信号海面风场反演技术现状与发展趋势

张 勇^{1,2,3}, 孙 强¹, 吕达仁¹

(1. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 北京应用气象研究所, 北京 100029)

摘要:全极化微波辐射计是一种新型的被动微波遥感仪器, 可以测量海面辐射的全部 4 个 Stokes 参数, 提供了测量海面风场的一种新方法。首先介绍了国内外先进微波辐射计的技术特点及其海洋遥感应用情况, 然后描述了海面微波发射信号的变化机理, 以及海面全极化信号的风向谐波特征及其反演海面风场的优势, 归纳了全极化微波信号海面风场反演的总体技术思路和产品精度, 最后分析了全极化微波辐射计风场反演的关键技术和难点, 并对该项技术的发展进行了展望。

关 键 词:微波; 全极化; 辐射计; 海面风场; 反演

中图分类号: P 732.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2013)03-0533-10

1 引 言

星载微波辐射计为反演全球海洋和大气环境参数提供了强有力的、独特的技术手段。在微波波段上, 大气具有比可见光和红外更高的大气透过率, 微波仪器几乎能够全天候(强降水除外)、全天时地在 1~90 GHz 频率范围内透过大气中的云/气溶胶来观测占地球表面积超过 70% 的海洋表面。从 20 世纪 80 年代末期开始, 随着 SSM/I、TMI 和 AMSR-E 等一批性能优异的星载微波辐射计的陆续升空, 获取科学研究和业务应用所需的长时间序列大气海洋环境参数成为现实。

伴随着先进微波遥感仪器的不断涌现, 各种先进的海洋大气反演算法及其产品已经从研发走向成熟直至投入使用。传统微波辐射计通过测量垂直和水平极化亮温 (T_v 和 T_h), 能够提供海面风速、海面温度、盐度、水汽总量、云中液态水总量、降水率、海冰密集度和冰期等信息, 但仍然无法准确提供海面风向这个重要参数。这是因为尽管 T_v 和 T_h 中也包含风向信号, 但由于该信号是相对风向的偶函数, 仅

使用 T_v 和 T_h 无法有效地去除海面风向中的模糊度。相反, 全极化微波辐射计除测量 T_v 和 T_h 以外, 还可以测量这两个正交分量的复相关分量 U 和 V , 在电磁学上用 Stokes 参数可表示为:

$$I_s = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \frac{\lambda^2}{k_B \eta} \begin{bmatrix} \langle E_v E_v^* \rangle + \langle E_h E_h^* \rangle \\ \langle E_v E_v^* \rangle - \langle E_h E_h^* \rangle \\ 2\text{Re}\langle E_v E_h^* \rangle \\ 2\text{Im}\langle E_v E_h^* \rangle \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_v + T_h \\ T_v - T_h \\ T_p - T_m \\ T_l - T_r \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)给出了 4 个 Stokes 参数与大气热辐射电场的两个正交分量 E_h 和 E_v 的关系。其中, λ 是电磁波的波长, k_B 是 Boltzmann 常数, η 是波阻抗。 I 分量表示总的辐射功率, Q 分量表示极化差, 第 3 和第 4 个参数表示 E_h 和 E_v 互相关的实部和虚部。 I 分量可以通过对垂直极化亮温 T_v 和水平极化亮温 T_h 的测量值求和得到, Q 分量则通过对 T_v 和 T_h 求差得到, U 分量通过对 45° 线极化亮温 T_p 和 -45° 线极化亮温 T_m 求差得到, V 分量通过对左旋圆极化亮温 T_l 和右旋圆极化亮温 T_r 求差得到。全部 Stokes 参数提供了海面电磁信号特征的完整信息, 尤其是第 3 和第 4 个 Stokes 参数对风致粗糙海面的各向异性

收稿日期: 2012-07-25; 修订日期: 2012-11-28

作者简介: 张 勇(1976—), 男, 湖南湘潭人, 博士, 工程师, 主要从事卫星大气和海洋遥感研究。E-mail: yongzhang@mail.iap.ac.cn.

通讯作者: 吕达仁(1940—), 男, 江苏常熟人, 研究员, 主要从事大气与地球环境遥感、大气辐射传输、中层大气与日地物理、生态与气候相互作用的探测与理论模式等方面的研究。E-mail: ludr@mail.iap.ac.cn.

非常敏感,因此在理论上可以唯一(没有风向模糊度)确定出海面风向。

本文首先回顾了 SSM/I、AMSR-E 和 MWRI,特别是第一台全极化星载微波辐射计 WindSat 等国内外先进微波辐射计的技术特点及其海洋遥感应用的发展历程,然后在梳理海面微波发射信号变化机理、海面极化风向信号谐波特征及其海面风场反演优势的基础之上,分析和总结了地球物理模型函数的含义,以及全极化微波信号海面风场反演技术的整体思路、产品精度及其关键技术和难点,最后对微波海面风场遥感技术的发展趋势进行了展望,指出主被动遥感技术融合已经成为海面风场遥感的主要发展趋势。

2 微波辐射计海洋遥感的发展历程

一系列研究型和业务化星载微波辐射计始于 1972 年美国雨云 5 号卫星上的电子扫描微波辐射计 ESMR(Electrically Scanning Microwave Radiometer)和雨云-E 微波光谱仪 NEMS(Nimbus-E Microwave Spectrometer)。第一台具有圆锥扫描成像功能的多通道微波扫描辐射计 SMMR(Scanning Multichannel Microwave Radiometer)载于美国海洋 1 号卫星(Seasat-A)上运行了 3 个月,于 1978~1987 年运行在雨云 7 号卫星(Nimbus-7)上^[1]。虽然作为先驱者的 SMMR 由于定标性能不佳没有得出精确的定量产品,但其仍然为后续反演算法的开发和仪器的研制提供了非常宝贵的探测数据和测试基础。

美国于 1987 年 6 月发射的国防气象卫星 DM-SP(Defense Meteorological Satellite Program)特种微波辐射计 SSM/I(Special Sensor Microwave Imager),是微波辐射计发展历程中一个重要的里程碑^[2]。与 SMMR 相比,SSM/I 拥有一个稳定的外部定标系统,刈幅宽度是前者的两倍。迄今为止,作为微波辐射计经典之作的 SSM/I 一直在稳定提供着被动微波遥感数据以及海面风速、水汽总量、云中液态水总量和降水率等反演产品。只是 SSM/I 的最低频率为 19.35 GHz,无法开展海面温度反演。

1997 年 11 月,首台能够穿透云雾准确测量海面温度的微波辐射计被搭载在热带降水测量卫星 TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission)上发射升空^[3]。TRMM 微波成像仪 TMI(TRMM Microwave Imager)提供了一个史无前例的海洋观测结果,其最低频率 10.7 GHz 能够在极小的大气衰

减下提供降水以外的全天候海面观测结果,这是个非常具有应用价值的研究成果。

2002 年 5 月,A-Train 卫星编队中的 Aqua 卫星发射升空,其上搭载了 EOS 高级微波扫描辐射计 AMSR-E(Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS)^[4]。AMSR-E 不仅继承了早期被动微波遥感仪器的优点,而且与 TMI 相比具有如下优势:①增加了对较低水温更为敏感的 6.9 GHz,与 10.7 GHz 频率共同测量洋面温度、冰温度以及土壤湿度;②使用 18.7 GHz 取代 19.35 GHz 频率,以减少地表参数反演时大气的干扰;③可获取全球信息。Aqua 卫星的轨道倾角为 98°,而 TRMM 卫星轨道倾角仅 33°,集中在中低纬度;④由于位于 A-Train 编队中,AMSR-E 可以与其他不同光谱波段和探测原理的遥感仪器相结合,通过融合不同数据的优势得出更加精确和完整的反演产品,例如 AMSR-E 和 MODIS 联合反演海面温度。另外,还有一台与 AMSR-E 相类似、但多出 2 个大气温度探测频率的 AMSR 被搭载在运行寿命较短的日本 ADEOS-II 卫星上,在此不再赘述。

2009 年 11 月,欧空局发射了土壤湿度和海洋盐度卫星 SMOS(Soil Moisture and Ocean Salinity),其唯一载荷“基于合成孔径技术的微波干涉辐射计 MIRAS”(Microwave Interferometric Radiometer using Aperture Synthesis)是全球第一台采用该项技术的星载微波辐射计,并可实现对同一目标的多角度测量^[5]。2011 年 6 月发射的美国/阿根廷 Aquarius/SAC-D 卫星(宝瓶座/科学应用卫星 D)采用主—被动推扫式遥感仪器,其上搭载的微波辐射计工作在 1.4 GHz 频率上,可接收垂直极化、水平极化和第 3 个 Stokes 参数用于测量海面盐度,另外 1.2 GHz 的散射计对海面粗糙度进行测量以校正其对测盐的影响^[6]。

2012 年 5 月,搭载着高级微波扫描辐射计 2 型 AMSR2(Advanced Microwave Scanning Radiometer-2)的全球变化观测卫星—水循环系列第一颗卫星 GCOM-W1(Global Change Observation Mission-Water 1st)发射升空。作为 GCOM-W1 上的唯一有效载荷,AMSR2 的探测通道与 AMSR-E 相类似,但增加了 7.3 GHz 频率以减轻射频干扰(RFI)的影响,并且天线尺寸也增大到了 2 m^[7]。GCOM 包含两个卫星系列:水循环系列 GCOM-W(Water)和气候变化系列 GCOM-C(Climate),每个系列包括 3 个批次的卫星,计划对全球大气、海洋、

陆地和冰雪进行长达 10 ~ 15 a 的连续观测。GCOM-W1 将加入到 A-Train 卫星编队中与其他卫星展开联合观测, AMSR2 将接替已于 2011 年 10 月停止工作的 AMSR-E 的观测任务。

2002 年 12 月,我国成功发射神舟 4 号(SZ-4)飞船并获取有效对地观测数据,其主载荷为由多频段微波辐射计(MFMR)^[8]、雷达高度计和雷达散射计构成的多模态微波遥感器,实现了我国星载微波遥感零的突破。以此为开端,我国相继又开展了风云 3 号、海洋 2 号和探月工程等搭载有微波遥感仪器的轨道飞行任务。其中,我国第一颗海洋动力环境卫星—海洋 2 号(HY-2A)于 2011 年 8 月发射成功,其上搭载了微波散射计、雷达高度计、扫描微波辐射计和校正微波辐射计等 4 个微波遥感器,实现了全球海洋高精度、多要素的同步测量,可获取海面风场、海面高度、浪高、海流和海面温度等多种海洋动力环境要素^[9]。

2003 年 1 月,搭载在科里奥利(Coriolis)卫星上的 WindSat 发射升空,这标志着微波辐射计跨入了

一个崭新时代。WindSat 是第一台能够获取电磁波全部 4 个 Stokes 参数的全极化星载微波辐射计^[10],由美国国家极轨业务环境卫星系统 NPOESS(National Polar-orbiting Operational Environmental Satellite System)和美国海军联合出资建造,研制目标为通过测量来自海面的全极化微波辐射信号,全面测试和评估被动极化型微波辐射计反演海面风场(风速和风向)的能力,从而为 NPOESS 原计划于 2010 年形成业务风场反演能力的圆锥微波成像探测仪 CMIS(Conical Microwave Imager and Sounder)的研制降低风险,该项目共涉及仪器设计、算法开发、定标和验证等多个方面。与前述传统微波辐射计仅能测量大气辐射的垂直和水平极化亮温相比,WindSat 可以在 10.7、18.7 和 37.0 GHz 频率上测量大气辐射的全部 4 个 Stokes 参数,以及在 6.8 和 23.8 GHz 频率上测量大气辐射的垂直和水平极化亮温。

表 1 列举了可应用于海面风场遥感的星载微波辐射计的全部探测通道。

表 1 可应用于海面风场遥感的星载微波辐射计的探测通道
Table 1 Observation channels of spaceborne microwave radiometers applied in ocean winds remote sensing

发射年	仪器名称	卫星平台	探测频率/GHz					
			极化方式/V(垂直极化);H(水平极化);P(全极化)					
1978	SMMR	Seasat-A Nimbus-7	6.6VH	10.7VH	18.0VH	21.0VH	37.0VH	
1987	SSM/I	DMSP			19.35VH	22.235V	37.0VH	85.5VH
1997	TMI	TRMM		10.7VH	19.35VH	21.3VH	37.0VH	85.5VH
2002	MFMR	SZ-4	6.6VH	13.9H	19.35VH	23.8V	37.0VH	
2002	AMSR-E	Aqua	6.9VH	10.7VH	18.7VH	23.8VH	36.5VH	89.0VH
2003	WindSat	Coriolis	6.8VH	10.7P	18.7P	23.8VH	37.0P	
2008	MWRI	FY-3A		10.7VH	18.7VH	23.8VH	36.5VH	89.0VH
2011	SMR	HY-2A	6.6VH	10.7VH	18.7VH	23.8V	37.0VH	
2012	AMSR2	GCOM-W1	6.9/7.3VH	10.7VH	18.7VH	23.8VH	36.5VH	89.0VH

3 全极化微波信号海面风场反演的基本原理

3.1 海面微波发射信号的变化机理

海面的微波辐射与表面粗糙度有关。平静海面的微波辐射是高度极化的,但当表面粗糙度增加时,海面的辐射增加(在大于 60°入射角时,垂直极化辐射减小除外),同时极化特性减弱。海面微波发射率的这种变化存在 3 个机理^[11]。首先,波长要长于辐射测量波长的表面波混合了水平和垂直极化状态并改变了局地入射角。这种现象可以把海面模拟成由

一簇倾斜的小平面构成,每个倾斜平面都可当作一个独立的镜面。第二个变化机理是泡沫。这种空气和水的混合物会增加垂直和水平极化的发射率。第三个变化机理是波长比辐射测量波长要短的表面波(毛细波)通过布拉格散射影响海面亮温。这 3 个效应可以使用大尺度波的均方根坡度、泡沫覆盖率,以及小尺度波的均方根高度来参数化,并且每一个参数均与风速有关。

除了与风速有关,大尺度均方根坡度和小尺度均方根高度还与海面风向有关。海面坡度的概率密度函数(PDF)沿着风传播轴向倾斜,沿风方向的方

差要比横风方向的大。毛细波的均方根高度表现出明显的各向异性,沿风方向传播的毛细波振幅比横风方向的大。另外,在大尺度波上泡沫和毛细波并非均匀分布。Smith 的机载辐射计测量结果表明:一个破碎波向前运动一侧的亮温明显暖于后面一侧^[12]。此外,毛细波倾向于聚集在重力波的顺风一侧。泡沫和毛细波对其下伏结构的依赖性,导致了海面发射率在逆风和顺风方向上的不对称性。海面微波信号中呈现出的小而清晰的风向信号,即是上述风施加给海面的各种各向异性效应的叠加结果。

毛细波的各向异性,也是造成主动雷达后向散射信号与风向存在相关的原因。逆风向的雷达回波要远高于横风向的回波。同时,重力波对其上毛细波的调制效应也造成了逆风向回波普遍高于顺风向回波。这些雷达回波的方向特征已经提供了从机载和星载散射计上反演海面风向的基本原理。

3.2 海面风向信号的谐波特征

已有的理论模拟和机载测量数据^[13-17]表明: T_v 和 T_h 是 ϕ_r 的偶周期函数, U 和 V 是 ϕ_r 的奇周期函数,其中 ϕ_r 为相对风向(被定义为真实风向 ϕ_w 与微波辐射计视线方向 ϕ 之差)。可以把 Stokes 参数足够精确地傅立叶展开到 ϕ_r 的二阶谐波上:

$$\begin{cases} T_v \cong T_{v0} + T_{v1} \cos \phi_r + T_{v2} \cos 2\phi_r \\ T_h \cong T_{h0} + T_{h1} \cos \phi_r + T_{h2} \cos 2\phi_r \\ U \cong U_1 \sin \phi_r + U_2 \sin 2\phi_r \\ V \cong V_1 \sin \phi_r + V_2 \sin 2\phi_r \end{cases} \quad (2)$$

其中: T_{v0} 和 T_{h0} 为与风向无关的零阶成分,要比 U 和 V 分量大 2 个数量级,其来自海洋—大气热辐射的综合贡献,与风速和大气辐射特性强烈相关;一阶谐波系数描述了海面的逆风/顺风不对称性,而二阶谐波系数描述了海面的逆风/横风不对称性。全部谐波系数是海面风速、入射角和探测频率的函数,并与海—气温度和有效波高有关。

使用全极化微波信号反演海面风场的优势在于:① U 和 V 参数与 T_v 和 T_h 在相位上正交,这为风向信号模糊度的去除提供了非常关键、有用的信息;②与前 2 个 Stokes 参数相比, U 和 V 参数受云和对流现象等大气效应的影响较小,并且 V 参数不受 Faraday 旋转的影响;③ U 和 V 参数在方位上具备零均值特征。

使用星载和机载观测数据已经推导出了大量的经验性风向谐波系数拟合式,其中最具代表性的有:Wentz^[11]使用 SSM/I 和 NDBC 浮标匹配数据开发的 Wentz92;Yueh 等^[16]使用早期机载多极化辐射

计 WINDRAD 数据开发的 Windrad99;Meissner 和 Wentz^[18]使用 SSM/I、TMI、QuikSCAT、浮标及海温气候数据开发的 MW2002;Yueh 等^[19]为适应高风速条件下风场反演,融合了 WINDRAD 飓风机载数据、星载 WindSat 数据和 MW2002 模型开发的 Windrad05。下面简要介绍 Windrad05 风向谐波系数。

Yueh 等^[19]在开展 WindSat 风场反演时发现, T_{v1} 应该随着风速继续增加再饱和,而 T_{h2} 应该在风速大于 15 m/s 时慢慢趋于平稳。为了研究极端大风条件下海面全极化微波信号特征,美国 JPL 于 1997 年 9 月开展的 HOWE 实验中使用 WINDRAD 和 Ku 波段双极化散射计对 Erika 飓风进行了观测。机载数据表明在海面微波极化亮温中存在强烈的风向信号,即便是在风速达到 35 m/s 时也是如此。Yueh 等使用上述飓风实验中获取的高风速下 WINDRAD 机载数据、6 个月的 WindSat 星载数据以及 MW2002 模型开发了 Windrad99 的升级版—Windrad05,该经验模型不仅保持了与前期 Windrad99 的连贯性,而且能够支持 WindSat 在 3~30 m/s 风速范围内开展风场反演。Windrad05 的风向谐波系数仍然延用双指数函数来拟合成海面 10 m 高度处风速(U_{N10})的函数:

$$f(U_{N10}) = c_1 \{1 - \exp[-(U_{N10}/a_1)^{a_1}]\} + c_2 \{1 - \exp[(U_{N10}/a_2)^{a_2}]\} \quad (3)$$

4 全极化微波信号海面风场反演技术

4.1 地球物理模型函数

建立一个快速准确的地球物理模型函数(GMF)是开发反演算法(特别是物理反演算法)的关键步骤。GMF 在观测亮温 \bar{T}_b 与相关地球物理参数之间建立起了联系,如式(4)所示:

$$\bar{T}_b = F(f, p, \theta_i, \omega w, clw, T_s, \omega s, \phi_r) \quad (4)$$

其中:观测亮温 \bar{T}_b 是辐射计参数(探测频率 f 、极化状态 p 和入射角 θ_i)、大气参数(水汽总量 ωw 、云中液态水总量 clw)和地表参数(海面温度 T_s 、海面风速 ωs 和相对风向角 ϕ_r)的函数。

传统微波辐射计缺乏反演海面风向所需的第 3 和第 4 个 Stokes 通道,因此开发的 GMF 没有详细考虑风向效应(称为各向同性 GMF),只能使用 T_v 和 T_h 来反演海面风速,例如 SSM/I 和 AMSR-E。各向同性 GMF 具体的辐射传输方程可以描述为^[20]:

$$T_{bp} = T_{bup} + \tau_p T_s + \tau_r (1 + \Omega)(T_{bdown} + T_k) \quad (5)$$

该方程描述出卫星接收到的海面微波亮温由 3 部分

组成:大气的上行辐射、来自海洋表面发射信号的上行辐射以及大气和冷空间辐射的下行辐射被海面反射后的散射辐射。

通过使用类似于 Wentz 等^[20-21]开发的 SSM/I 和 AMSR-E 地球物理模型函数可以精确计算出 T_{bp} , 这个 T_{bp} 即是式(2)中的 $T_{\tau 0}$ 或 T_{h0} , 其中 p 表示 v 或 h 极化。在采用风向谐波系数拟合式计算出 一阶和二阶风向谐波系数之后, 可以利用式(2)构建考虑了海面风向效应的 GMF, 从而使用全部 4 个 Stokes 参数来实现海面风场的反演。

4.2 WindSat 风场反演基本思路和步骤

利用 WindSat 全极化信息反演海面风场总体上可分为 3 个步骤:

(1) 使用垂直和水平极化亮温通过各向同性 GMF 反演出海面风速、海面温度、水汽总量和云中液态水总量。在该步骤中, 美国海军研究实验室(NRL)使用 Rodger 的最优估值理论采用物理反演方法同时反演出上述参数^[22]; 而美国国家环境卫星数据信息中心(NESDIS)则使用多元回归经验系数对上述参数进行逐个统计反演^[23]。

(2) 使用步骤(1)反演出的各个参数以及风向初估值作为各向异性 GMF 的输入, 通过分析 GMF 模拟亮温与实测亮温之间的关系来反演海面风向。在该步骤中, NRL 仍然使用最优估值理论同时反演出包括海面风向在内的全部参数; NESDIS 使用最大似然估计技术反演出海面风向; Yueh 等^[19]使用共轭梯度法通过搜索模拟和实测亮温之间最小平方和差值(SOS)来反演海面风向。

(3) 由于风向信号的谐波特征以及 GMF 与观测数据均存在误差, 反演得出的风向解通常存在模糊度, 故借鉴散射计常用的中值滤波技术^[24]平滑最后的风场以去除某些孤立误差。通常采用第一风向解或数值模式预报结果(例如 NCEP/GDAS 数据)来初始化中值滤波器。

4.3 WindSat 风场反演性能评估

WindSat 海面风场反演的设计指标^[10]是:海面风速的准确度优于 2 m/s, 海面风向的准确度在 3~25 m/s 风速范围内优于 20°。Freilich 和 Vanhoff 使用 22 个精选的 NDBC 浮标和全球 QuikSCAT 散射计数据, 对 2 组为期 6 个月的首批 WindSat 全球风矢量数据集(NOAA 的“NESDIS0”和 NRL 的“B1”, 两者使用的 GMF、反演算法和亮温数据的版本均存在一定差别)的反演性能进行了评估^[25], 具体结果见表 2。从表 2 中可以看到:以浮标数据作

为海面风场测量的“真值”, WindSat 的风速反演精度已经达到设计指标要求, 而风向反演精度没有达到设计指标要求, 并且要弱于 QuikSCAT 散射计的风向反演精度。

表 2 WindSat 风矢量评估统计结果

匹配数据集	风速/ $m \cdot s^{-1}$	风向/ $^{\circ}$
NESDIS0-NDBC	1.43, rms	25.2, std, for 3~20 m/s
	0.23, bias	21.5, std, for 5~20 m/s
QuikSCAT-NDBC	1.22, rms	18.7, std, for 3~20 m/s
	0.05, bias	16.7, std, for 5~20 m/s
B1-NDBC	1.52, rms	23.9, std, for 3~20 m/s
	0.30, bias	21.2, std, for 5~20 m/s
NESDIS0-QuikSCAT	1.04, rms	与浮标结果整体一致

图 1 为 Wentz 等^[26]使用由 8 796 个 WindSat 和 QuikSCAT 与浮标的匹配样本绘制出的风向误差曲线, 这是 WindSat 与 QuikSCAT 之间面对面的比较。其中, 矩形加虚线为 WindSat 的结果, 圆点加虚线为 QuikSCAT 的结果。风速档的尺寸为 1 m/s, 风向差大于 90°的异常点已被剔除。从图 1 可以清晰地看出:风向的反演精度与风速强烈相关, WindSat 风向反演精度要比 QuikSCAT 稍差。当风速 < 7 m/s 时, QuikSCAT 相对于 WindSat 与浮标符合得更好; 在 3~5 m/s 风速范围内, QuikSCAT 风向反演性能明显优于 WindSat。此外, 图 1 中的虚线为 WindSat 发射之前海面风向反演的预期精度; 3~5 m/s 海面风速时为 25°, 海面风速 > 5 m/s 时为 20°。显然, QuikSCAT 曲线位于这条虚线之下, 而 WindSat 曲线当风速 < 7 m/s 时则位于这条虚线之上。

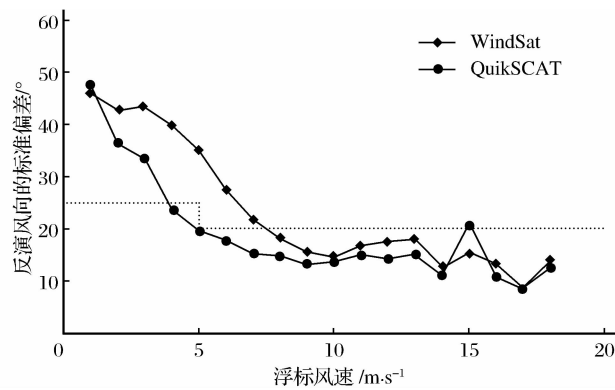


图 1 WindSat 与 QuikSCAT 与浮标之间风向差的标准偏差随浮标风速的变化曲线

Fig. 1 Standard deviation of the difference between the WindSat and buoy wind direction and the QuikScat and buoy wind direction

5 关键技术和难点分析

鉴于海面风向反演精度没有达到最初设计指标要求,目前尚不具备替换传统散射计的能力, WindSat 已经被 NPOESS 定为不合格产品而被取消后续发射计划^[27]。并且, NPOESS 计划由于管理和经费等诸多原因于 2010 年 2 月也被美国政府终止了。从 2011 年开始,美国全面启动了新一代国防气象卫星系统即“国防天气卫星系统”(DWSS)建设,其探测资料需求中目前没有包含美国海军需求很高的海面风向这个要素。以上事实说明:全极化微波辐射计海面风场反演(主要是海面风向)的技术水平距真正的业务应用需求仍然存在一定差距,下面就该项技术的关键问题和难点展开分析。

5.1 海面全极化微波辐射和散射模式

海面的微波辐射/散射主要取决于海面粗糙度,还与海面温度、海面盐度和海水介电常数有关。双尺度模式 TSM(Two Scale Model)将物理光学模式和微扰法结合起来,是目前计算海面微波发射率最完整、应用最多的模式^[28-29]。虽然 TSM 能够较好地模拟 4 个 Stokes 参数的风向各向异性,但需要人为去选择一个分界波数^[30]。另外一个问题是由不同海浪谱计算出的海面发射率存在差异,从而导致模拟出的亮温差异较大。虽然目前已经开展了大量的关于粗糙、非均匀的海面辐射动力的理论和试验研究,但仍然缺乏统一的模式能够精确定量描述出不同海洋大气条件下自然海面的微波辐射特征^[31]。最后是泡沫效应的考虑,泡沫海面相比无泡沫海面具有更高的微波发射率。由于缺乏成熟的理论研究和试验数据,目前泡沫对海面发射率的影响仍然采用经验性公式^[32],因此存在较大的不确定性。

5.2 海面风向反演的模糊度问题

由于所用 GMF 的风向谐波特征以及辐射计本身存在各种测量噪声, WindSat 通常会发生最后所选择风向并非最接近真实风向那个解的情况。图 2 为使用 Windrad05 模拟出的 WindSat 18.7 GHz 频率在 7 m/s 风速下的风向信号。图中横向虚线为 WindSat 探测通道的定标准确度需求指标,其中, T_v 和 T_h 为 0.75 K, 而 U 和 V 为 0.25 K^[10]。从图 2 可以看出,作为测量风向的主要通道 U 和 V , 其在 0° 、 180° 和 360° 相对风向这 3 个区域上, U 和 V 风向信号的振幅非常小, 已经被淹没在其定标准确度之内, 并且两个信号的振幅也非常接近。甚至 T_v 和 T_h 的风向信号全部被淹没在其定标准确度之内。

上述信号特征是出现风向反演 180° 模糊现象的主要原因。

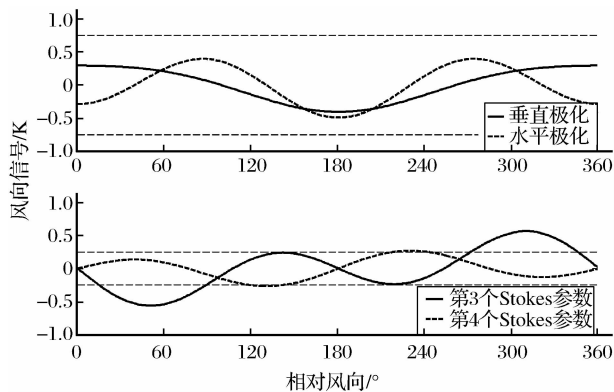


图2 风速为 7 m/s 时 18.7 GHz 的 4 个 Stokes 参数中的风向信号

Fig. 2 Wind direction signals in four Stokes parameters at 7 m/s wind speed above 18.7 GHz

目前, WindSat 采用前向刈幅的 4 个 Stokes 参数进行风向反演, 本身没有完全消除风向 180° 模糊度的能力, 仍然采用散射计常用的以 NCEP/GDAS 风场作为初值的中值滤波技术来去除风向模糊度, 与 QuikSCAT 相比并没有技术上的创新。中值滤波虽然能在一定程度上能够提高选取风向模糊解的准确性, 但只有当某区域内大部分的风向第一解就是与真实风向最接近的解, 少量风矢量单元的初始解与真实风向相差较大的情况下, 它的有效性才能显现出来。实际上, WindSat 具备对同一海面进行前—后向双视观测的能力, 这种双视观测能力有助于去除风向的模糊度。模拟研究结果表明^[33], 如果使用前—后双视观测亮温数据, 基本能够消除风向反演的 180° 模糊现象, 反演精度可以提高至 15° 。目前因为 WindSat 的后向刈幅仅为前向刈幅宽度的 $1/3$, 大部分反演算法只使用了前向刈幅数据。

5.3 全风速和全天候的风场反演问题

5.3.1 低/高风速条件下的风向反演

全极化微波辐射计在低风速条件下风向的反演精度较差。图 3 为使用 Windrad05 模拟出的 WindSat 在 18.7 GHz 频率上风向信号的一、二次谐波系数随风速的变化情况。从图 3 可以看出风向信号在低风速时非常小; 当风速为 7 m/s 时, T_{v1} 、 T_{h1} 、 U_1 、 V_1 和 T_{v2} 、 T_{h2} 、 U_2 、 V_2 分别只有 0.3495 K、0.1020 K、-0.2315 K、-0.0960 K 和 -0.0576 K、-0.3910 K、-0.3925 K、0.1974 K; 当风速低于 7 m/s 时, 风向谐波系数将更小。如此小的风向信号对 WindSat 的仪器定标和噪声控制提出了更高

的要求。现阶段,全极化微波辐射计的仪器噪声很难控制在低风速下风向信号所能容忍的误差范围之内,再加上 GMF 的模拟误差和大气衰减效应,风向信号往往被淹没而难于提取。因此,低风速下风向反演距离 20° 的精度要求还相差较远。但是,从另外一个角度来看, WindSat 风向信号的振幅整体上

随着风速的增加而增加,并且在高风速下并没有出现饱和现象,即便是在 40 m/s 的大风条件下,这恰好是全极化微波辐射计测量海面风向的优势之一,因为在从小尺度的风暴和飓风到全球尺度的海气交换和海洋环流等各种风场数据的应用上,中—高风速下数据的重要性通常要强于低风速下数据。

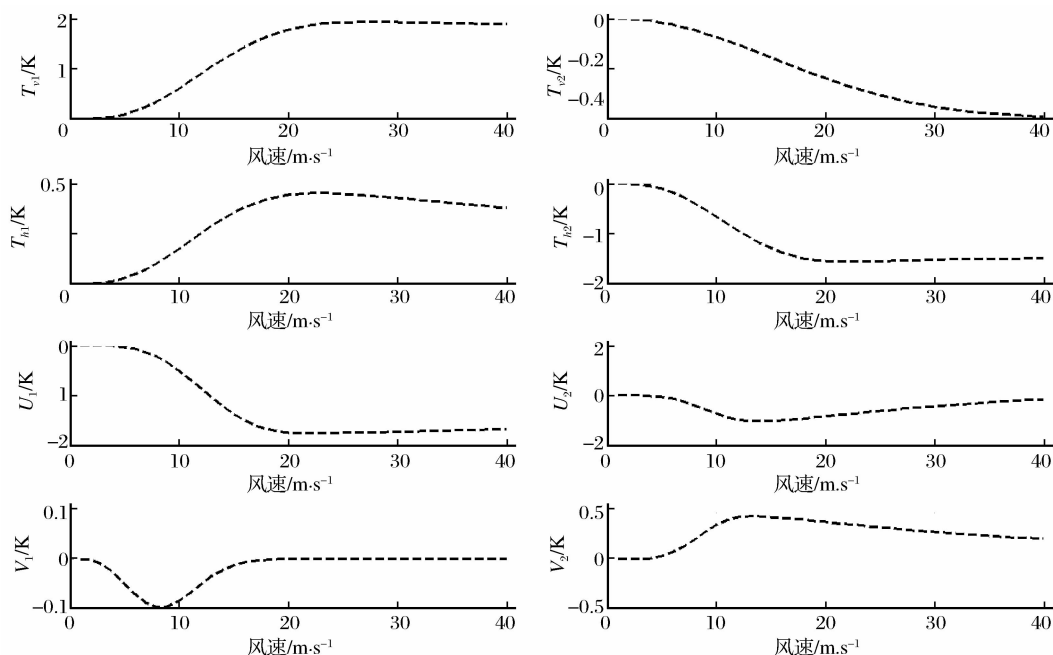


图3 风向信号的一、二次谐波系数随风速的变化

Fig. 3 Wind direction harmonic coefficients as functions of wind speed above 18.7 GHz

5.3.2 恶劣天气条件下(强风和降水)的风场反演

在恶劣的天气条件下,准确反演风矢量存在的难度主要有4个原因^[34]:①在高风速条件下,海面不再与风速简单相关。此时在海面上产生的破碎波浪及与之相关的白浪和浪花,会影响卫星对海面信号的响应;②现有的物理模型函数和风场反演算法,基本上均是针对最常见的中等风速条件;③极端天气条件通常与云和降水相伴,这些也会污染卫星信号,并且这种干扰随着观测频率的增加而增强。Freilich 和 Vanhoff^[25]曾经如此定论过:“在暴雨条件下准确反演风场根本不可能”。不仅大气中的雨滴会吸收和散射卫星信号,而且雨滴落到海面上还会影响海面粗糙度;④在高风速条件下,风速在卫星足迹内变化会很大,而反演是在足迹范围内的一个平均效应,因此极端风速会由于这种平滑效应经常被丢失。

尽管如此,国际上仍然开展了大量此类研究工作。Meissner 和 Wentz^[31]使用 WindSat 和 SSM/I 亮温数据开发了一个适用于 $6\sim 90 \text{ GHz}$ 频率范围、

$0\sim 65^\circ$ 入射角时的海面发射率计算模型函数。该模型适用的最大风速高达 40 m/s ,将成为当前和将来星载和机载海面风场反演中的一个有用工具。Meissner 和 Wentz^[35]还通过选择对风速非常敏感但对降水不够敏感的通道组合,开展了 WindSat 在降水条件下的海面风场反演工作。但需要指出的是,较长的波长虽然对降水不敏感,但是该波长决定了与风速相关性最强的厘米级海面粗糙度之间的敏感性也同样降低了,这也是欧空局(ESA)坚持使用波长较长的 C 波段散射计,而美国航天局(NASA)坚持使用波长较短的 Ku 波段散射计的主要原因。

5.4 全极化微波遥感数据的定标问题

就全极化微波辐射计海面风场反演而言, T_h 主要包含海面风速信息, T_v 用于校正大气影响, U 对于海面风向敏感, V 用于去除风向反演的模糊度。由于海面风向信号比传统微波辐射计观测的典型信号振幅要小两个数量级,因此全极化辐射计的定标指标比传统辐射计要求更严格。风向反演的误差主要来自对全部4个 Stokes 参数的测量误差(主要包

括定标误差和辐射计噪声),其中随机的仪器噪声无法去除,因此全极化辐射计的定标误差会对风向反演的精度产生重大影响。从前述分析中可以看到,就风速为 7 m/s 时的风向反演而言, WindSat 提出的 0.75/0.25 K 定标准确度明显偏高,详见图 2。如果是低于 7 m/s 下的风速条件,则对定标准确度要求更高,详见图 3。模拟研究结果表明^[33]:对于 7 m/s 以上的风速,反演的风向精度如果要达到 20°,必须把第 3 个 Stokes 参数测量误差控制在 0.2 K 以内,第 4 个 Stokes 参数测量误差控制在 0.15 K 以内。

6 结 语

全极化微波辐射计是一种新型的微波遥感仪器,它在传统微波辐射计的基础之上进一步提取观测目标的极化信息,实现了在微波遥感中对电磁波的频率、相位、振幅和极化等全部信息的利用。与主动型测风遥感仪器散射计相比,全极化微波辐射计除了可以反演出海面风场(风速和风向)以外,还可以同时获取海面温度、水汽总量、云中液态水含量和降水率等参数。尽管作为 NPOESS/CMIS 计划中的原理验证仪器 WindSat 在风向测量精度上没有达到预期的设计目标,与 QuikSCAT 测风结果仍然存在一定差距(特别是在低风速条件下),但作为被动微波遥感中的一项新技术,随着硬件技术和数据处理方法的不断突破,全极化微波辐射计将可能会在未来大气海洋遥感领域中发挥积极作用。

最后从将要发射的“拓展的海面风矢量卫星”XOVWM(the Extended Ocean Vector Winds Mission)入手分析未来星载海面风场反演技术的发展趋势。预计 2013 年发射的 XOVM 是一个全新的观测计划,其融合了 QuikSCAT、WindSat 和 SAR 的成熟技术,可提供更高的空间分辨率和全天候、全风速范围条件下的海面风场测量结果^[36]。在传感器配置上,XOVWM 针对 Ku 波段散射计增加了合成孔径雷达数据处理能力,使散射计的空间分辨率达到 5 km,完全适用于监测近海岸风场和小尺度风暴;XOVWM 还增加了 C 波段散射计和 X 波段极化辐射计,一方面通过融合 Ku 波段与 C 波段的优势来反演各种风速下的风矢量,并显著减小降雨对后向散射系数的衰减;另一方面 X 波段辐射计可提供丰富的降雨信息,使 XOVM 具有综合使用主/被动传感器在恶劣天气条件下反演风场的能力,同时辐射计提供的极化信息还可帮助散射计去除风向

模糊度,从而使散射计不再需要数值天气预报模式提供的风向信息而独立进行风场反演。由此可见,星载海面风场反演技术正朝着高空间分辨率、全天候和全风速覆盖的更高目标前进,主/被动遥感技术融合已经成为主要发展趋势,通过把不同探测机理和遥感技术的数据有机融合起来,有效提高海面风场乃至整个海洋遥感的测量精度和应用效果。

参考文献(References):

- [1] Njoku E G, Stacey J M, Barath F T. The Seasat Scanning Multichannel Microwave Radiometer (SMMR): Instrument Description and Performance[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1980, OE-5: 100-115.
- [2] Hollinger J P, Peirce J L, Poe G A. SSM/I Instrument Evaluation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1990, 28(5): 781-790.
- [3] Kummerow C D, Simpson J J, Thiele O W, et al. The Status of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) after Two Years in Orbit[J]. Journal of Applied Meteorology, 2000, 39(12): 1965-1982.
- [4] Ascroft P D, Wentz F J. AMSR Level 2A Algorithm[R]. Remote Sensing System, Santa Rosa, CA, RSS Technical Report 121599B-1, 2000.
- [5] Kerr Y H, Waldteufel P, Wigneron J P, et al. The SMOS Mission: New Tool for Monitoring Key Elements of the Global Water Cycle[J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 98(5): 666-687.
- [6] Le Vine D M, Lagerloef G S E, Torrusio S E. Aquarius and Remote Sensing of Sea Surface Salinity from Space[J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 98(5): 688-703.
- [7] Oki T, Imaoka K, Kachi M. AMSR Instruments on GCOM-W1/2: Concepts and Applications[C]//IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, Honolulu, 2010: 1363-1366.
- [8] Zhang Shengwei, Jiang Jingshan, Wang Zhenzhan, et al. Multi-frequency Microwave Radiometer on “SZ-4” Spaceship and Its Applications[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2005, 20(1): 68-73. [张升伟, 姜景山, 王振占, 等. 神舟 4 号飞船多频段微波辐射计及其应用[J]. 遥感技术与应用, 2005, 20(1): 68-73.]
- [9] National Satellite Ocean Application Service. Introduction of HY-2, 2011 [EB/OL]. <http://www.nsoas.gov.cn/HY2AZhuanti/HY2A/hy202.html>. [国家卫星海洋应用中心. 海洋二号卫星介绍, 2011[EB/OL]. <http://www.nsoas.gov.cn/HY2AZhuanti/HY2A/hy202.html>.]
- [10] Gaiser P W, Germain K S, Twarog E M, et al. The WindSat Spaceborne Polarimetric Microwave Radiometer: Sensor Description and Early Orbit Performance[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(11): 2347-2361.
- [11] Wentz F J. Measurement of Oceanic Wind Vector Using Sat-

- ellite Microwave Radiometers[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30(5): 960-972.
- [12] Smith P M. The Emissivity of Sea Foam at 19 and 37 GHz [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1988, GE-26: 541-547.
- [13] Yueh S H, Nghiem S V, Kwok R, *et al.* Polarimetric Thermal Emission from Periodic Water Surfaces[J]. Radio Science, 1994, 29(1): 87-96.
- [14] Yueh S H, Wilson W J, Li F K, *et al.* Polarimetric Measurements of Sea Surface Brightness Temperatures Using an Aircraft K-Band Radiometer[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1995, 33(1): 85-92.
- [15] Yueh S H, Wilson W J, Li F K, *et al.* Polarimetric Brightness Temperatures of Sea Surfaces Measured with Aircraft K- and Ka-Band Radiometers[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(5): 1177-1187.
- [16] Yueh S H, Wilson W J, Dinardo S, *et al.* Polarimetric Microwave Brightness Signatures of Ocean Wind Directions[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(2): 949-959.
- [17] Piepmeier J R, Gasiewski A J. High-resolution Passive Polarimetric Microwave Mapping of Ocean Surface Wind Vector Fields[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(3): 606-622.
- [18] Meissner T, Wentz F J. An updated Analysis of the Ocean Surface Wind Direction Signal in Passive Microwave Brightness Temperatures[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(6): 1230-1240.
- [19] Yueh S H, Wilson W J, Dinardo S J, *et al.* Polarimetric Microwave Wind Radiometer Model Function and Retrieval Testing for WindSat[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(3): 584-596.
- [20] Wentz F J. A Well-calibrated Ocean Algorithm for SSM/I[J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(C4): 8703-8718.
- [21] Wentz F J, Meissner T. AMSR Ocean Algorithm, Version 2, Algorithm Theoretical Basis Document[R]. Remote Sensing System, Santa Rosa, CA, RSS Technical Report, 121599A-1, Nov. 2000.
- [22] Bettenhausen M H, Smith C K, Bevilacqua R M, *et al.* A Non-linear Optimization Algorithm for WindSat Wind Vector Retrievals[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(3): 597-610.
- [23] Jelenak Z, Mavor T P, Connor L, *et al.* Validation of Ocean Wind Vector Retrievals from WindSat Polarimetric Measurements[C]//Proceedings SPIE 5656, Active and Passive Remote Sensing of the Oceans, Bellingham, 2005.
- [24] Shaffer S J, Dunbar R S, Hsiao S V, *et al.* A Median-filter based Ambiguity Removal Algorithm for NSCAT[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1991, 29(1): 167-174.
- [25] Freilich M H, Vanhoff B A. The Accuracy of Preliminary WindSat Vector Wind Measurements: Comparisons with ND-BC Buoys and QuikSCAT[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(3): 622-637.
- [26] Wentz F J, Meissner T, Smith D K. Assessment of the Initial Release of WindSat Wind Retrievals[R]. Remote Sensing System, Santa Rosa, CA, RSS Technical Report 010605, 2005.
- [27] Jiang Xingwei, Song Qingtao. Satellite Microwave Measurements of the Global Oceans and Future Missions[J]. Review of Science and Technology, 2010, 28(3): 105-111. [蒋兴伟, 宋清涛. 海洋卫星微波遥感技术发展现状与展望[J]. 科技导报, 2010, 28(3): 105-111.]
- [28] Lyzenga D R. Comparison of WindSat Brightness Temperatures with Two-Scale Model Predictions[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(3): 549-559.
- [29] Johnson J T. An Efficient Two-scale Model for the Computation of Thermal Emission and Atmospheric Reflection from the Sea Surface[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(3): 560-568.
- [30] Wang Zhenzhan. Sea Surface Wind Vector Measured by Polarimetric Microwave Radiometer—Principle, System Design, and Simulation Study[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2005. [王振占. 海面风场全极化微波辐射测量—原理、系统设计与模拟研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2005.]
- [31] Meissner T, Wentz F J. The Emissivity of the Ocean Surface between 6 and 90 GHz over a Large Range of Wind Speeds and Earth Incidence Angles[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(8): 3004-3026.
- [32] Padmanabhan S, Reising S C, Asher W E, *et al.* Effects of Foam on Ocean Surface Microwave Emission Inferred from Radiometric Observations of Reproducible Breaking Waves[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(3): 569-583.
- [33] Liu Jingyi. Research on Problems of Polarimetric Microwave Radiometer Calibration and Wind Vector Retrieval[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2007. [刘璟怡. 全极化微波辐射计定标和风场反演若干问题研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2007.]
- [34] Quilfen Y, Prigent C, Chapron B, *et al.* The Potential of QuikSCAT and WindSat Observations for the Estimation of Sea Surface Wind Vector under Severe Weather Conditions[J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112(C09023): 49-66.
- [35] Meissner T, Wentz F J. Wind Vector Retrievals under Rain with Passive Satellite Microwave Radiometers[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(9): 3065-3083.
- [36] Rodriguez E, Gaston R W, Durden S L, *et al.* A Scatterometer for XOVWM, the Extended Ocean Vector Winds Mission [C]//Radar Conference, 2009 IEEE, Pasadena, 2009: 1-4.

Overview of Sea Surface Wind Vector Retrieval Using Fully Polarimetric Microwave Signal

Zhang Yong^{1,2,3}, Sun Qiang¹, Lv Daren¹

(1. *Institue of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*
3. *Beijing Institute of Applied Meteorology Research, Beijing 100029, China*)

Abstract: With the launch of the WindSat instrument on the Coriolis spacecraft on January 6, 2003, a new era in microwave radiometer began. WindSat is the first fully polarimetric spaceborne microwave radiometer. Fully polarimetric microwave radiometer is a new passive remote sensing instrument, which can measure the whole of four Stokes parameters of sea surface radiation, providing a new technique for sea surface wind vector measurement. In the first place, some instrument characteristics and application in ocean remote sensing for some advanced spaceborne microwave radiometers in the world are introduced in this paper. The radiometers include SSM/I, TMI, AMSR-E, AMSR2 and WindSat. Secondly, the variation mechanism of microwave emission signals from ocean is reviewed, and wind direction harmonics of polarimetric signals from wind-induced roughened sea surface and their advantages in wind vector retrieval are discussed. Finally, the main ideas of retrieval accuracy and difficulties of sea surface wind vector retrieval technique using fully polarimetric microwave signal are summarized in detail, and development direction of this technique is prospected.

Key words: Microwave; Fully Polarimetric; Radiometer; Ocean Wind Vector; Retrieval