

文章编号: 2095-4980(2020)04-0610-06

## 基于微波遥感的台风对海洋动力影响分析

朱 厦<sup>1</sup>, 殷晓斌<sup>2</sup>

(1.北京市遥感信息研究所 研究发展中心, 北京 100192; 2.深圳航天宏图信息技术有限公司 海洋事业部, 广东 深圳 518067)

**摘要:** 台风是一种路径和强度变化不确定性很大的、短暂的、能量很强的灾害性天气系统。卫星遥感特别是星载微波遥感不仅具有大范围、快速重复观测的特点, 而且具备全天候和全天时的优点, 受恶劣天气影响较小, 可以对台风活动路径进行较好的监测和预警, 是分析台风的一种有效手段。本文结合 3 种微波卫星载荷: 高级微波扫描辐射计(AMSR)、TOPEX&Jason-1 微波高度计和 WindSat 全极化微波辐射计的数据, 初步分析了台风对海洋动力环境的影响, 结合与台风相关的海洋参数的卫星遥感测量结果, 给出了目前常用的微波散射计和微波辐射计海洋风场遥感的比较。对于多云情况下的海表面温度测量, 微波辐射计比红外辐射计更有优势。全极化微波辐射计还具有在恶劣天气条件下海洋风场测量能力。

**关键词:** 台风; 星载微波传感器; 海洋; 微波辐射计; 微波散射计

**中图分类号:** TN015; TP722.6 **文献标志码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA2018002

## Typhoon influence on ocean dynamic based on microwave remote sensing

ZHU Sha<sup>1</sup>, YIN Xiaobin<sup>2</sup>

(1.R&amp;D Center, Institute of Beijing Remote Sensing Information, Beijing 100192, China;

2.Oceanography Department, Shenzhen PIESAT Information Technology Co. Ltd, Shenzhen Guangdong 518067, China)

**Abstract:** Typhoon is a disastrous weather system which has a great change of path and intensity with ephemeral and strong collapsing force. Satellite remote sensing, especially satellite microwave imaging sensors, not only have the advantages of large scaled, dynamic, synchronous, fast observation etc., but also can work 24 hours all-weather, which can be used for monitoring and early warning of typhoon path and thus is considered as an efficient tool to analyze typhoon. Based on the data of three independent sensors including microwave satellite Advanced Microwave Scanning Radiometer(AMSR), TOPEX&Jason-1 altimeter and WindSat radiometer, the influence of typhoon on ocean is analyzed. The satellite measurement of ocean parameters relevant to typhoon is described, and finally the comparison of wind field ocean remote sensing results with currently used radiometers and scatterometers is shown. The conclusions are given as following: compared with infra radiometer, microwave radiometers have an observable advantage; and full polarization radiometers have the potential of measuring ocean wind field in bad weather conditions.

**Keywords:** typhoon; space-borne microwave sensor; ocean; radiometer; scatterometer

台风是产生于热带洋面上的一种能量强烈的热带气旋, 又称为热带风暴或者飓风。台风的危害性主要有三个方面: 1) 风速高, 台风中心附近最大风力一般为 30 m/s 以上; 2) 降雨强, 在台风经过的地区, 一般能产生 150~300 mm 降雨, 少数台风能产生 1000 mm 以上的特大降雨; 3) 近岸风暴潮, 一般台风能使沿岸产生强增水。台风除了给登陆地区带来强风和暴雨等严重灾害外, 也有一定的好处。例如, 能起到消除干旱的正面作用。据统计, 包括我国在内的东南亚各国和美国, 台风带来的降雨约占这些地区总降雨的 1/4 以上。如果没有台风, 这些国家的农业困境将不堪想象。另外, 台风对于地球热量输送、维持热平衡更是功不可没。由于台风的活动, 低纬热带地区的热量被输送到高纬度地区, 从而使寒带地区的热量得到补偿<sup>[1]</sup>。

收稿日期: 2018-01-04; 修回日期: 2019-07-01

基金项目: 广东省级促进经济发展专项资金(海洋经济发展用途)资助项目(GDME-2018B001)

作者简介: 朱 厦(1984-), 女, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为卫星应用总体、微波遥感、海洋探测。email:nudt\_zs@163.com

台风是一种路径和强度变化不确定性很大的、短暂的、能量很强的灾害性天气系统。因此利用船只观测台风非常危险，不切实可行。海上观测浮标造价很高，位置固定且数量较少，很难捕捉到过境的台风。所以，台风的常规观测资料及其相关数据产品十分稀少。数值预报模式对台风的预报能力还十分有限。因此，目前对台风的分析、研究和预报存在很大的困难。随着卫星遥感的出现，台风的发生、发展和移动问题得到了比较好的解决<sup>[2]</sup>。利用美国国防部卫星(DMSP)上的 SSM/I 特别是微波遥感成像仪测量数据，学者已对热带风暴、台风等强天气系统的降水强度进行了反演，并对热带云水分布做了反演研究，取得较多成果<sup>[3-5]</sup>。卫星微波遥感技术的发展不仅为提取台风信息提供了可能，加强微波卫星遥感台风的应用研究将会提高未来台风的预报水平<sup>[6-9]</sup>。

## 1 微波遥感台风影响下的海洋的优势

可见光和红外卫星遥感探测，可以较好地对比台风活动路径进行监测和预警，但对台风不同阶段降水强度的分布及变化等的探测能力有限。星载微波传感器除具有可见光和红外遥感仪器所具有的大范围和快速重复观测的特点外，还具有全天候和全天时的优点。微波最重要的特点是能穿透云层、浓雾和降雨。当云的覆盖阻挡了可见光和红外波段电磁波的透过时，能够穿透云层的微波遥感可弥补红外传感器的数据资料不足<sup>[10-11]</sup>。

微波的波长比可见光和红外的波长几个量级，而大气层的空气分子和气溶胶的粒径远小于微波的波长。因此，大气中各种粒子的散射对于微波辐射计探测的影响不那么重要。大气对频率小于 12 GHz 的微波传感器的影响较小，微波波段的大气校正相对简单。例如，即使是水汽含量为 60 mm 并且云中液态水含量是 0.2 mm 的多云天气，大气引起的频率小于 12 GHz 的微波信号的总衰减也小于 0.05%<sup>[12]</sup>。

大量的研究工作表明<sup>[13-14]</sup>，星载微波传感器在探测海洋—大气参数方面有较强的能力。利用星载微波传感器可以穿透云层和雨层，探测云以下的海表状况，是分析台风的一种有效手段<sup>[15-16]</sup>。

## 2 台风对海洋影响的遥感研究

台风会强烈地扰动它路径区域的海洋，例如增加海洋混合层深度，显著降低海表温度<sup>[17]</sup>等等。本节结合三种星载微波载荷：高级微波扫描辐射计(AMSR)、TOPEX&Jason-1 微波高度计和 WindSat 全极化微波辐射计的数据，分析了台风凯萨娜(Ketsana)对海洋的影响。海表面温度、海表面动力高度以及风速和风向分别由 AMSR, TOPEX&Jason-1 和 WindSat 卫星测量数据获得。

2003 年 10 月 18 号至 22 号台风凯萨娜在西北太平洋面生成，其中心以小于 1.5 m/s 的速度缓慢移动，随后以超过 6 m/s 的速度向东北方向移动。在台风凯萨娜经过之前，[15°N-25°N, 128°E-136°E]区域的海洋区域的表层海温约为 30°C(图 1(a))。随着台风凯萨娜的形成并向前移动，在台风路径上形成两个海表的低温(22°C~24°C)冷池[129°E-132°E, 16°N-19°N; 133°E-135°E, 20°N-22°N](图 1(b))。台风过境后，路径区域的海表温度最高下降大约 10°C。这是由于降雨的影响，以及台风对海洋的夹卷混合作用使得海表以下冷水上涌造成的<sup>[18-19]</sup>。

台风引起的云层明显地影响了 MODIS 红外传感器的海表面温度观测，在台风过境处红外传感器出现了海洋观测的盲区(图 2)。而在图 1(b)中微波传感器观测到了台风过境时温度的下降。这说明对于研究台风多云和强降水情况下的海表面温度，微波辐射计具有相当的优势。

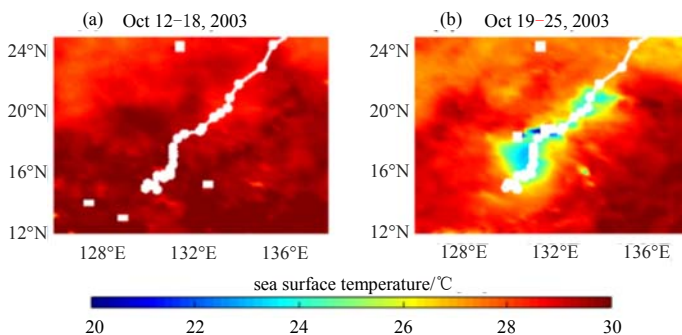


Fig.1 AMSR microwave radiometer images of ocean temperature (the typhoon path was labeled with white circle)  
图 1 AMSR 微波辐射计海温图像(台风路径由白色圈线标注)

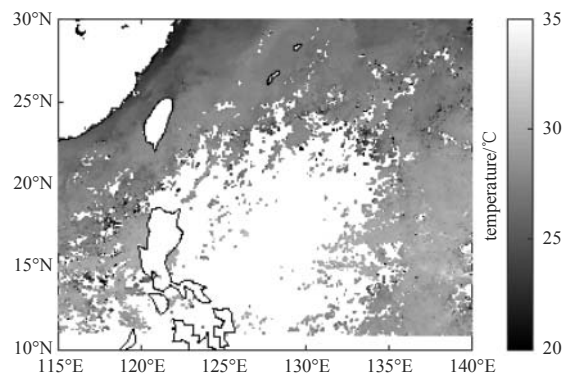


Fig.2 Image of week-average of sea surface temperature distribution of MODIS infra radiometer when typhoon transited  
图 2 台风凯萨娜过境时 MODIS 红外辐射计周平均海表面温度分布图

星载微波高度计可以提供台风影响海区的动力特性(图3)。海表面动力地形数据表明,在台风刚刚影响过的海面上生成了两个大约-25 cm的低涡中心,这与两个海表的低温中心的位置非常吻合(图1和图3)。低涡周围的地转海流是逆时针旋转的,这与台风过境时的风向基本一致。这也再次印证了海表低温中心确实存在上升流(图3)。

海面辐射的微波亮温受大气降水的影响严重,使得海面风场信息大部分被淹没,因此目前绝大多数微波辐射计海面风场算法都是针对风速<20 m/s、无雨情况下的。全极化辐射计测量风向的优势还在于恶劣天气情况下依旧能反演风向,这是传统辐射计很难具备的特性。

全极化辐射计的微波辐射传输模型为:

$$T_v = T_{BU} + \tau E_v T_s + \tau R_v (\Omega_v T_{BD} + \tau T_{BC}) \quad (1)$$

$$T_h = T_{BU} + \tau E_h T_s + \tau R_h (\Omega_h T_{BD} + \tau T_{BC}) \quad (2)$$

$$T_3 = \tau E_3 [T_s - (T_{BD} + \tau T_{BC})] \quad (3)$$

$$T_4 = \tau E_4 [T_s - (T_{BD} + \tau T_{BC})] \quad (4)$$

式中:  $T_q(q=v,h,3,4)$ 为卫星接收的大气层顶的4个Stoke变量,  $T_{BU}$ 为大气上行辐射亮温,  $T_{BD}$ 为大气下行亮温,  $T_{BC}$ 为宇宙背景辐射,  $\tau$ 为大气透过率,  $T_s$ 是海表面物理温度。  $\Omega_p(p=v,h)$ 分别表示对粗糙表面引起发射率变化的校正。  $E_q, R_q$ 表示4个Stokes变量对应的海面发射率和反射率。根据基尔霍夫(Kirchhoff)定律:

$$E_q = 1 - R_q \quad (5)$$

一般可以认为:

$$T_{BD} \approx (1 - \tau) T_s \quad (6)$$

由于  $T_{BC}$  很小,可以忽略不计。将式(5)和式(6)带入式(1)~(4),可得:

$$T_v = \tau^2 E_v T_s + T_{BU} + \tau \Omega_v T_{BD} \quad (7)$$

$$T_h = \tau^2 E_h T_s + T_{BU} + \tau \Omega_h T_{BD} \quad (8)$$

$$T_3 = \tau^2 E_3 T_s \quad (9)$$

$$T_4 = \tau^2 E_4 T_s \quad (10)$$

由式(7)~(10)不难看出,卫星测量的  $T_v$  和  $T_h$  可以粗略地认为由三部分组成:1)经大气衰减的海表面的辐射;2)大气上行辐射;3)经大气衰减的海面反射的大气下行辐射。因此,  $T_v$  和  $T_h$  通道受云水以及水蒸气影响比较明显,很难从中提取风向信息。卫星测量的第三和第四Stokes向量  $T_3$  和  $T_4$  主要由经大气衰减的海表面的辐射组成,不含大气上、下行辐射,受云和水蒸气影响要小得多。确定大气透过率  $\tau$  后,便可以使用  $T_3$  和  $T_4$  反演恶劣气象条件下的海面风场<sup>[20]</sup>。

台风经过时常伴随着大风和暴雨。台风由外围区、最大风速区和台风眼三部分组成。台风外围区的风速从外向内增加,有螺旋状云带和阵性降水。台风最强烈的降水产生在台风壁区域,平均宽8~19 km。台风眼位于台风中心区,最常

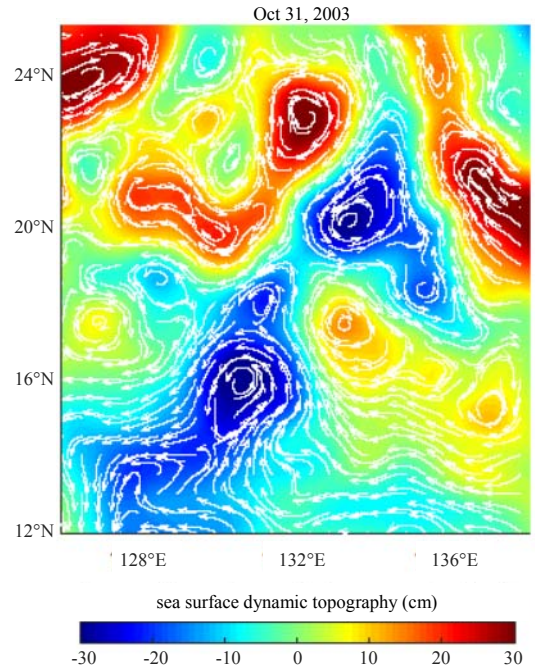


Fig.3 TOPEX&Jason-1 assimilated data of marine dynamic topography after Ketsana typhoon transit  
图3 台风凯萨娜过境后, TOPEX&Jason-1 高度计海面动力地形数据

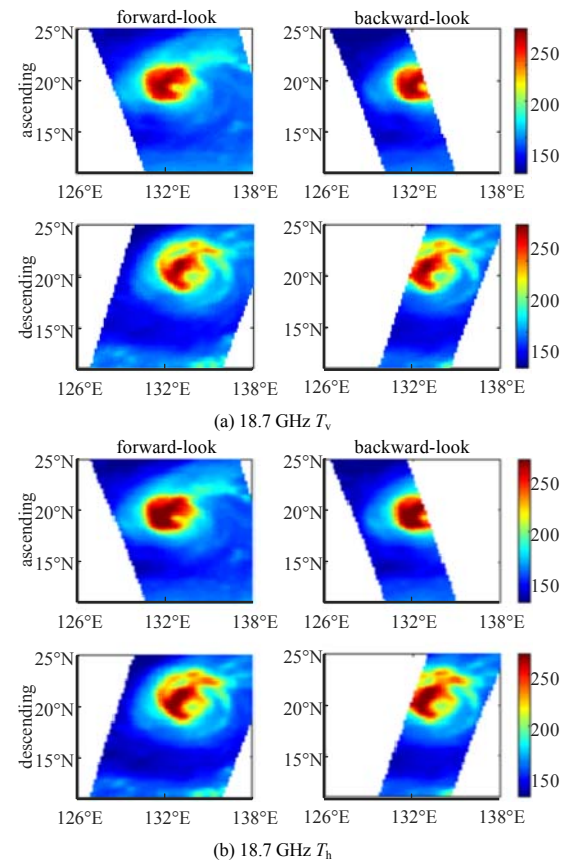
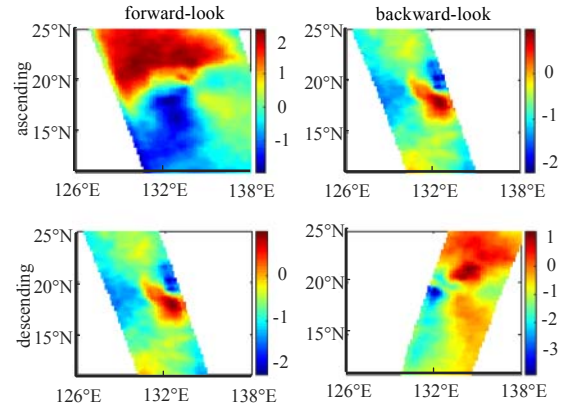


Fig.4 Typhoon Ketsana corresponding to  $T_v$  and  $T_h$  of Winsat 18.7 GHz  
图4 台风凯萨娜对应的 WindSat 18.7 GHz 的  $T_v$  和  $T_h$

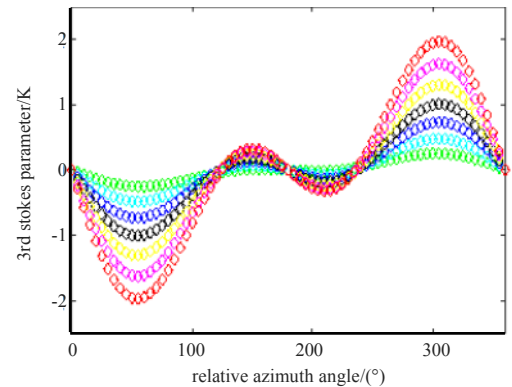
见的台风眼呈圆形或椭圆形状，平均约 45 km，台风眼区域的天气表现为无风、少云和干暖。2003 年 10 月 23 日台风凯萨娜对应的 WindSat 18.7 GHz 的水平极化  $T_h$  和垂直极化  $T_v$  亮温数据如图 4 所示。由于微波具有穿透云的能力，WindSat 微波辐射计 18.7 GHz  $T_h$  和  $T_v$  亮温中可以清晰地看到台风的螺旋雨带，以及中心眼区。由于云和雨的影响，台风内部的螺旋雨带结构和中心眼区在普通的红外云图上无法辨别。在台风壁周围由于常常伴随着浓云和强降雨，18.7 GHz 及以上频率的  $T_v$  和  $T_h$  亮温值可达 260 K 以上。18.7 GHz 及以上频率的  $T_h$  和  $T_v$  虽然包含台风形状及部分台风的结构信息，但是已经很难通过传统辐射计测量的  $T_h$  和  $T_v$  获取海洋风场信息。

全极化微波辐射计具有在恶劣天气条件下海洋风场测量能力。台风的风向沿台风半径一周大约变化 360°，因此某区域风向和另一区域存在 180° 相位差。根据电磁波海面极化辐射理论，180° 相位差将使第三 Stokes 参数  $T_3$  的观测信号出现正负符号的变化。18.7 GHz 的 WindSat 实际测量数据体现了这一点(图 5)。这表明，可利用卫星测量的  $T_3$  数据提取台风场的风向信息。10.7 GHz 和 37 GHz 的  $T_3$  数据同样体现了这些特点。10.7 GHz 的亮温数据受大气影响小于 18.7 GHz 和 37 GHz，将不同频率亮温数据结合更有利于反演台风场。

目前国外利用 WindSat 全极化微波辐射计数据提取台风风场信息有一些不错的研究成果<sup>[21-23]</sup>。对于降水率小于 4 mm/h 区域风向的反演结果可以达到 22° 的精确度。对于降水率大于 4 mm/h 的风向反演结果稍差，误差为 40°。Adams 等<sup>[21]</sup>指出，应当建立包含浓云和降水参数的全极化微波辐射计的台风风场反演模型，以便同时提高风速和风向的反演精确度。



(a) measured  $T_3$  at 18.7 GHz



(b)  $T_3$  at 18.7 GHz from theoretical simulation

Fig.5 Windsat  $T_3$  at 18.7 GHz corresponding to typhoon Ketsana

图 5 台风凯萨娜对应 WindSat 18.7 GHz 的  $T_3$

### 3 散射计和辐射计海洋风场遥感的比较

用于海洋风场探测的主要星载微波遥感器是微波散射计，它既可以探测风速，也可探测风向。传统的微波辐射计由于只能获取海表面水平和垂直极化亮温，无法测量第三和第四 Stokes 参数，因此只能测量风速，而不能得到准确的风向信息。全极化微波辐射计是一种新型的微波遥感器，它在传统微波辐射计功率幅度测量的基础上，进一步测量电磁信号的相位。全极化微波辐射计可以测量风速，也可以测量风向，拓宽了被动辐射计测量的应用范围。全极化微波辐射计风场反演首先是利用水平和垂直极化亮温数据来确定水汽、液水、风速和海表面温度这 4 个参数。这些参数的反演利用线性统计回归算法，当求解出这 4 个参数后，再把整个过程重复若干次，直到这些参量收敛到一个稳定的值。线性统计回归算法可以表示为(Wentz, 2000)<sup>[12]</sup>：

$$P_j = \mathcal{R} \left[ c_{0j} + \sum_{i=1}^I c_{ij} \mathcal{T}(T_{Bi}) \right] \quad (11)$$

式中： $\mathcal{T}$  和  $\mathcal{R}$  是线性函数； $P_i = T_s, ws, V, L$  表示反演的参数；下标  $i$  代表辐射计的通道，下标  $j$  代表要反演的参数。然后基于第三和第四斯托克斯参数  $T_3$  和  $T_4$  以及最大似然估值法(Maximum Likelihood Estimation, MLE)进行风向的反演。目标函数为：

$$F = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \left( \hat{T}_{i,j} - T_{i,j} \right)^2 \Delta T_{i,j}^{-2} \quad (12)$$

式中：下标  $i, j$  分别表示第  $j$  个通道(例如，10.7 GHz, 18.7 GHz 和 37 GHz)观测时第  $i$  个 Stokes 亮温变量(例如， $T, T_h, T_3, T_4$ )； $\hat{T}_{i,j}$  是多通道、多频率极化辐射计测量的亮温值， $T_{i,j}$  等于该给定海洋和大气条件下多个频率的模型函数计算值； $\Delta T_{i,j}^{-2}$  表示第  $i$  个 Stokes 亮温变量的仪器和模型误差的总方差。这样 MLE 的求解就变成非线性加权最小二乘法问题。即，当给定各通道的亮温测量值时，就可以通过使得似然函数达到最大来确定风向。

散射计风场反演时需要外部数据源(例如微波辐射计)进行大气校正,而全极化辐射计自身测量的亮温数据完全可以满足大气校正需要。全极化辐射计在短时间内获得全球大面积风场结果的同时,还可以获得大气云水含量、水汽含量和海表温度等参数。所获得的短重复周期、同时刻、同区域的大气海洋参数,对于海洋和气候研究相当有利,也有利于提高大气和海洋预报模式的准确性。另外,二者反演风向  $180^\circ$  模糊特性也不相同。

Freilich 和 Vanhoff(2006)<sup>[24]</sup>基于 2003 年 9 月 1 日至 2004 年 2 月 28 日的匹配数据,对 QuikScat 散射计和 WindSat 全极化辐射计反演的风速和风向进行了比较。对于小于 15 m/s 的风速,二者反演的风速精确度基本一致;当风速大于 15 m/s 时, WindSat 全极化辐射计反演的风速精确度略低于 QuikScat 散射计。对于小于 8 m/s 的风速, WindSat 全极化辐射计反演的风向精确度略低于 QuikScat 散射计;对于 8~16 m/s 的风速,二者反演的风速精确度基本一致;当风速大于 15 m/s 时, WindSat 全极化辐射计反演的风速精确度高于 QuikScat 散射计。

当风速大于 15 m/s 时, WindSat 全极化辐射计反演的风速精确度略低于 QuikScat 散射计,这是由于 WindSat 全极化辐射计高风速情况下的反演模型不够准确的缘故。对于小于 8 m/s 的风速, WindSat 全极化辐射计反演的风向精确度略低于 QuikScat 散射计,这是由于低风速时海面辐射亮温的风向信号比较小而 WindSat 的测量误差和反演模型误差比较大的缘故。当风速大于 15 m/s 时, QuikScat 散射计反演的风速精确度低于 WindSat 全极化辐射计,这是由于高风速一般伴随着恶劣的天气, QuikScat 匹配的外部大气校正数据源误差比较大而 WindSat 自身的大气校正可以很大程度上减少此类误差的原因。

全极化微波辐射计在短时间内获得全球大面积风场结果的同时,还可以获得大气云水含量、水汽含量和海表温度等参数。获得的短重复周期、同区域的大气海洋参数,对于海洋和气候研究相当有利,也有利于提高大气和海洋预报模式的准确性。相对于微波散射计,全极化微波辐射计作为一种被动微波遥感器进行海面风场测量,具有功耗低,高风速条件下的精确度高等重要优势,适用于卫星平台,是国际上星载微波遥感技术的一个发展方向。同时,全极化辐射计还具有测量恶劣天气条件下(大风有雨区域,包括台风影响区域)风场的潜力,可以在一定程度上填补微波散射计测量风场的空白<sup>[25-26]</sup>。全极化微波辐射计的应用和发展,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测量,可以获得传统微波遥感器所不能得到的更多的目标辐射信息。从发展趋势上,全极化微波辐射计有可能取代目前所采用的微波散射计进行海面风场测量。在目前阶段,可以与微波散射计相互配合,兼顾对高风速和低风速的测量要求<sup>[27]</sup>。

## 4 结论

本文结合三种星载微波载荷: AMSR 微波辐射计、TOPEX&Jason-1 微波高度计和 WindSat 全极化微波辐射计的数据,初步分析了台风对海洋动力环境的影响,结合与台风相关的海洋参数的卫星遥感测量结果,给出了目前常用的散射计和辐射计海洋风场遥感的比较。台风强降雨的影响以及强风的夹卷混合作用使得海表以下冷水上涌,造成台风影响海区出现海面温度明显降低的冷涡。由于云层的影响,在台风过境处红外传感器出现了海洋观测的盲区,此现象没有被观测到。而微波遥感器观测到了台风过境时海表温度的下降。因此,对于研究多云情况下的海表面温度,微波辐射计具有相当的优势。全极化微波辐射计具有在恶劣天气条件下海表风速和风向测量的能力。可利用 T3 数据提取台风场的风向信息。将不同频率亮温数据结合更有利于反演台风场。

我国即将发射的海洋二号海洋动力卫星 B 星及后续系列卫星将同时载有微波辐射计、微波高度计和微波散射计等多种载荷。多种微波传感器联合同步大面积测量,将对台风的微波遥感信息提取提供有力帮助。目前,可以将全极化微波辐射计与微波散射计相互配合,利用各自优势,兼顾高、低风速和多种天气的测量要求。

## 参考文献:

- [1] 殷晓斌,王振占. 微波传感器遥感台风对海洋影响的初步分析[C]// 2007 年全国微波毫米波会议论文集. 北京:电子工业出版社, 2007:1739-1742. (YIN Xiaobin,WANG Zhenzhan. Primary analysis of microwave remote sensing of ocean response to typhoon[C]// Proceedings of 2007 National Microwave Millimeter Wave Conference. Beijing:Electronic Industry Press, 2007:1739-1742.)
- [2] 王学忠,沙文钰,端文宏. 热带气旋的云系结构对其移动影响的数值试验[J]. 热带海洋学报, 2003,3(22):52-60. (WANG Xuezhong,SHA Wenyu,DUAN Wenhong. A numerical study on motion of tropical cyclones affected by their cloud structures[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2003,3(22):52-60.)
- [3] MENZEL W P,PURDOM J F W. Introducing GOES-I: the first of a new generation of geostationary operational environmental satellites[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1994,75(5):757-782.
- [4] 夏秋萍,王鹤祥,陈子昂,等. 用 TRMM 卫星探测资料对“卡努”台风云系不同阶段特征的分析[J]. 海洋预报, 2006,23(4):

- 28–36. (XIA Qiuping,WANG Hexiang,CHEN Ziang,et al. Analysis of typhoon Khnun cloud characteristics in different stages by using TRMM[J]. *Marine Forecasts*, 2006,23(4):28–36.)
- [ 5 ] 刘松涛,严卫,王举. 利用 AMSR-E 对台风“泰利”的初步分析[J]. *热带海洋学报*, 2006,25(5):26–30. (LIU Songtao,YAN Wei,WANG Ju. A primary analysis of typhoon Talim by AMSR-E[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2006,25(5):26–30.)
- [ 6 ] ZHANG B,PERRIE W. Cross-polarized synthetic aperture radar: a new potential measurement technique for hurricanes[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2011,93(4):531–541.
- [ 7 ] HORSTMANN J,WACKERMAN C,FOSTER R,et al. Tropical cyclone winds retrieved from synthetic aperture radar[J]. *Oceanography*, 2013,26(2):46–57.
- [ 8 ] UHLHORN E W,BLACK P G,FRANKLIN J L,et al. Hurricane surface wind measurements from an operational stepped frequency microwave radiometer[J]. *Monthly Weather Review*, 2007,135(9):3070–3085.
- [ 9 ] KIM D J,LYZENGA D R. Efficient model-based estimation of atmospheric transmittance and ocean wind vectors from WindSat data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2008,46(8):2288–2297.
- [10] 金亚秋. 星载微波 SSM/I 对我国南海海面遥感的辐射特征分析及其海面风速反演[J]. *地球物理学报*, 1998,41(1):30–37. (JIN Yaqiu. Remote sensing of DMSP SSM/I over the south China sea and retrieval of sea surface wind[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1998,41(1):30–37.)
- [11] MILMAN A S,WILHEIT T T. Sea surface temperatures from the scanning multichannel microwave radiometer on Nimbus 7[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 1985,90(C6):11631–11641.
- [12] WENTZ F J,MEISSNER T. Algorithm theoretical basis document (ATBD) version 2 AMSR ocean algorithm[R]. 2000:1–37.
- [13] 郭小刚,靖春生,李立. 南沙群岛海域风场特征—卫星散射计观测资料分析[J]. *热带海洋学报*, 2003,4(22):18–25. (GUO Xiaogang,JING Chunsheng,LI Li. Wind field features in Nansha Islands waters, southern south china sea—satellite scatterometer data analysis[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2003,4(22):18–25.)
- [14] 陈洪滨. 星载微波辐射计遥感反演云水量的一个算式[J]. *遥感学报*, 2000,4(3):165–171. (CHEN Hongbin. A retrieval algorithm for deriving liquid water path from space-borne microwave radiometric measurements[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2000,4(3):165–171.)
- [15] ZABOLOTSKIKH E V,MITNIK L M,CHAPRON B. New approach for severe marine weather study using satellite passive microwave sensing[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013,40(13):3347–3350.
- [16] ZABOLOTSKIKH E,MITNIK L,REUL N,et al. New possibilities for geophysical parameter retrievals opened by GCOM-W1 AMSR2[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015,8(9):4248–4261.
- [17] WENTZ F J,GENTEMANN C,SMITH D,et al. Satellite measurements of sea surface temperature through clouds[J]. *Science*, 2000,288(5467):847.
- [18] BLACK P G,HOLLAND G J. The boundary layer of tropical cyclone Kerry (1979)[J]. *Monthly Weather Review*, 1995, 123(7):2007–2028.
- [19] PRICE J F. Upper ocean response to a hurricane[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1981(11):153–175.
- [20] 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. (LIU Jingyi. Research on problems of polarimetric microwave radiometer calibration and wind vector retrieval[D]. Beijing:Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2007.)
- [21] ADAMS I S,HENNON C C,JONES W L,et al. Evaluation of hurricane ocean vector winds from WindSat[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2006,44(3):656–667.
- [22] TURK F J,DIMICHELE S,HAWKINS J. Observations of tropical cyclone structure from WindSat[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2006,44(3):645–655.
- [23] 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 & Remote Sensing*, 2006,44(3):584–596.
- [24] FREILICH M H,VANHOFF B A. The accuracy of preliminary WindSat vector wind measurements: comparisons with NDBC buoys and QuikSCAT[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2006,44(3):622–637.
- [25] MAI M,ZHANG B,LI X F,et al. Application of AMSR-E and AMSR2 low-frequency channel brightness temperature data for hurricane wind retrievals[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2016,54(8):4501–4512.
- [26] HONG S,SEO H,KIM Na,et al. Physical retrieval of tropical ocean surface wind speed under rain-free conditions using spaceborne microwave radiometers[J]. *Remote Sensing Letters*, 2015,6(5):380–389.
- [27] FORE A G,YUEH S H,TANG W,et al. Combined active/passive retrievals of ocean vector wind and sea surface salinity with SMAP[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2016,54(12):7396–7404.