

# 全极化微波辐射计遥感海面风场的关键技术和科学问题

王振占, 姜景山, 刘璟怡, 殷晓斌

(中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190)

[摘要] 全极化微波辐射计是一种新型的微波遥感器, 它不但测量目标微波辐射信号的两个正交极化分量, 并且测量两个正交极化分量的复相关量。这些相关信息对于表面微波辐射的各向异性更加敏感, 这样就提供了测量海面风场的一种手段。

文章在介绍国内外全极化微波辐射计现状和特点的基础上, 首先对于全极化微波辐射计遥感海面风场的原理及其影响因素进行分析; 然后, 从全极化微波辐射计的硬件设计和定标两个方面论述了硬件实现的关键技术问题; 最后, 对于风场反演的有关科学问题进行分析, 重点论述了风场反演算法建立的关键, 主要技术指标对于风场反演误差的影响, 风向模糊性问题的原因以及从数据处理和扫描机制的角度分析如何消除模糊性问题。

[关键词] 全极化微波辐射计; 风场反演; 全极化定标

[中图分类号] V55 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2008)06-0076-11

## 1 前言

微波辐射计是一种被动微波遥感器。它通过接收被测目标的微波辐射来研究目标的地球物理特性。微波辐射计测量海面风速的基本原理是粗糙海面的电磁散射强度与粗糙度相关, 从而海面的辐射功率和辐射亮温也与粗糙度有关; 由于海面风速的大小决定了海面风场驱动下所形成的毛细波的幅度, 从而决定了风场作用下的海面粗糙度, 所以风场作用下粗糙海面的辐射亮温与海面风速的大小具有一定的相关关系, 这样就可以通过对海面亮温的测量来反演海面风速的大小。

微波辐射计用于海面风速的测量已经有很长的历史。传统的微波辐射计, 可以测量海面风速, 但是不能确定准确的风向。早期的星载微波辐射计进行海面风速测量通常使用水平和垂直极化方式, 认为

风成海面的微波辐射是各向同性的, 反演海面风速的准确度约为  $\pm 2$  m/s。在国际上, 全极化微波辐射计是 20 世纪 90 年代中后期才发展起来的一种新型微波遥感技术<sup>[1-3]</sup>。在电磁学上用 Stokes 矢量完整地描述目标的微波辐射特性, 用亮温表示的电磁场 4 个斯托克斯 (Stokes) 参数为

$$\bar{T}_B = \begin{bmatrix} T_v \\ T_h \\ T_u \\ T_v \end{bmatrix} = \frac{\lambda^2}{\eta\delta} \begin{bmatrix} |E_v|^2 \\ |E_h|^2 \\ 2\text{Re}\{E_v E_h^*\} \\ 2\text{Im}\{E_v E_h^*\} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中:  $T_B$  是亮度温度,  $E_v, E_h$  分别是垂直和水平方向的辐射电场的复振幅,  $\lambda$  是波长,  $\eta$  是波阻抗,  $\delta = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{JK}^{-1}$  是 Boltzmann 常数 (本文 K 为开尔文温度)。传统的微波辐射计测量的是目标微波电磁辐射亮温  $\bar{T}_B$  的前两个正交的极化分量  $T_v$  和  $T_h$ ,

[收稿日期] 2008-03-12; 修回日期 2008-04-22

[作者简介] 王振占 (1969-), 男, 河北青龙县人, 理学博士, 中国科学院空间科学与应用研究中心研究员。主要从事微波遥感新技术及应用技术研究, 其中包括全极化微波辐射测量技术研究, 海洋大气参数的反演应用研究, 微波遥感器的定标、检验技术研究以及太赫兹大气探测机理研究等。E-mail: wzz@nmrs.ac.cn

而全极化微波辐射计不但测量目标微波辐射信号的两个单一的正交极化分量,并且测量这两个正交极化分量的复相关量,即在传统微波辐射计功率幅度测量的基础上,进一步测量其相关信息。这些相关信息对于表面微波辐射的各向异性更加敏感。两个正交极化亮温是相对风向的偶函数,两个交叉相关分量是相对风向的奇函数,这样就提供了测量海面风场的一种新的手段。全极化微波辐射计的研究和发展,实现了人们在微波遥感中对电磁波频率、相位、幅度和极化的全部信息的利用,可以获得传统微波遥感器所不能得到的更多的目标信息。全极化微波辐射计最重要的应用是可以进行海面风场(包括风速和风向)的测量。另外,还可以获得大气云水含量、水汽含量和海表温度等参数,这是微波散射计测量的海面风场所不具备的特性。

## 2 全极化微波辐射计遥感海面风场的原理及其影响因素分析

### 2.1 海面微波辐射的基本原理

海面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。而当表面粗糙度增加时,表面的辐射增加(除了在入射角大于 $60^\circ$ 时垂直极化的微波辐射减小),同时极化特性减弱。海洋表面的粗糙效应影响海水的辐射和散射特性。当风速低于 $7\text{ m/s}$ 时,风浪使海面粗糙度增加,称为海面粗糙效应;当风速继续增大(一般大于 $7\text{ m/s}$ )时,出现波浪破碎,形成白沫,称为浪花效应。当风速增大到 $25\text{ m/s}$ 时,白沫覆盖可占海水面积的 $30\%$ 以上。无论风浪表面还是白沫表面,都会使海面的发射率增加,亮温变化可达 $30\text{ K}$ 以上。海面微波辐射率的变化机理包括3个方面<sup>[4]</sup>: a. 波长比辐射波长长的表面波混合水平和垂直极化状态,改变局部入射角。根据这种现象可以用所谓的大尺度模型来模拟,即把表面看成是一簇倾斜的小平面组成,而每个小倾斜表面的辐射可以近似为平面辐射。b. 与辐射波长相当或者比辐射波长小的表面波(毛细波)通过Bragg散射影响海面亮温。这是利用远离天底点进行散射测量的依据。因为Bragg散射对于辐射测量来说,所有的入射角都很重要,而对散射测量来说,只有入射角大于 $20^\circ$ 时,Bragg散射的影响才是重要的。c. 海面泡沫的影响。空气和水的混合物可增加水平和垂直极化的发射率,从而影响观测的海面亮温。这3个影响因素可以用大尺度波均方根坡

度、泡沫覆盖率和小尺度波均方根高度3个参数表示。这3个参数除了与风速有关外,大尺度均方根坡度和小尺度均方根高度还与风向有关。海面坡度的概率密度函数(pdf)沿着风传播轴向倾斜,在沿风方向方差比横风方向的大。毛细波的均方根高度表现出明显的各向异性,在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<sup>[5]</sup>用航空辐射计测量的结果表明:一个破碎波向前运动一侧的亮温发射明显比后面一侧的高,毛细波多聚集在较大重力波的沿风一侧。泡沫和毛细波对下伏结构的依赖性使得海面的发射率在顺风 and 逆风向表现出不均衡分布。

辐射亮温的Stokes参数随方位角的变化可以用二次谐波模型逼近;同时第三分量 $T_u$ (复相关实部)和第四分量 $T_v$ (复相关虚部)的谐波满足正交特性,可以用来实现对风向反演的去模糊处理<sup>[6]</sup>。Stokes参数与海面风场矢量的关系为

$$\begin{aligned} T_h &\approx T_{h0} + T_{h1} \cos\varphi + T_{h2} \cos 2\varphi \\ T_v &\approx T_{v0} + T_{v1} \cos\varphi + T_{v2} \cos 2\varphi \\ T_u &\approx T_{u1} \sin\varphi + T_{u2} \sin 2\varphi \\ T_v &\approx T_{v1} \sin\varphi + T_{v2} \sin 2\varphi \end{aligned} \quad (2)$$

这里 $\varphi$ 是相对风向, $T_h$ 和 $T_v$ 是 $\varphi$ 的偶函数, $T_u$ 和 $T_v$ 是 $\varphi$ 的奇函数。 $T_{h0}, T_{v0}$ 是海面风速、海水温度、盐度、大气水汽含量和液水含量等各种海洋和大气参数的函数; $T_{h1}, T_{h2}, T_{v1}, T_{v2}$ 是海面风速的函数,也是正交微波辐射亮温中风向信号大小的决定因素。 $T_{u1}, T_{u2}, T_{v1}, T_{v2}$ 是大气透过率、海面风速等参数的函数。 $T_h$ 和 $T_v$ 的风向变化是同相的,在风向反演中会产生4选模糊。 $T_u$ 和 $T_v$ 关于风向的零均值特性,同时与 $T_h$ 和 $T_v$ 相差 $90^\circ$ ,通过准确测量这两个参数,可以消除风向确定中的多值模糊。另外, $T_u$ 分量的方位变化受云雨的影响也比其他分量小, $T_v$ 不受Faraday旋转的影响<sup>[7]</sup>。这样从理论上也证明了全极化微波辐射计用于风场反演的优越性。

### 2.2 海面全极化微波辐射和散射模式及影响因素分析

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、海水介电常数有关。理论上粗糙表面的发射率可以通过计算所有入射到表面上平面波所携带能量被表面吸收的多少来得到。计算的方法有间接和直接两种方法:间接方法是根据能量守恒定律,吸收等于入射波能量减去总散射的能量;直接方法是直接计算通过表面的坡印亭矢量的通量。间

接发射率模式(如物理光学类型模式 PO, 微扰法 SPM, 双尺度组合模式 TSM)之间的主要区别是使用双站散射系数模式的理论方法不同。直接的方法主要指小坡度近似(SSA)的方法,它在将 SPM 应用于海面发射率计算时,生成一个用表面坡度而不是用高度表示的数列,这样就解决了微扰法不能计算大高度起伏表面散射的困难。双尺度组合模式 TSM 将物理光学模式 PO 和微扰法 SPM 结合,是目前计算海面微波辐射的最完整、应用最多的模式。SSA 模式解决了 SPM 计算海面辐射时存在的问题,可以应用于由于海面高度限制不能使用 SPM 的范围。

在应用各种模式进行比较的时候,要注意模式本身的有效范围。一般来讲,类光学的模式适用于低风速条件,并且随着入射角和频率的不同而不同。TSM 很好地模拟了 4 个 Stokes 参数的风向各向异性,但是需要选择一个分界波数。而这个参数的选取有一定的人为特点<sup>[8]</sup>。SSA 在不大于 25 m/s 的风速范围都可以很好地模拟风向的方位变化,虽然二阶 SSA 不能捕捉海面逆风-顺风的差异,但是由于 SSA 不需要选择一个分界波数,因此可以利用整个范围的波谱进行模拟<sup>[9]</sup>。

通过模式的比较我们发现目前的模式之间存在很大差异。TSM 成功地模拟了风向的方位变化,并且得出准确的 4 个 Stokes 参数,但是它是和 Y-spectrum 波谱<sup>[9]</sup>捆绑在一起的。不同波谱模拟产生的发射率不同,进而导致亮温的差异很大。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,但是尚没有一种统计的、可靠的模式能够同时描述不同水文气象条件下自然海面的、真实的时空动态变化和微波辐射谱特征。

在进行理论模拟的时候,除了考虑表面的粗糙度影响以外,另外一个重要因素是泡沫的影响。许多实际观测和理论的研究结果表明,泡沫表面比无泡沫表面具有更高的微波发射率,并且泡沫覆盖率随风速的增加而增大,因而亮温随之升高,并且泡沫的影响至少与粗糙表面的影响量级相同。最近, Rose<sup>[10]</sup>用 NRL 的两个频率(10.8 GHz, 36.5 GHz)全极化辐射计测量水平极化、垂直极化、+45°极化、-45°极化、左园极化、右园极化的泡沫发射率。他们发现,对于这两个频率来讲,垂直极化泡沫发射率大于 0.9,并且在 30°~60°入射角范围内近似为一个常数。水平极化随着入射角增大而逐渐减小。而 +45°极化、-45°极化、左园极化、右园极化的泡

沫发射率非常一致,近似等于水平极化和垂直极化发射率的平均值。

我们在多种模式比较的基础上,针对海面极化微波辐射 4 个 Stokes 参数的特点,依据 TSM 模式对海面全极化微波辐射/散射模式进行讨论,研究了两尺度模型中的若干参数对模型计算结果的影响,提出了提高两尺度模型准确性和计算速度等方面的方法,同时结合实际风场反演的应用在方法的实用性上考虑<sup>[11]</sup>。通过对国外最新模型的修正,并使用最新全极化辐射计经验模型 Windrad05 进行比较,证明了修正的模型提高了模型的准确度,同时保持了原模型的快速运算能力。此外分析了各种参数对于 Stokes 参数的影响<sup>[12]</sup>。

1) 泡沫对水平极化  $T_h$  和垂直极化亮温  $T_v$  的影响比较明显,增加了海面辐射亮温,泡沫对第三个和第四个 Stokes 向量  $T_u, T_v$  的影响不大,泡沫对 Stokes 向量第一和第二调和系数随风速变化的幅度值影响不大。Windrad05 模型表明亮温随风向变化的幅度值在高风速下(一般在 10~15 m/s)趋于饱和,显然泡沫并不是最主要的原因;

2) 双尺度模式中分界波数  $k_d$  的取值与海面波谱  $W_s(k)$  和“远小于 1”定义的标准有关,这里  $k$  为波数。不同文献对于双尺度模式中  $k_d$  的选择是不同的<sup>[9]</sup>,范围从  $k_0/1.5 \sim k_0/40$ ,  $k_0$  是辐射计频率对应的电磁波波数。除  $T_{h2}$  和  $T_{v1}$  的变化幅度随  $k_d$  的增加先增大后减小以外,其他各调和系数均随  $k_d$  的增加而减小。 $k_d$  随风速的增大而增大<sup>[13]</sup>,这在一定程度上解释了第一和第二调和系数在高风速情况下趋于饱和的特性。

基于上述参数对双尺度模型计算结果影响的相关分析,得出一组关于理论计算海面微波辐射/散射模式的参数选取方法<sup>[10]</sup>:

首先,海面波谱 Durden - Vesecky 谱模型的振幅  $a_0 = 0.008$ 。波数谱  $S(k)$  表达式如下:

$$S(k) = a_0 k^{-3} (b k u_*^2 / g)^{\text{alog}_{10}(k/2)} \quad u_* < 0.51$$

$$S(k) = a_0 k^{-3} [b k (u_* e^{-(u_* e - 0.51)})^2 / g]^{\text{alog}_{10}(k/2)}, \quad u_* \geq 0.51 \quad (3)$$

其次,分界波数  $k_d = k_0 / (5 - 2 \times U_{10}/10)$ 。 $k_0$  是辐射计频率对应的电磁波数。另外,水动力调节因子  $h$  计算公式如下:

$$h = \begin{cases} 1 - 0.05 \cdot U_{10} \cdot \text{sgn}(S_x) & |S_x/S_u| > 1 \\ 1 - 0.05 \cdot U_{10} \cdot S_x/S_u, & |S_x/S_u| \leq 1 \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $U_*$  为风摩擦速度,  $u_{10}$  为 10 m 高处风速。使用该组参数, 高效双尺度模型的调和系数随风向变化的结果很好地符合 Windrad05 模型结果。修正的模型提高了模型的准确度, 同时保持了原模型的高速运算能力。这对于风场反演的实际应用具有重要的意义。

### 3 全极化微波辐射测量的关键技术问题

#### 3.1 硬件设计的关键技术问题

由于海面风场的方向引起的微波辐射亮温的方位角变化的幅度很小, 所以进行海面风场方向的测量要求微波辐射计有很高的灵敏度和稳定性。通常情况下, 1 K 的温度分辨率就可以满足风速测量的要求, 但要进行风向的测量, 则要求辐射计的温度分辨率优于 0.5 K。因此极化辐射计硬件设计是海面风场测量的关键。全极化测量微波辐射计的关键是两个复相关极化分量第三和第四个 Stokes 参数的测量。

根据这两个参数的测量方式不同, 极化辐射计的设计有几种接收机配置方案。基本检测方案有两种: 异步检测和同步检测方式。同步检测一般采用两种方式: 一是使用加法技术测量垂直极化和水平极化, 以及它们的复相关; 另外一种是直接测量垂直极化和水平极化, 以及它们的复相关。加法技术也称间接方法, 式(5)给出间接方法的实现原理。

$$\begin{aligned} T_u &= T_{45^\circ} - T_{-45^\circ} = 2T_{45^\circ} - T_v - T_h \\ T_v &= T_l - T_r = 2T_r - T_v - T_h \end{aligned} \quad (5)$$

第三和第四个 Stokes 参数是通过正交通道亮温与至少一组相关极化通道亮温的组合来实现的。而直接相关技术也称为直接法, 它的原理是通过正交通道电场的复相关来实现的, 参见式(6):

$$\begin{aligned} T_3 &= \frac{\lambda^2}{k \cdot \eta} \{ 2\text{Re} \langle E_v E_h^* \rangle \} \\ T_4 &= \frac{\lambda^2}{k \cdot \eta} \{ 2\text{Im} \langle E_v E_h^* \rangle \} \end{aligned} \quad (6)$$

式(5)和式(6)中,  $T_{\pm 45^\circ}$  为  $\pm 45^\circ$  线极化分量的亮度温度,  $T_l$  和  $T_r$  分别为左旋圆极化和右旋圆极化分量的亮度温度。另外根据接收机的类型不同, 可以分为全功率式、迪克式、噪声注入式极化辐射计。

与传统的微波辐射计相同, 一个极化辐射计包括天线、接收机、视频和数据处理单元等。选择极化组合、直接极化相关还是使用分立馈源的多路平行接收方式将决定天线馈源的结构。使用前两种需要考虑共用馈源的隔离以及极化纯度等; 使用最后一种方案将要设计馈源的布局和地面像元、入射角等

的关系。极化辐射计的方案决定了是否使用复相关器, 使用模拟相关器还是数字相关器。使用分立馈源的多路接收方式不需要相关器, 但是需要多个接收机。使用组合方式极化辐射计方案不需要相关器, 但是需要保证在组合前正交极化接收信道是相干的; 使用极化相关辐射计方案需要处理频率、带宽和相关器类型的关系。模拟相关器精度高, 但是可以实现的带宽窄。而数字相关器可以实现宽带相关, 但是精度受到 A/D 转换级数、速度等的限制。

#### 3.2 全极化辐射计定标

遥感的定量应用需要准确的测量数据, 因此遥感器的定标就成为重要的研究内容。传统的定标方法只产生非极化信号。极化辐射计要确定每个通道对于所有 Stokes 参数的灵敏度, 因此必需使用特殊的方法对它进行定标。为了能够实现完全定标, 也就是要反演出不同通道之间的串扰项, 需要的输入信号要多于两个, 而且信号之间是线性独立的。尽管传统的两点定标方法也可以用于极化辐射计定标, 但是它不能测得不同极化之间串扰的大小。全极化辐射计的天线温度和输出响应间的关系为<sup>[14]</sup>

$$\bar{v} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{vv} & g_{vh} & g_{v3} & g_{v4} \\ g_{hv} & g_{hh} & g_{h3} & g_{h4} \\ g_{3v} & g_{3h} & g_{33} & g_{34} \\ g_{4v} & g_{4h} & g_{43} & g_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_v \\ T_h \\ T_u \\ T_v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} o_v \\ o_h \\ o_3 \\ o_4 \end{bmatrix} + \bar{n} \quad (7)$$

其中  $\bar{v}$  是输出响应矢量。  $\bar{g}$  和  $\bar{o}$  构成辐射计的增益和偏移量参数。  $\bar{n}$  是对于输出来讲的噪声。在  $\bar{g}$  矩阵中, 除了对角线以外的元素表示通道之间的串扰。这个串扰可能来自一个或几个硬件元件的限制。包括: a. 天线极化隔离的限制; b. 视频和微波电路之间的串扰; c. 相关器之间的不平衡和串扰 (取决于相关器类型和配置); d. 用来测量第三和第四个 Stokes 参数前置检测电路的相位不平衡。

从全极化辐射计的响应方程可以看出, 为了从  $\bar{v}$  中反演出天线温度矢量, 必需确定式(7)中的  $\bar{g}$  和  $\bar{o}$ 。全极化定标体<sup>[15]</sup>可以产生无数组不同的线性独立的参考亮温矢量。利用上述体制实现全极化微波辐射计的在轨定标, 需要详细设计定标体的位置以及 4 个 Stokes 参数的实现方式<sup>[15]</sup>, 同时分析定标源本身的精度对风场反演的影响。

### 4 风场反演的科学问题

#### 4.1 风场反演算法

反演的问题就是从测量的亮温数据中估算出海

面的风速和风向。从原理上,微波辐射计风速反演算法可以分为3类:统计方法、半统计方法和物理算法。在晴空条件下,所有算法预计反演风速的准确度大约为2m/s。全极化微波辐射计反演海面风场的方法通常使用物理反演方法。首先建立海面10 m高处的风速、风向与观测的海面 Stokes 之间的关系(简称 GMF),参见式(2)。观测的亮温除了依赖极化和频率以外,至少还与风速、风向、海面温度和大气透过率有关。对于给定的频率,式(2)振幅项  $T_{h0}, T_{v0}$  是风速和大气辐射的强函数。式(2)的一个重要特征是第三和第四个 Stokes 参数的方向特性与前两个 Stokes 参数之间相差  $90^\circ$  相移,这样就提供了去除反演风向信号模糊性的关键附加信息。同时研究表明第三和第四个 Stokes 参数受大气中云和局部对流的影响比前两个参数小得多。一般来讲,水平极化亮温中主要含有海面风速信息。垂直极化亮温可以用来确定大气影响,因为它对于风速和风向的变化比对于大气的影响小得多。第三个 Stokes 分量对于海面风向敏感,第四个 Stokes 分量用来减少海面风向反演的模糊度。

反演的关键在于如何准确建立反映海面辐射亮温真实状况的地物模式函数以及采用什么方法有效地从地物模式函数中求解风速和风向<sup>[16]</sup>。给出了基于发射率模型 FASTEM3<sup>[13,17]</sup> 和一套组合大气吸收系数模式建立的星载全极化微波辐射计的反演算法,并且利用物理统计、牛顿法和最大似然法(MLE)进行反演效果的比较,认为利用三种反演方法结合起来进行海面风场以及其他参数的反演效果更好。统计反演本身可以提供很好的除了风向以外的参数。同时又可以为物理反演提供初值。物理反演的关键是算法的准确度。牛顿法的收敛与初值的选取关系密切。MLE 方法可以准确地反演出风场信息,但影响反演效果关键是算法的准确度。MLE 方法风向的初值选取可以自动实现。

在上述方法的基础上,把大气吸收系数的计算固定在 MPM93,海面发射率采用 Johnson 的快速双尺度算法理论计算了不同海况下的海面发射率,进而得到海面发射率有关的风影响参数和方向谐波系数<sup>[16,18,19]</sup>。通过 MLE 方法和中值滤波技术得到了用 Windsat 数据反演的2004年1月2日大西洋南部区域的风场图(见图1),图1中中间区域风速最小,向两侧增大,尤其纬度在  $-40^\circ$  以下风速达到10 m/s 以上。箭头表示风向。可以看出,除某些低风速区

域外,反演的整个风速和风向基本能够反映海面风场的真实状况。研究结果初步验证了全极化辐射计在卫星上遥感海面风场的能力;与 NCEP 数据进行比较,反演的风速误差为1.15 m/s、风速5 m/s 以上的风向误差为  $21^\circ$ ;与浮标数据进行比较,风速误差为1.4 m/s、风速5 m/s 以上的风向误差为  $20.5^\circ$ 。

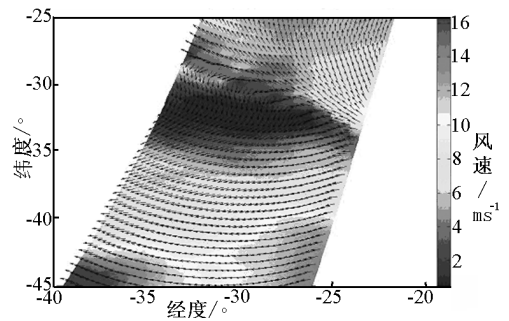


图1 反演的2004年1月2日风场图  
Fig. 1 Retrieved wind vectors of the south Atlantic Ocean on January 2, 2004

#### 4.2 风场反演的模糊性问题

由于地物模型函数本身的特征以及辐射计的各种测量噪声,通常会出现最后所选择的风向往往不是与真实风向最接近的那个解的情况。假设某海区的风速为10 m/s,海面温度为290 K,18.7 GHz的4个全极化通道的风向信号亮温如图2所示。当风向对应的方位角为  $0^\circ \sim 10^\circ$ 、 $160^\circ \sim 200^\circ$  或者  $350^\circ \sim 360^\circ$  时,第三 Stokes 参数  $T_3$  的量值小于0.2 K,且这些方位角区域的第三和第四 Stokes 参数的性质(包括量值和符号)非常接近,参见图2竖线所示区域。

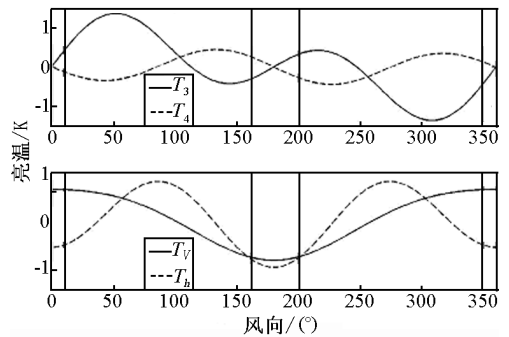


图2 18.7 GHz 时4个 Stokes 参数的风向信号  
Fig. 2 wind direction signals in four Stokes parameters at 18.7 GHz

如果仪器噪声和大气等的影响大于  $T_3$  和  $T_4$  的真实信号值,则容易将  $0^\circ \sim 10^\circ$  区间的方位角反演为  $160^\circ \sim 200^\circ$  区间的方位角,这就出现了风向  $180^\circ$

模糊现象。这也是目前统计 WindSat 辐射计风向反演结果时,需要去除反演误差大于  $90^\circ$  的数据点的原因<sup>[20]</sup>。为了消除由此带来的风向的  $180^\circ$  模糊,必须借助水平极化  $T_h$  和垂直极化亮温  $T_v$  的风向信号。由于图 2 中竖线区域对应的  $T_v$  和  $T_h$  量值约为  $0.5\text{ K}$ ,所以理论上引入  $T_v$  和  $T_h$  有利于消除风向反演的  $180^\circ$  模糊。但实际上,由于大气模型以及仪器误差的影响,目前很难将  $T_v$  和  $T_h$  的测量值和理论值的误差控制在  $2\text{ K}$  以内。中值滤波的方法虽然能在一定程度上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相差较大的情况下,它的有效性才能显现出来。因此,如何解决风向反演的  $180^\circ$  模糊问题,才是提高风向反演精度的关键。目前采用 WindSat 的扫描机制,只用一次扫描的 4 个 Stokes 变量进行风向反演,并无法有效消除风向模糊。

#### 4.3 主要技术指标对于风向反演误差的影响

风向反演的误差主要来自 Stokes 矢量的测量误差。测量误差主要包括定标误差和辐射计噪声。绝对定标准确度定义为辐射计的测量值与标准定标源亮温的差值。定标误差通常由辐射计系统的性能、所采用的定标方法以及定标源的准确度等因素决定。不同的定标方法对辐射计的性能要求侧重点不同。采用两点定标,要求系统的线性度非常高。如果对于全极化通道进行定标,还要求辐射计有很高的极化隔离度,尽量把系统的极化串扰降到最低。定标源的准确度主要由各组成分量的随机不确定度决定。由于海洋的风向信号比传统的被动式微波遥感器观测的典型地物信号幅度小两个数量级以上,因此对全极化辐射计的定标指标比对传统极化辐射计要求更严格。

辐射计噪声与系统噪声温度、接收机噪声温度、目标的天线温度、带宽、辐射计积分时间、辐射计增益波动和漂移的均方根误差等因素有关。仪器噪声是随机的,不能去掉。对于风向反演来讲,算法要处理的是微小信号:垂直极化和水平极化变化的振幅大约为  $2\text{ K}$ ,第三和第四个 Stokes 分量的振幅分别为  $3\text{ K}$  和  $0.5\text{ K}$ ,因此,全极化辐射计的定标误差会对风向反演精度产生重大影响<sup>[16]</sup>。模拟结果表明,对于  $7\text{ m/s}$  以上的风速,反演的风向精度要达到  $20^\circ$ ,必须把第三个 Stokes 参数测量误差控制在  $0.2\text{ K}$  以内,第四个 Stokes 参数测量误差控制在

$0.15\text{ K}$  以内。假定各个测量通道的亮温误差是相同的<sup>[16]</sup>,都假设为  $0.2\text{ K}$ ,那么  $0.2\text{ K}$  亮温误差对反演风向的影响如图 3 所示。

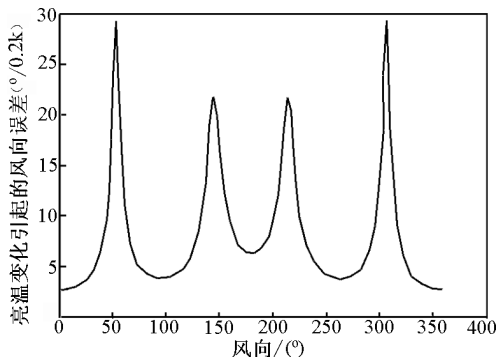


图 3 在不同实际风向上亮温变化  $0.2\text{ K}$  所引起的风向反演的误差比较

Fig. 3 Retrieved wind direction errors due to adding  $0.2\text{ K}$  noise to all Stokes parameters at given wind direction

从图 3 中看出,风向反演误差对亮温测量误差的灵敏度最大值出现在  $\varphi = 52^\circ$  和  $307^\circ$  附近,最小值出现在  $\varphi = 0^\circ$ 。 $0.2\text{ K}$  的测量误差引起的风向误差随风向  $\theta$  不同在  $2.5^\circ \sim 29.5^\circ$  变化,这表明极化通道微小的亮温测量误差可能导致反演的风向误差在  $10^\circ$  的量级。实际上,在真正的风向反演过程中,测量误差可能比这个还要大。

图 4 反映了在  $53^\circ$  入射角下,  $37\text{ GHz}$  的 4 个全极化参数的风向二次谐波系数随风速的变化情况,它们基本随风速的增大而增大。对于  $6\text{ m/s}$  以下的低风速,第三 Stokes 参数的变化幅度不超过  $0.65\text{ K}$ ,第四个 Stokes 参数的变化幅度不超过  $0.3\text{ K}$ 。 $10.7\text{ GHz}$  和  $18.7\text{ GHz}$  的风向谐波系数随风速变化的趋势与  $37\text{ GHz}$  的类似,幅度比  $37\text{ GHz}$  的小,但它们受大气的影响比  $37\text{ GHz}$  的风向信号小。所以在现阶段,全极化辐射计的仪器噪声通常很难控制在低风速下风向信号所能够容忍的误差范围内,再加上模型误差,风向信号往往被淹没,很难提取出来,风向反演离  $25^\circ$  的精度要求相差较远。

如果风速为  $7 \sim 20\text{ m/s}$ ,当设置所有频率的第三个 Stokes 参数测量误差为  $0.2\text{ K}$ ,第四个 Stokes 参数测量误差为  $0.15\text{ K}$  时,反演的风向精度可以达到  $20^\circ$ ,计算结果如图 5 所示。上述假定的测量误差包括模型误差、定标误差和辐射计噪声的总和。在模拟真实亮温时,我们给不同频率下的第三、第四个 Stokes 参数模型计算亮温分别加了相同的噪声。

今后可以深入分析不同频率下的这几个全极化通道对误差的敏感度是否相同,针对不同频率的信号设置权重,以便更合理地利用各个通道的亮温数据,增

强反演算法的有效性。另外,可以研究不同入射角情况下风速和风向信号的强弱,建立观测低风速下海面风向的新机制,提高反演精度。

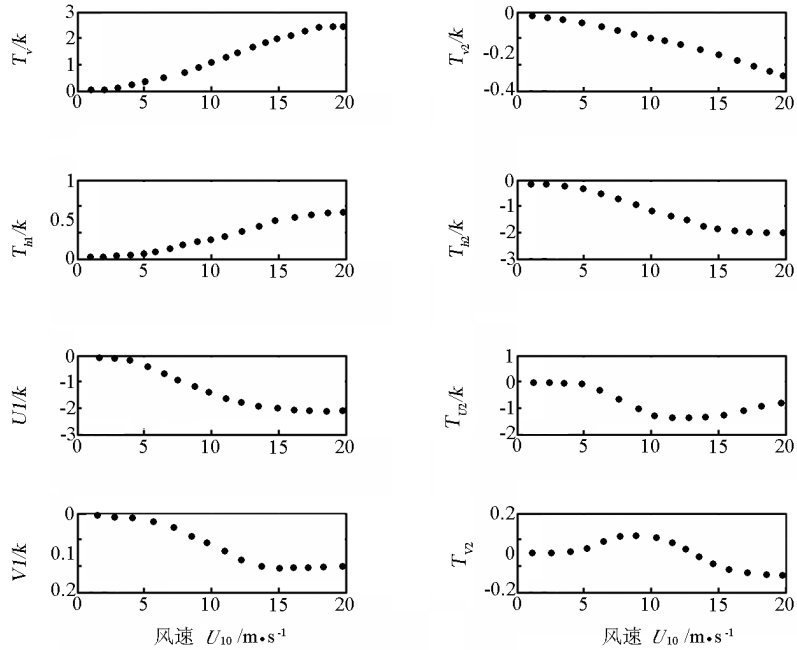


图4 37 GHz、53°入射角下风向谐波系数随风速的变化  
Fig. 4 Wind direction harmonic coefficients as functions of wind speeds at 53° incidence angle at 37 GHz

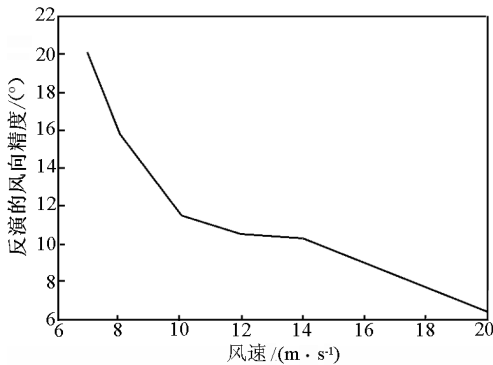


图5 不同风速下的风向反演精度  
Fig. 5 Retrieved wind direction accuracies at different wind speeds

此外,全极化辐射计系统性能的优劣决定了是否能够准确测量4个Stokes参数。以直接相关型全极化辐射计为例,如果天线的交叉极化鉴别率大于32.7 dB,反射损耗优于23 dB,端口隔离度优于47 dB,可以确保 $T_v$ 和 $T_h$ 的交叉极化信号幅度小于0.1 K。接收机两通道之间的相位差会降低进入相

关器的两路信号之间的相关度。接收机两信道互耦会使辐射计的输出生产生一个偏移量。0.3 K的相关测量误差要求接收机的信道隔离度为30 dB,而0.5 K的误差要求的隔离度为27.7 dB。数字相关器主要由A/D变换器、数字乘法器和累加器3部分组成,A/D变换器门限电平不对称,A/D采样滞后和时钟扭曲等因素都会造成测量误差。模拟相关器通常可以用混频器或乘法器实现,能够使相关器具具有足够宽的带宽、大动态范围和良好的温度稳定性,满足全极化微波辐射测量的需求。

#### 4.4 观测几何对于科学目标实现的影响

对于星载全极化微波辐射计而言,要准确观测海洋风场,除了需要精心设计辐射计系统各个单元电路,还必须考虑入射角、扫描角、观测几何等因素。图6显示了在海表面温度为12℃和海表面盐度为3.5‰的条件下,18.7 GHz的 $|\partial T_{h,v}/\partial \theta|$ 随传感器观测角的变化,这里 $\theta$ 是观测的天顶角,它代表卫星的观测方向与海面法线之间的夹角。图6表明,垂直极化亮温的变化随观测角的增大而增大,水平极化则相反。

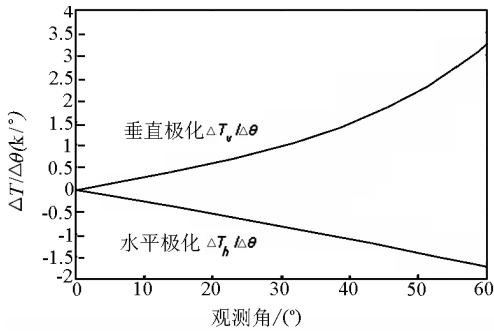


图 6  $\partial T_{h,v}/\partial\theta$  随观测角的变化

Fig. 6  $\partial T_{h,v}/\partial\theta$ 's vary with observation angles

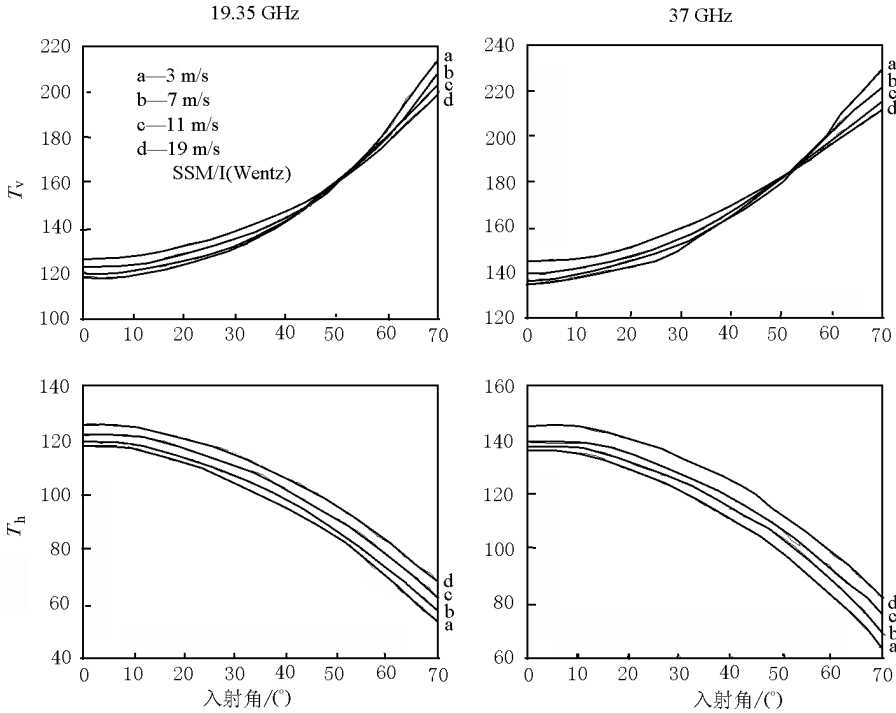


图 7 水平和垂直极化亮温随入射角和风速的变化

Fig. 7 Hori- and Vert-polarization brightness temperatures as functions of incidence angles and wind speeds

通过 WindSat 数据反演研究表明,单视的全极化辐射计系统虽然可以观测海面的风速和风向,但风向存在 2~4 个解,现有的模糊度去除方法对风向反演效果的改善程度有限,反演的风向均方根误差比较大,风向精度不能完全满足目前测风场的要求。如果使用前、后双视观测,基本能够消除风向反演的 180°模糊现象,风向反演精度可以提高至 15°。双视圆锥扫描的实现如图 8 所示,  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  分别为前视和后视对应的天线扫描方位角。对于不同的扫描单元,前、后视之间的扫描角度差 ( $\alpha = \varphi_2 - \varphi_1$ ) 从 0°到 180°变化。观测方位数量的增加将使全极化辐射计在卫星上进行圆锥扫描受到限制,尤其是常温定标

图 7 显示了 19.35 GHz 和 37 GHz 的水平和垂直极化亮温随入射角和风速变化的情况<sup>[15]</sup>。从图 7 中可以看出,当入射角在 53°附近时,无论是 19.35 GHz 还是 37 GHz 的垂直极化亮温信号几乎不随风速变化,这个特性对于利用观测的亮温数据进行大气和海洋参数的反演是十分有利的,可以先不考虑风速对垂直亮温信号的影响,简化反演方程。而且对于星载辐射计而言,为了获得宽的刈幅,快速覆盖全球,通常要求采用大入射角。因此,我们通常选择极化辐射计的入射角在 50°~55°之间。

源和冷空反射镜的摆放位置十分关键。如果使用双视观测,要求较低的测量噪声,定标源只能放在卫星的侧面。当进行侧面方位角观测时,辐射计接收定标源而不是地球的辐射信号,但这种放置减小了辐射计观测地球的刈幅宽度。而对于单视观测,定标源可以放置在扫描范围内的任何一个位置或扫描背部区域,不影响刈幅。因此,对于双视扫描而言,必须设计在一个扫描周期内,确定适合用来对地观测的方位角、适合用来定标的方位角,同时还要保证足够宽的刈幅。

前、后视之间扫描角度差  $\alpha$  是需要考虑的重要因素。扫描角度差  $\alpha$  不同时,消除风向反演模糊的



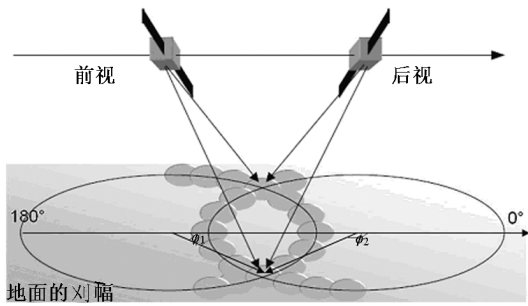


图8 星载被动微波遥感器双视圆锥扫描示意图

Fig. 8 Illustration of two-look scanning by space borne microwave radiometer

能力也不相同。我们初步的研究表明,对于相对风向在  $0^\circ \sim 20^\circ$  和  $340^\circ \sim 360^\circ$  区间,  $\alpha$  为  $20^\circ \sim 80^\circ$  时,风向模糊消除的效果好;对于相对风向在  $160^\circ \sim 200^\circ$  区间,  $\alpha$  为  $80^\circ \sim 140^\circ$  时,风向模糊消除的效果好,如图9所示,图9中数字代表风向反演误差的大小。

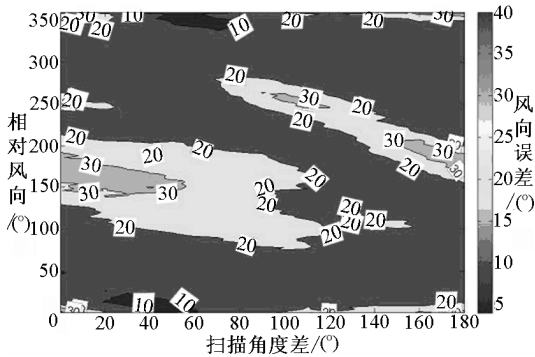
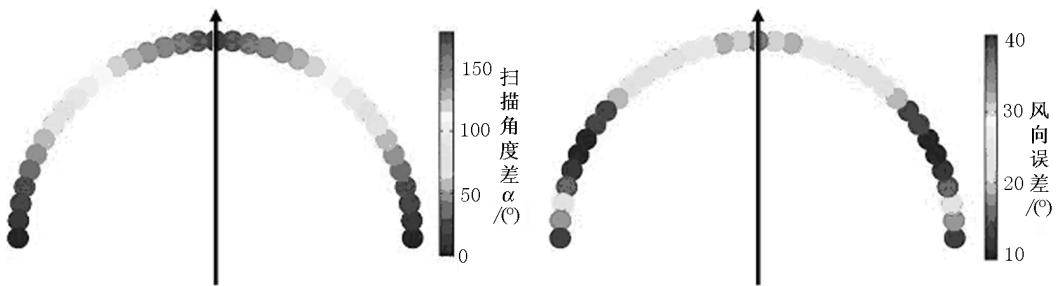


图9 风向反演误差随扫描角度差  $\alpha$  和真实风向的变化

Fig. 9 Errors of retrieved wind direction versus  $\alpha$  relative to the true wind direction



(a) 不同扫描单元的双视扫描角度差  $\alpha$  (b) 每个扫描单元的风向反演误差

图10 真实风向为  $0^\circ$  时,双视扫描单元的特征

Fig. 10 Characters of two-look cells with true wind direction being  $0^\circ$

于反演精度的影响是决定性的。如果风速为  $7 \sim 20$  m/s 的范围内,当设置所有频率的第三个 Stokes 参数测量误差为  $0.2$  K,第四个 Stokes 参数测量误差

图10(a)表示在一次扫描过程中不同扫描单元所对应的扫描角度差  $\alpha$ ,图10(b)表示当真实风向为  $0^\circ$  时,每个扫描单元的风向反演误差。可以看出,位于与卫星运行方向一致或垂直方位附近的扫描单元,风向反演误差最大。因此,这些扫描单元可用来定标,而用风向反演误差小的单元来对地观测。

## 5 结语

全极化微波辐射计是一种新型的被动微波遥感器。它发展的初衷是用来测量海面风场。美国从1993年开始就论证利用全极化微波辐射计替代传统散射计的研究,认为只有全极化微波辐射计才有可能做到这一点。经过近十年的努力,2003年第一颗原理验证卫星——WindSat 发射成功,而且在随后的3年获得了大量的数据。这些数据的应用结果表明,使用全极化微波辐射计数据确实能够反演风场,同时兼顾了传统辐射计的地物参数反演的能力。但是由于极化辐射计的特殊性,第三个和第四个 Stokes 参数比前两个参数小两个量级,所以在反演中存在一定不确定性,尤其在低风速下风向的反演存在较大的模糊性。

总体来讲,全极化微波辐射计遥感海面风场的可行性取决于硬件技术的实现以及数据处理方法的研究进展。硬件技术的关键体现在接收机的灵敏度和准确度等主要技术指标的实现。灵敏度指标对于目前的微波器件来讲,通过适当设计空间分辨率和时间分辨率,以及选择适当的接收频率,正交通道基本上可以实现星载灵敏度优于  $0.5$  K 的指标,而相关通道的灵敏度就相对差一些。测量准确度指标对

为  $0.15$  K 时,反演的风向精度可以达到  $20^\circ$ 。因此定标准确度非常关键,这需要利用准确的定标标准来确定通道之间的响应。

为了实现风场反演的科学目标,必须具有理论和应用软件的支持。文中介绍了相应的理论模拟方法和研究结果,对于全极化微波辐射计遥感海面风场的原理及其影响因素进行了分析。研究发现双尺度模式能够很好地模拟海面全极化微波辐射和散射系数,但是这个模式无法解释在高风速下第三和第四个 Stokes 参数达到饱和的现象。虽然泡沫增加使得海面发射率增大,相应的极化信息减弱,但是也不能够解释这个饱和现象。文章从波谱参数的选择方面进行了分析,很好地拟合了这个现象。

当海面发射率的理论模型确定以后,就可以通过分析和数学工具得到反演的算法。文中给出利用 WindSat 数据反演的风场图。表明在 7 m/s 以上的风速下,反演风向在 20°左右是可能的。但是由于 4 个 Stokes 参数,尤其是第三和第四个 Stokes 参数的变化规律,当  $T_3$  和  $T_4$  的误差超过真实信号值,就使得在特定的风向范围出现反演风向模糊。文中探讨了利用中值滤波和观测几何关系的调整解决这个问题可能性。另外还分析了辐射计主要技术指标对于风场反演的影响。

全极化微波辐射测量技术在国际上是一个全新的被动微波遥感应用领域。在我国这项技术尚属首次开展,我们将跟踪国际该技术的发展,对极化辐射测量的机理和风场反演方法进行深入的探讨和验证,为我国今后全极化微波辐射测量技术的发展打下坚实的基础。

## 参考文献

[1] Yueh S, Wilson W, Li F S, et al. Polarimetric measurements of sea surface brightness temperatures using an aircraft K - band radiometer[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 1995, 33(1): 85 - 92

[2] Yueh S, et al. Polarimetric brightness temperatures of sea surfaces measured with aircraft K - and Ka - band radiometers[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 1997, 35(5): 1177 - 1187

[3] B. Laursen, et al. Wind direction over the ocean determined by an airborne, imaging, polarimetric radiometric radiometer system [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 2001, 39(7): 1547 - 1555

[4] Wentz F J, Gentemann C, Smith D, et al. Satellite measurements of sea surface temperature through clouds[J]. sciences, 2000, 288(5467): 847 - 850

[5] Smith P M. The emissivity of sea foam at 19 and 37 GHz[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 1988, GE - 26: 541 - 547

[6] Yueh S H, Wilson W J, Dinardo S J, et al. Polarimetric micro-

wave brightness signatures of ocean wind directions [J]. IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens, 1999, 37(7): 949 - 959

[7] Yueh S H. Estimates of Faraday rotation with passive microwave polarimetry for microwave remote sensing of Earth surfaces [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 2000, 38(5): 2434 - 2438

[8] Yueh S H. Modeling of wind direction signals in polarimetric sea surface brightness temperatures [J]. IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens, 1997, 35(6): 1400 - 1418

[9] Reul N, Chapron B. SMOS - Salinity data processing study - improvements in emissivity models [S]. WP 1100 Report, CLS/IFREMER/NERSC Study, ESA contract No. 15165/01/NL/SF, October, 2001

[10] Rose L A, Asher W E., et al. Radiometric Measurements of the microwave emissivity of foam [J]. IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens, 2002, 40(12): 2619 - 2624

[11] 殷晓斌, 王振占, 姜景山, 等. 全极化微波辐射计遥感海面风场的机理和验证 [A]. 第二届微波遥感技术会议 [C], 深圳, 2006

[12] Wang Zhenzhan, Yin Xiaobin, Liu Jingyi, et al. Consideration on accuracy and efficiency of two - scale polarimetric emissivity model used for oceanic passive microwave remote sensing [J]. IEEE 2007 International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies For Wireless Communications, 2007, 2: 1463 - 1466

[13] 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: 中国科学院空间科学与应用研究中心, 2005

[14] Lahtinen J, Pihlflyckt J, Mononen I, et al. Fully polarimetric microwave radiometer for remote sensing [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003d, 41(8): 1869 - 1878

[15] Lahtinen J, Hallikainen M. HUT Fully Polarimetric Calibration Standard for microwave radiometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003c, 41(3): 603 - 611

[16] 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: 中国科学院空间科学与应用研究中心, 2007

[17] Saunder, R. RTTOV8.5 software [S]. from ECMRF, 2004b

[18] Liebe, H J, Hufford G A, Cotton M G. Propagation modeling of moist air and suspended water/ice particles at frequencies below 1000 GHz [A]. in AGARD 52nd Specialists Meeting of the Electromagnetic Wave Propagation Panel, Palma de Mallorca, Spain, 1993; 3.1 - 3.10

[19] Johnson J T. An efficient two - scale model for the computation of thermal emission and atmospheric reflection from the sea surface [J]. IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens, 2006, 44(3): 560 - 568

[20] Wentz F J, Thomas Meissner, Smith D K. Assessment of the initial release of windSat wind retrievals [S]. RSS technical report, 2005

# Critical technique and scientific topic on fully polarized microwave radiometer remote sensing sea surface wind vector

Wang Zhenzhan, Jiang Jingshan, Liu Jingyi, Yin Xiaobin  
(Center for Space Science and Applied Research, CAS, Beijing 100190 China)

[**Abstract**] Microwave polarimeter is a sensor of measuring not only the vertical and horizontal polarization, but also the third and/or the fourth Stokes parameters. It realizes all information about electromagnetic wave, including frequency, phase, amplitude and polarization, to be measured by a sensor. The correlated information of the first two Stokes parameters is more sensitive to the anisotropy of the ocean surface. Wind direction retrieval is one of the initial motivations of the polarimeter development.

In this paper, the progress and characteristic on polarimeter development are introduced and theories of ocean wind vector remote sensing are analyzed. Oceanic emission and scattering model is developed for remote sensing wind vector using passive polarimetric microwave radiometer. The critical techniques on its system design, which include receiver and calibration methods, are discussed in order to realize scientific target of wind retrievals. Furthermore more efforts are paid on expatiating scientific topics on wind reversion methods, including geophysical model function built-up, influences of main technical specifications on retrieval precision, and wind direction ambiguity removal methods by data-processing methods and scanning geometry. The calibration errors and main specifications of polarimetric radiometer, which have significant influences on the accuracy of wind vector retrieval, are summed in detail. Finally, a new scanning geometry with fore-aft-look to remove wind direction ambiguous solution is put forward.

[**Key words**] polarimetric microwave radiometer; wind vector retrieval; calibration