

海洋卫星微波遥感技术发展现状与展望

蒋兴伟, 宋清涛

国家卫星海洋应用中心, 北京 100081

摘要 主动式和被动式微波遥感可以得到大量的地球物理参数和上层海洋信息, 包括海表温度、海面矢量风、海面高度、海表盐度、海冰等。微波遥感可以穿透云层, 全天候不间断观测海况信息。中国计划 2011 年发射运行的“海洋”2 号 (HY-2A) 卫星有效载荷为 3 个微波传感器, 主要用来观测海面矢量风、海表温度和海面高度。HY-2A 卫星将有效提高全球海洋卫星观测在时间和空间上的采样频率。本文介绍了与 HY-2A 卫星相关的海洋微波遥感技术现状, 对微波遥感的优势和目前业务化运行的海洋微波卫星的局限性进行分析, 总结了微波遥感的新技术进展和全球下一代微波遥感卫星的发射计划, 最后指出发展中国立体海洋监测和中国“海洋”3 号 (HY-3) 卫星 (其主载荷为 C 频段多极化合成孔径雷达) 对于更深入了解大洋和海岸带的必要性。

关键词 微波遥感; 海洋遥感; 微波辐射计; 海面高度计; 散射计

中图分类号 P732.1

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)03-0105-07

Satellite Microwave Measurements of the Global Oceans and Future Missions

JIANG Xingwei, SONG Qingtao

National Satellite Ocean Applications Service, Beijing 100081, China

Abstract A wide variety of geophysical information including Sea Surface Temperature (SST), Ocean Vector Winds (OVW), Sea Surface Height (SSH) and Sea Surface Salinity (SSS) can be retrieved by satellite-borne microwave sensors. Cloud is nearly transparent to microwave, and the availability of all-weather microwave satellite measurements has overcome many limitations of traditional optical and infrared measurements. The China ocean satellite 2 (HY-2A), scheduled to be launched in 2011, with primary objective of measuring SST, SSH and OVW, will significantly increase the sampling frequency over the global oceans while working together with other operational microwave satellites. This paper reviews the up-to-date ocean microwave satellite missions, outlines the future microwave missions and new technologies used to overcome limitations of the current microwave sensors, and addresses the importance of multi-dimensional observing system that combines high-resolution microwave (China's ocean satellite 3, HY-3), optical and infrared sensors as well as traditional measurements over the coastal and global oceans. It is concluded that (1) microwave measurements of SST are especially suitable for resolving mesoscale structure associated with the western boundary current systems (e.g. the Gulf Stream, the Agulhas Current) and their eastward extension into the interior ocean, where significant amount of clouds typically exist; (2) microwave measurements of surface wind are critical in understanding the mesoscale interaction processes near the oceanic fronts, and surface wind is an important physical parameter in improving the marine environmental forecasting skills; (3) microwave measurements of sea surface height have revolutionized our understanding of ocean circulations and large scale ocean wave theories. Finally, it is suggested that sustained microwave observations with resolution and accuracy at least as good as AMSR, QuikSCAT and TOPEX/Poseidon are required to understand the implications of short-term and long-term climate variability.

Keywords microwave remote sensing; ocean remote sensing; microwave radiometry; altimetry; scatterometry

收稿日期: 2009-12-21

基金项目: 中国高技术研究发展计划 (863 计划) 重点项目 (2007AA092201); “十一五”国家科技支撑计划项目 (2006BAC03B00-04-01); 中国高技术研究发展计划 (863 计划) 项目 (2008AA09A403)

作者简介: 蒋兴伟, 研究员, 研究方向为海洋遥感应用, 电子信箱: xwjiang@mail.nsoag.gov.cn; 宋清涛 (通信作者, 中国科协所属全国学会个人会员登记号: S110006258M), 研究员, 研究方向为海洋遥感和边界层物理, 电子信箱: qsong@mail.nsoas.gov.cn

0 引言

自美国第一颗微波遥感卫星“雨云”5号(Nimbus-5)成功发射以来,星载微波遥感已经有38年的历史^[1]。通过5GHz到90GHz的微波频段观测地球,主动式和被动式微波遥感可以得到大量的地球物理参数和上层海洋信息,包括海表温度(Sea Surface Temperature,SST)、海面矢量风(Ocean Vector Wind,OVW)、海面高度(Sea Surface Height,SSH)、海表盐度(Sea Surface Salinity,SSS)、海冰、海上风暴、海上降水等海况的多种重要动力参数^[2]。理解上层海洋动力过程以及相关的化学、生物过程对掌握地球系统的变化规律至关重要。海洋覆盖了超过70%的地球表面积并存储了气候系统最多的热量,因而海洋环流与海气相互作用从根本上驱动了天气和气候的变化率。

20世纪90年代以前,由于受到海洋微波遥感技术的限制,海洋微波遥感一直处于探索、试验和准业务化阶段。1992年,美国和法国联合发射了TOPEX/Poseidon(T/P)卫星,星上载有主动式雷达高度计用于探测海面高度。从各个角度来说,T/P都是第一颗成功的海洋微波遥感卫星,为海洋科学的研究和业务化应用提供了高质量的海面高度场数据^[3]。1999年,美国发射了主动式微波散射计的专用卫星QuikSCAT,用于弥补美国航空航天局(NASA)散射计NSCAT因卫星电源失效而造成的海面风场数据空缺^[4]。QuikSCAT取得了巨大的成功,它从1999年6月到2009年11月提供了10年准实时全球海面风场和海冰面积等海洋参数数据。伴随T/P和QuikSCAT成功地提供全球海面高度和风场数据,2002年6月,搭载在由日本和美国联合发射的Aqua卫星上的微波辐射计AMSAR,开始了全天候不间断观测海表温度,标志着海洋微波遥感技术的成熟和完全业务化^[5]。

随着微波高度计T/P、微波散射计QuikSCAT和微波辐射计AMSAR的成功业务化运行,微波遥感全天候、全天时、高覆盖度的观测能力引发了研究人员对传统的上层海洋动力学、海气相互作用、全球气候变化等的研究热潮^[3,5-8]。例如,通过构建12年T/P海面高度数据,Leuliette等提出全球平均海平面以每年3.2mm的速度上升^[9]。人们逐渐开始认识到,一个长时间序列的微波遥感数据是了解海洋和全球气候关键的观测基础。

维持连续的海洋微波遥感资源需要世界各国的通力合作。中国计划2011年发射的“海洋”2号(HY-2A)卫星的有效载荷为3个微波遥感器:多通道微波辐射计、雷达高度计和微波散射计,主要用于观测海表温度、海面高度和海面矢量风。HY-2A卫星将有效地提高全世界海洋卫星观测数据在时间和空间上的采样频率。本文的目的是介绍与HY-2A卫星相关的微波观测技术现状,分析微波遥感优势和目前业务化运行的海洋微波卫星的局限性,总结了微波遥感的新技术进展和全球下一代微波遥感卫星的观测计划,以及发展中国海洋立体监测和中国海洋监视监测卫星(即HY-3卫星)对于更深入了解大洋和海岸带的必要性。

1 海洋微波遥感的特性和优势

海洋微波遥感是利用电磁波和海面的微波频段特性对海面信息进行获取的一种技术手段,并通过微波极化、相位、干涉等技术获得更多更精确的信息。海洋微波遥感通过被动和主动方式获取海面信息。被动式海洋微波遥感是利用分子热运动产生的自然辐射强度和极性随辐射波长、海面粗糙度、海水的介电特性而变化的规律推知海面温度、海面风速、风向和表层海水盐度^[10]。主动式微波遥感器是向海面发射微波频段能量的雷达系统,用来观测海面反射或散射的雷达回波,确定海面高度和海面风矢量。无论主动或被动方式获取海面信息,微波遥感都具有全天候观测能力,不受日照影响,也几乎不受天气系统影响。大气中的云层对于红外和可见光电磁辐射是完全不透明的;相对而言,云层对于微波辐射是几乎透明的,这是海洋微波遥感对于红外和可见光遥感的一个最主要优势。因为在任何时候,60%的赤道海域和超过75%的中纬度海区都被云层所覆盖^[11]。与大气中氧气分子和水分子对微波电磁辐射的衰减作用一样,云层中水滴微粒(或冰晶)的尺度远小于低频段的微波辐射波长,因而微波辐射在云层的衰减遵循瑞利散射规律。在任何一个位置的微波传输衰减同云层的含水量呈正比,同时也取决于水滴的温度。图1给出了微波辐射在云层的双向衰减与微波频率和水滴温度的函数关系,图中衰减系数取自Ulaby等^[12],并假定典型云层含水量为1.0g/cm²。微波传输衰减随频率的增大而增大,随着水滴温度的降低(高云)而增大。对于海洋卫星常用的Ku频段(13.6GHz),其传输衰减小于0.5dB;对于常用的C频段(5.1GHz),微波传输衰减比Ku频段小两个数量级。这是因为Ku频段波长(2cm)比C频段波长(6cm)接近水滴微粒尺度,因而瑞利散射相对明显一些。需要指出的是,降水中的雨滴尺寸远大于云层中的水滴,因此降水对于微波传输的影响不

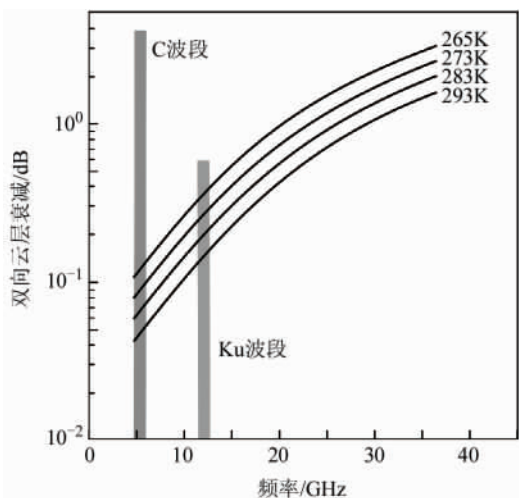


图1 微波辐射在云层中的双向传输(发射/回收)衰减系数
随发射频率和云层温度的变化

Fig. 1 Two-way cloud attenuation of microwave transmission as a function of frequency and cloud temperature

容忽视。对于强降水,微波传输受到明显衰减,从而影响海洋信息的获取,就是通常所说的“降水污染”^[13]。

除了云层对于微波几乎透明以外,大气气溶胶对微波传输也几乎没有影响;后者对于传统的红外波段海温遥感会产生一个冷偏差,这是红外遥感无法从根本上克服的难题。

2 微波辐射计的海表温度观测

SST 对于海洋和气候的了解至关重要。例如,SST 是决定海气界面水循环和能量循环的一个重要参数,从而决定全球水循环和全球表面的能量收支平衡^[14]。台风的强度、频率、发

生和登陆位置很大程度都决定于其下垫面海水温度对台风的维持、促生和衰减过程^[15]。大尺度气候变化包括厄尔尼诺、南方涛动(ENSO)和北大西洋涛动(NAO),它们都具有明显的 SST 变化特征。

目前绝大多数关于天气和气候的研究都是基于红外遥感的海温资料。2002 年以来,基于微波遥感的 AMSR SST 揭示了传统的红外遥感海温的局限。图 2 分别给出了 AVHRR 红外传感器和 AMSR 微波传感器获取的全球海表温度分布。因南大洋、北太平洋和北印度洋几乎被云层覆盖,红外遥感无法获取这些海区

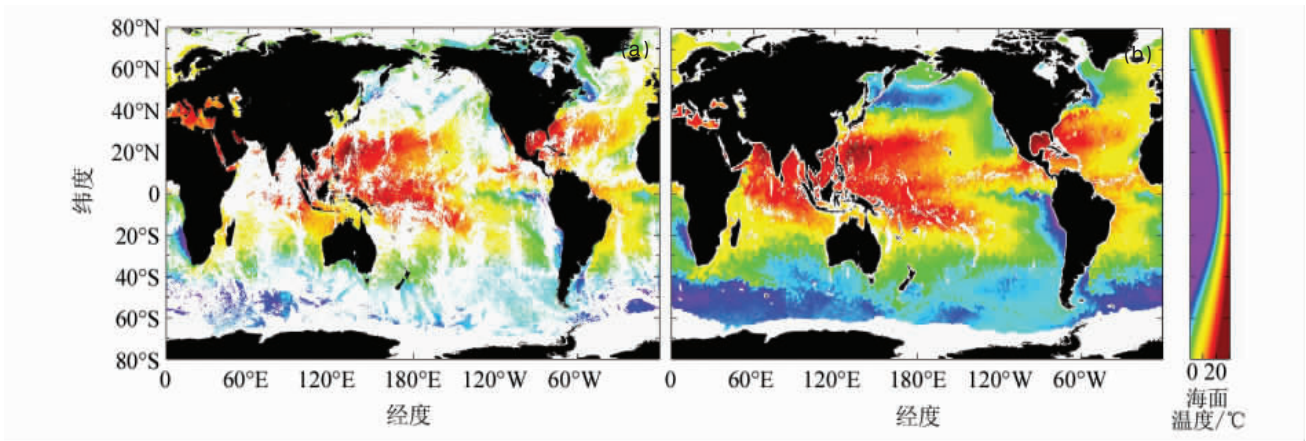


图 2 由红外辐射计 AVHRR(a)和微波辐射计 AMSR(b)观测的全球海温 2d 合成图

Fig. 2 Global maps of two-day composite (24–25 June, 2002) of sea surface temperatures from infrared AVHRR sensor (a) and microwave sensor AMSR (b)

注:时间为 2003 年 6 月 24—25 日,白色区域为数据缺失,黑色为陆地

Notes: White is missing values and black is land

微波遥感可以穿透云层从而为全球绝大部分海区,提供不间断的清晰海温观测。虽然 AMSR SST 的空间分辨率较低(大约 50km,与红外遥感的 1km 空间分辨率相比),并且不能观测大约 75km 的海岸带(由于微波接收天线旁瓣受到陆地的污染),但是由于红外遥感受到云层的频繁影响,微波遥感大洋海温在时间和空间上都具有较高的采样率。微波遥感在采样率上的优势尤其表现在具有丰富海温结构的大洋西边界流上(图 3)。在非洲大陆南端、印度洋和大西洋之间,阿加勒斯回流(Agulhas Return Current,ARC)是由低纬度流向南大洋高纬度的暖流,具有丰富的中尺度(100~1000km)海温结构。ARC 海区常年受中尺度天气系统影响,微波遥感提供的全天候不间断的海温观测已经成为研究 ARC 动力学的观测基础^[6]。

目前,基于多通道微波反演的 AMSR SST 单个观测准确度是 0.4℃^[6],与业务化红外 AVHRR SST 相当。因为微波传输对红外遥感产生冷偏差的大气气溶胶不敏感,微波遥感海温具备深入了解气候系统的潜在优势。笔者认为,最优全球海温观测将是客观结合在晴空海区获得的高分辨红外海温和全天候微波海温。

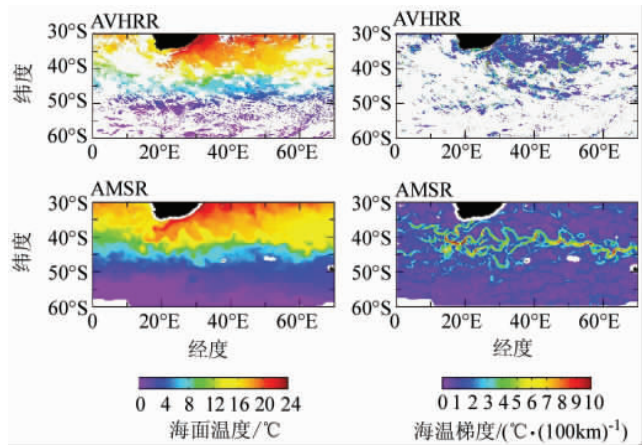


图 3 非洲大陆南端阿加勒斯回流附近的海面温度和海温梯度

Fig. 3 Maps of SST and SST gradient over the Agulhas Return Current region near the southern tip of Africa on 5 July 2002

注:时间为 2002 年 7 月 5 日;白色区域为数据缺失;沿非洲大陆海岸的白色区域为 AMSR 微波辐射计由于旁瓣污染引起的数据缺失

Notes: White is missing values. The missing values near coastal Africa are due to microwave side lobe contamination

3 雷达高度计的海面高度观测

除了在赤道海区附近,在几天以上时间尺度和几十公里以上空间尺度,海流非常近似于地转平衡,海流的速度和方向可以从在地球等位势面的压力梯度得出^[9],所以卫星雷达测高可以提供全球的海流信息。全球平均海平面上升是作为全球气候变暖的最直接的综合表现之一。从1992年开始,T/P和Jason雷达高度计积累了16.5年的全球海面高度的精确数据。从这些数据得出的平均海平面每年上升3.2mm的结论一直用来作为全球变暖的证据,并验证气候模式。

雷达高度计通过测量微波脉冲双程传输时间并结合卫星平台位置和海洋基准面来确定海面高度。随着卫星精确定轨技术、大气折射校正技术、消除海洋潮和大气潮混频技术的提高,卫星测高的准确度从1975年第一颗载有雷达高度计的GEOS-3卫星开始逐渐提高(图4)。T/P是第一个可以精确测量海面高度的微波遥感卫星,其总体准确度达到4.1cm。作为T/P的后继卫星,Jason-1和Jason-2持续保持小于3cm的海面测高准确度,提供了长时间序列全球海平面数据,极大促进了海洋学、海洋气象学和气候学的发展和海洋大气的预报精度。值得指出的是,2002年3月,欧洲空间局(ESA)发射的Envisat卫星载有RA-2雷达高度计,提供全球精确的海面高度观测资料。Envisat卫星运行在太阳同步轨道上,因此所观测的海面高度数据不可避免地包含了太阳潮混频信息、日变化引起的电离层变化和大气潮变化的混频信息。这些混频信息影响了Envisat数据用于研究海平面随气候的变化。

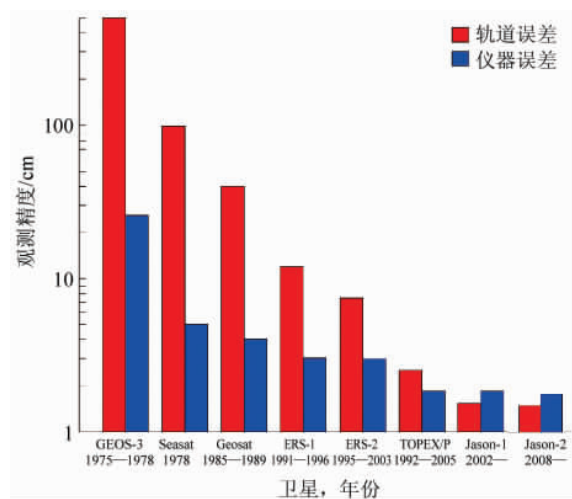


图4 微波雷达高度计的历史观测精度

Fig. 4 History of satellite altimeter's accuracy

雷达测高最大的误差是海洋表面状况(波峰、波谷和波动引起的海面倾斜度)对测高引起的偏差。海面状况误差未被完全了解,目前此误差通过经验校正暂时解决。与微波辐射计不能观测海岸带海温一样,雷达高度计无法精确测量近海岸带50km海面高度的数据。造成雷达高度计在海岸带数据缺失的原因是多方面的,其中陆地对微波旁瓣的污染仅为5km;卫星从陆地飞越海面的定位稳定过程需要约15km调整

距离;最大数据损失来源于用来校正大气折射的微波辐射计(距离海岸带50km才能精确估计大气水汽含量)。目前,微波测高技术的最大限制是高度计只能推算卫星星下点的海面高度,造成高度计在空间和时间采样率的不足,极大限制了高度计数据在研究中小尺度海洋气象过程的能力。

除了通过研制具备宽刈幅观测能力的新一代高度计之外,多星数据融合也可以有效改善目前高度计空间采样率不足的限制。例如,Chelton和Schlax^[16]通过分析T/P海面高度数据,首次发现了海洋Rossby波。然而近年来对T/P和ERS-1/2高度计融合数据表明,海洋高度的变化更多的是位于中纬度的中小尺度海涡运动,并非传统认为的Rossby波^[17]。随着多星观测数据的积累和融合,更多海洋现象被发现,促进并加深人们对海洋的了解。

4 微波散射计的海面矢量风观测

海洋表面风通过决定海气界面的动量、水汽、热量和CO₂的传输过程影响天气和气候的变化。卫星微波遥感是目前唯一可以精确观测全球海面矢量风的技术手段。主动式微波遥感(微波散射计)通过雷达发射回波信号的强弱以及不同角度的发射回波信号反演出风速和风向。主动式散射计实质上观测的是海面的粗糙度,与风应力直接相关,传统的散射计产品是假定中性大气层结然后校正到10m的风矢量(equivalent neutral wind)^[18]。被动式微波遥感(极化微波辐射计)通过观测不同极化方向的海面自然微波辐射推知风速和风向。目前,微波遥感的实践证明这两种方式都可以有效地观测海面矢量风。

1996年发射的NSCAT散射计,提供了连续8个月覆盖全球的高质量海面矢量风数据。作为NSCAT的迅速恢复观测计划(Quick Recovery Scatterometer),QuikSCAT于1999年9月发射,到2009年11月共提供超过10年的全球风场数据,其风速和风向观测的准确度都与NSCAT相当。QuikSCAT的标准风矢量2级产品是网格化到25km的格点上。虽然有12.5km网格间距甚至2.5km的2级产品,但高空间分辨率数据被证明夹带了更多的噪音^[19]。

作为验证极化微波辐射计可以获取海面矢量风的试验型被动式散射计(成像散射计),美国WindSAT在2003年1月成功发射并获取了大量的风场数据。为了提高海面自然微波辐射的信噪比和减轻海面降水天气对自然微波传输的影响,WindSAT观测的海面风场的时间采样率不及QuikSCAT的50%(图5)。利用太平洋东部的浮标风场数据进行的真实性检验和利用QuikSCAT的交叉定标,Freilich和Vanhoff^[20]发现WindSAT对于大于20m/s风速产生饱和,并且在低风速区(<10m/s)反演风向的误差较大。虽然WindSAT被美国极轨业务环境卫星系统(NPOESS)定为不合格的散射计而取消其后续发射计划,但极化微波辐射计WindSAT基本上解决了长期困扰美国海洋矢量风专家组(OVWST)关于主动式散射计QuikSCAT无法从根本上解决风向模糊问题。WindSAT的经验为下一代微波遥感海面风场提供了新的思路 and 依据。

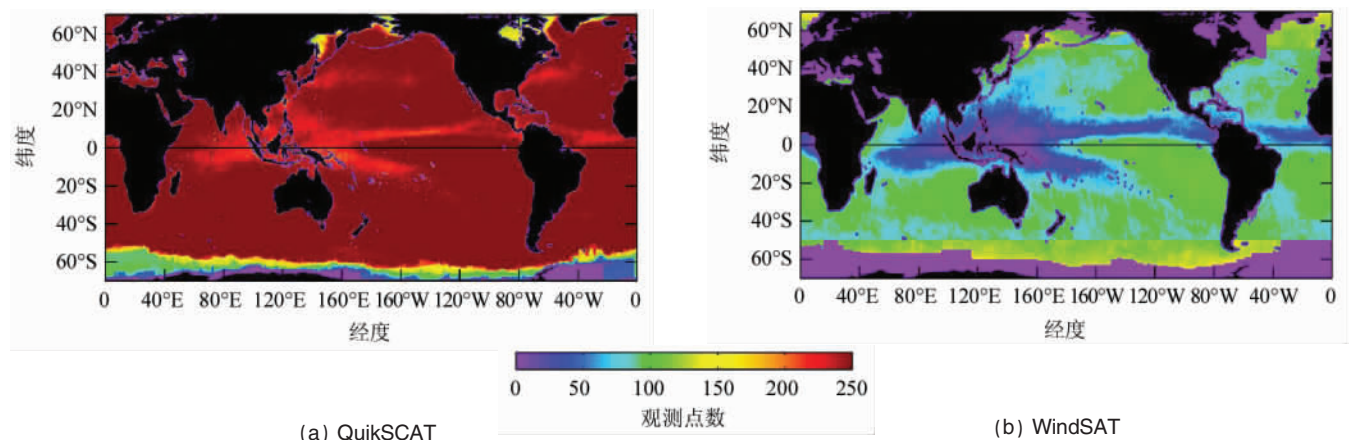


图 5 2005 年微波散射计 QuikSCAT 和 WindSAT 的全球观测点数
Fig. 5 Number of global observations from microwave scatterometer QuikSCAT and WindSAT in 2005

5 下一代微波遥感卫星

伴随 20 世纪 90 年代以来微波遥感海面信息的成功,极大地推动了海洋、气象和气候的研究和业务化应用。其中标志性的成功发射计划是 1992 年的 T/P 卫星高度计、1999 年的 QuikSCAT 散射计和 2002 年的 AMSR 微波辐射计。如第 2、3 和 4 节所述,目前的微波遥感卫星在观测海面温度、高度和风场都存在一系列局限性。归纳起来表现在:① 微波遥感器在海岸带数十公里范围内不能准确观测海面信息(微波旁瓣污染);② Ku 高频波段的微波遥感器在强降雨带不能准确获

取海面信息;③ 目前雷达高度计空间采样频率过低,无法获取星下点以外海面高度信息;④ 主动式微波散射计的风向模糊问题及高风速(>25m/s)误差问题;⑤ 高空间分辨率的散射计风场的噪音问题。

根据气候研究对长时间序列观测数据的要求和目前微波卫星的局限,全球下一代微波遥感卫星沿着两条主线发展。第一条主线是利用现有成熟的微波技术,发射一系列的海洋微波遥感卫星对海温、海面高度和海面风场等海洋参数的持续观测。图 6 列出了近期和将来美国、欧洲、中国的微波

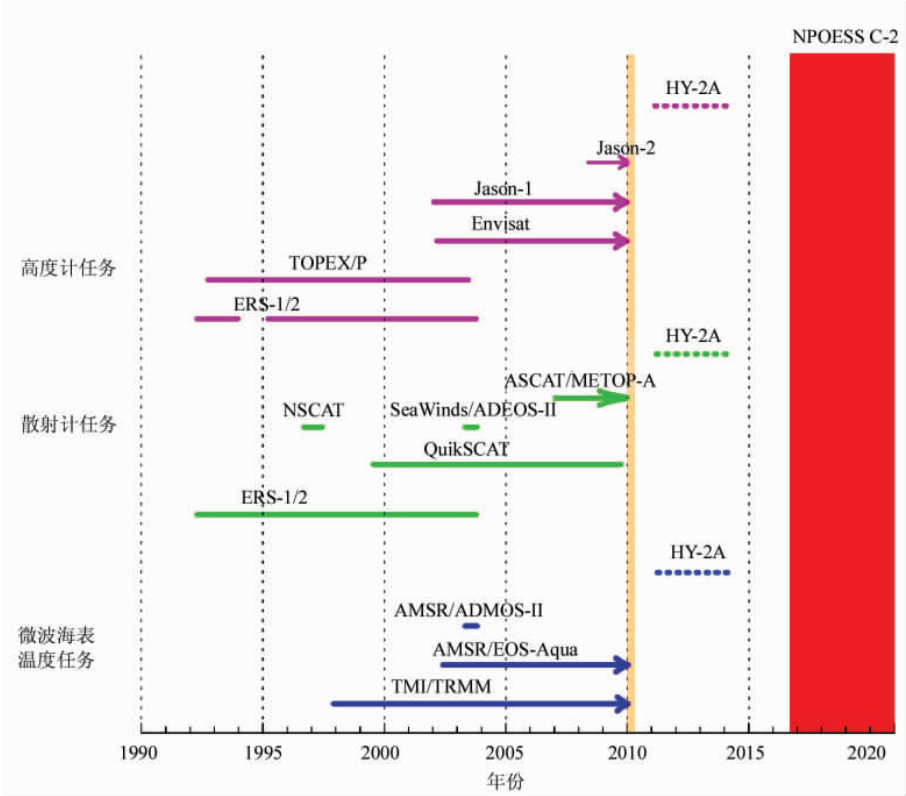


图 6 当前和将来主要微波海洋遥感卫星发射计划
Fig. 6 Present and future microwave satellite missions that measure sea surface temperature, height and vector winds

遥感卫星发射计划,图中红色区域代表美国极轨环境卫星发射计划(NPOESS),现在还没有具备同样或更好观测能力的微波海洋卫星发射计划。目前,海面高度和海面温度可以保证数据的持续性。不容乐观的是,QuikSCAT经过了10年几乎不间断的海面风场观测,在2009年11月23日由于转动天线故障停止服务(Chelton,私人通讯,2009)。2007年,美国NPOESS进行了重组,许多发射计划被更改和取消,目前没有继续QuikSCAT的发射计划。因此,2011年中国计划发射的HY-2A卫星将在填补可能出现的海面风场数据空白方面起到重要作用,而且结合其他海洋微波遥感卫星提高SSH、SST和OVW的时间和空间采样率(图7)。例如,HY-2A卫星风场在采样频率上与QuikSCAT相当,双星结合将观测全球85%海洋面积的时间从24h缩短到10h,从而促进中小尺度海气过程的研究,提高对海洋天气系统的观测。

第二条主线是对现有的微波遥感技术进行改进,或采用合成孔径雷达高分辨技术(Synthetic Aperture Radar,SAR)、三维成像雷达高度计和成像微波散射计解决目前微波遥感存在的局限和问题。预计2013年发射的美国拓展海面矢量风卫星(XOVWM)融合了QuikSCAT、WindSAT和SAR的成熟技术,通过增加C和X微波波段散射计、增大天线尺寸和Ku波段的SAR处理技术,基本可以解决本节所述的有关散射计的局限性(1、2、4和5)。

宽幅合成孔径雷达干涉高度计(SWOT)是下一代的海面高度计,将工作在Ka波段(约35GHz),其刈幅扫描宽度可达110km,测量海洋高度的数据单元为1km×1km,测量准确度为1cm。SWOT的空间分辨率使对10km尺度海洋过程的观测成为可能,预计2018年发射(目前还没有正式被NASA批准)。

随着微波遥感技术的成熟,在低频波段(约1.5GHz)对全球SSS的观测成为可能。由于海水盐度的变化由降水、蒸发、河流、海冰的消融决定,因此海水盐度是用来监测和决定全

球水循环、气候变化和大洋环流的重要诊断参数。目前有两个卫星计划用于观测盐度:第一个是ESA的SMOS卫星(土壤湿度和海洋盐度),于2009年11月2日在俄罗斯发射成功,目前处于在轨测试阶段;另一个SSS卫星Aquarius(美国和阿根廷联合研制)计划于2010年发射。由于海面自然微波辐射能量微弱和天线尺寸限制,它们的月平均观测精度为0.2psu,但空间分辨率仅150~200km。目前,海表盐度的海面遥感技术和应用仍处于试验阶段,但在物理海洋和全球气候研究方面的应用前景十分广阔。

6 结论

本文综述了星载微波海洋遥感观测海面高度、海面温度和海面矢量风的技术现状,并介绍了下一代海洋微波卫星发射计划及其克服目前微波卫星的局限的新技术。全天候观测全球多种海面信息的微波卫星已经被证明不但促进了海洋、气象和气候的变化的科学研究,而且其业务化应用对海岸带国计民生产生重要积极作用。

一个长时间序列的全球卫星观测数据对了解海洋和全球气候变化提供了关键的观测基础。目前1999年开始运行的QuikSCAT可能随时停止服务。欧洲散射计ASCAT在时空的采样率都满足不了业务和研究的要求。计划2011年发射的HY-2A卫星不但对中国海洋科学研究和业务应用至关重要,而且对维持对海洋的连续观测和提高时空采样率起到关键作用。中国下一代海洋高分辨微波遥感卫星(HY-3)将同时提供对大洋和临岸海域全天候、高分辨率动力环境观测,弥补目前世界上微波海洋卫星无法获取临岸30~75km海域信息的不足。

值得指出的是,星载海洋遥感卫星观测的绝大部分是海洋表面的信息。对三维海洋结构及其物理、化学和生态过程的了解,需要结合传统的观测手段(如飞机航测、考察船、浮标、高频地波雷达等)和最新的现场观测手段(如声纳阵列、海底声纳、等密度和等深度探测器、水下滑翔探测器),同时结合海上辐射校正与真实性检验场,形成以卫星为主体的中国立体海洋观测体系,为深入了解海洋和国计民生提供科学依据。

致谢 感谢Dudley Chelton和Michael Freilich的有益讨论。

参考文献 (References)

- [1] Staelin D H, Kunzi K F, Pettyjohn R L, *et al.* Remote sensing of atmospheric water vapor and liquid water with the Nimbus-5 microwave spectrometer [J]. *J Appl Meteor*, 1976, 15: 1204-1214.
- [2] Martin S. 海洋遥感导论[M]. 蒋兴伟,等,译. 北京:海洋出版社,2008. Martin S. An introduction to ocean remote sensing [M]. Jiang Xingwei, *et al.*, tran. Beijing: China Ocean Press, 2008.
- [3] Fu L L, Cazenave A. Satellite altimetry and Earth sciences [M]. San Diego, California: Academic Press, 2001.
- [4] Draper D W, Long D G. An assessment of SeaWinds on QuikSCAT wind retrieval[J]. *J Geophys Res*, 2002, 107: 3212-3226.

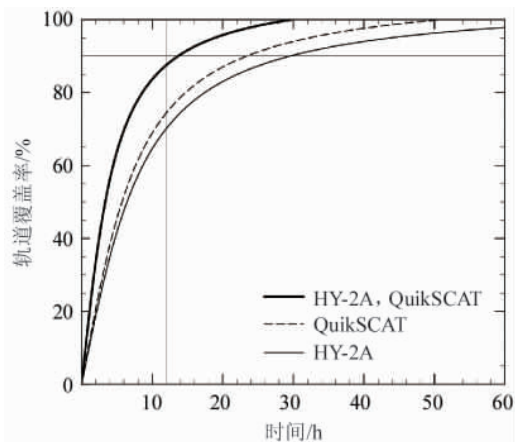


图7 微波散射计QuikSCAT、HY-2A和双星结合观测全球风场覆盖率(75°S~75°N)

Fig. 7 Percent global coverage of QuikSCAT, HY-2A scatterometer, and the combined observations of ocean vector winds from 75°S to 75°N

- [5] Chelton D B, Wentz F J. Global microwave satellite observations of sea-surface temperature for numerical weather prediction and climate research[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 2005, 86: 1097-1115.
- [6] Chelton D B, Schlax M G, Freilich m H, *et al*. Satellite measurements reveal persistent small-scale features in ocean winds [J]. *Science*, 2004, 303: 978-983.
- [7] Song Q, Cornillon P, Hara T. Surface wind response to oceanic fronts[J]. *J Geophys Res*, 2006, 111: 1-23.
- [8] Song Q, Chelton D B, Esbensen S, *et al*. Coupling between sea surface temperature and low-level winds in mesoscale numerical models[J]. *Journal of Climate*, 2009, 22: 146-164.
- [9] Leuliette E R, Nerem R, Mitchum G. Calibration of TOPEX/Poseidon and Jason altimeter data to construct a continuous record of mean sea level change[J]. *Marine Geodesy*, 2004, 27: 79-94.
- [10] Robinson I S. Measuring the oceans from space [M]. Cambridge: Springer-Praxis, 2004.
- [11] Hahn C J, Warren S, London J. The effect of moonlight on observation of cloud cover at night, and application to cloud climatology [J]. *Journal of Climate*, 1995, 8: 1429-1446.
- [12] Ulaby F T, Moore R, Fung A K. Microwave remote sensing, active and passive, Vol. I: Microwave remote sensing fundamentals and radiometry [M]. Reading: Addison-Wesley Publishing Co, 1981.
- [13] Draper D W, Long D G. Evaluating the effect of rain on SeaWinds scatterometer measurements[J]. *J Geophys Res*, 2004, 109: doi:10.1029/2002jc001741.
- [14] Curry J A, Bentamy A, Bourassa M A, *et al*. Seaflux[J]. *Bull Amer Meteorol Soc*, 2004, 85: 409-424.
- [15] Ginis I, Khain A P, Morozovsky E. Effects of large eddies on the structure of the marine boundary layer under strong wind conditions [J]. *J Atmos Sci*, 2004, 61: 3049-3064.
- [16] Chelton D B, Schlax M G. Global observations of oceanic Rossby waves [J]. *Science*, 1996, 272: 234-238.
- [17] Chelton D B, Schlax M G, Samelson R M, *et al*. Global observations of large oceanic eddies [J]. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: doi:10.1029/2007GL030812.
- [18] Liu W T, Tang W. Equivalent neutral wind[R]. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, 1996.
- [19] Spencer M W, Tsai W-Y, Long D G. High resolution measurements with a spaceborne pencil-beam scatterometer using combined range/doppler discrimination techniques[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41: 567-581.
- [20] Freilich M H, Vanhoff B. The accuracy of preliminary WindSat vector wind measurements: Comparisons with NDBC buoys and QuikSCAT[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44: 622-637.

(责任编辑 朱宇)

第三届中国动力学、振动与控制学术会议

The Third International Conference on Dynamics,
Vibration and Control

时间: 2010年5月12—14日

地点: 浙江·杭州

主办单位

中国力学学会

通信地址: 杭州市浙江大学航空航天学院 (310027)
电子信箱: weiqiuzhu@zju.edu.cn
联系电话: 0571-87983102