

新型海洋微波遥感器技术研究进展

张 杰¹, 刘和光², 林明森³, 张振华⁴, 陈 萍⁵

(1. 国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 2. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100000; 3. 国家卫星海洋应用中心, 北京 100000; 4. 北京遥测技术研究所, 北京 100000; 5. 华中科技大学, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 海洋微波遥感器是目前全球海洋动力环境参数观测、海上目标监测的重要手段。为克服现有微波遥感器在观测中存在的不足, 发展新型的海洋微波遥感器是必然的。文中主要介绍了海浪波谱仪、成像高度计和盐度计三种新型海洋微波遥感器, 在介绍其国内外研究现状的基础上, 指出了下一步应研究的重点。

关键词: 新型微波遥感器; 波谱仪; 成像高度计; 盐度计

中图分类号: TP732.1 文献标志码: A 文章编号: 1003-2029(2015)03-0001-07

海洋微波遥感是利用电磁波在海面的反射和散射特性以及海面自然发射的微波频段特性对海面动力和热力信息进行获取的一种技术手段, 并通过极化、相位、干涉等技术获得更多更精确的海洋表面信息^[1]。微波遥感由于不受雨雾影响且不依赖于太阳照射的特点, 使其在海洋动力环境观测中具有全天候、全天时的技术优势。

海浪波谱仪、成像高度计和盐度计是三种新型海洋微波遥感器, 目前只有盐度计发射升空, 未实现其科学目标, 另两种处于计划发射状态, 因此我们有必要对上述三种遥感器予以特别的关注。

本文主要介绍了海浪波谱仪、成像高度计和盐度计三种新型海洋微波遥感器, 在介绍其国内外研究现状的基础上, 指出了下一步应研究的重点。

1 海浪波谱仪

海浪波谱仪是一种真实孔径雷达, 在小入射角的条件下, 通过方位向 360°扫描观测来获取二维海浪谱, 具有原理简单、处理算法易于实现、可探测较小波长(如 50 m)波浪等技术优势。

1.1 波谱仪国内外研究进展

1981 年, Jackson^[2]基于准镜面散射理论, 提出了

波谱仪探测原理。其主要思想是: 小角度入射下, 雷达后向散射贡献主要来自波长大于 3~5 倍雷达波长的海浪的准镜面散射, 长波(波谱仪可探测的海浪)的贡献表现在对后向散射系数的调制。在此理论框架下, 小入射角下的雷达后向散射截面与海浪斜率的概率密度线性相关, 从雷达后向散射的调制信号中就可以提取海面的斜率谱, 从而得到波高谱。

1985 年, 美国航天局 NASA 研制了一个 Ku 波段(频率 13.9 GHz, 波长为 2.24 cm)高距离分辨率机载雷达系统 ROWS(Radar Ocean Wave Spectrometer)^[3-4]。测量得到的二维海浪方向谱与浮标以及传统的立体海浪摄影技术结果基本一致。

1991 年, Hauser 等在欧洲空间局(ESA)和法国空间局(CNES)的支持下, 开始研制机载海浪波谱仪 RESSAC(Radar pour l'Etude du Spectre des Surfaces par Analyse Circulaire)^[5]。RESSAC 是一个 C 波段 FM/CW 机载真实孔径雷达, 可以用于测量海洋波浪的方向谱、海面风场和大气参数, 可探测的海浪波长范围为 30 ~ 400 m。RESSAC 开展了大量试验, 使得小入射角真实孔径雷达测量海洋波浪谱的可行性得到了进一步验证。2000 年, Hauser 等对 RESSAC 海浪波谱仪进行了改进, 主要是对转速、波束宽度以及天线平均入射角进行了调整, 改名为

收稿日期 2015-03-10

基金项目 国家自然科学基金资助项目“雷达高度计海况偏差校正综合模型研究”(41176157)

作者简介 张杰(1963-) 男, 研究员, 主要研究领域为海洋遥感遥测技术。E-mail: zhangjie@fio.org.cn

STORM (Système de Télédétection pour l'Observation par Radar de la Mer)^[6], 其除能获取海浪方向谱外, 还可用于不同方位向下海面极化散射特性的研究。2007 年, Hauser 等开始研究星载海浪波谱仪系统, 建立了星载波谱仪仿真平台 SWIMSAT^[7]。

2007 年中法海洋卫星合作项目启动。计划在 2018 年发射的中法卫星(CFOSAT)上将搭载波谱仪 SWIM, 它将是世界上第一个专门用来探测海浪方向谱的星载微波传感器。为配合中法星的发射, CNES 的 Tison 和 Enjolras 等人已开展 SWIM 海浪方向谱反演仿真^[8-10], 结果表明, SWIM 的初步设计可以满足科学需求。

1.2 波谱仪发展“十三五”设想

搭载海浪波谱仪的中法海洋卫星计划于 2018 年发射, 因此, 建议重点开展的工作:

(1) 开展海浪波谱仪机载校飞实验, 为星载波谱仪进行功能验证。

(2) 基于海浪波谱仪仿真与校飞数据, 开展波谱仪海浪谱信息提取技术研究。

(3) 待星载波谱仪发射后, 开展现场同步观测实验, 进行海浪波谱仪数据反演方法改进和反演精度验证。

(4) 挖掘基于波谱仪的其它海浪参数如海浪斜率等的提取技术。

2 成像高度计

卫星高度计可以快速准确地测得全球的海面高度, 其测高精度已经达到厘米级, 但不能获得较高地面分辨率的数据。合成孔径雷达(SAR)是一种主动微波成像雷达, 分辨率在数米到数十米的量级, SAR 只能得到二维图形, 不能获取目标场景的三维信息。虽然 InSAR 能得到高程信息, 但只能在陆地中应用, 不能获得海洋目标的三维信息。三维成像雷达高度计是综合了偏离天底点观测技术与高度跟踪测量技术、合成孔径技术和干涉技术发展起来的新型微波遥感技术, 在海洋三维立体成像、海洋大地水准面、洋流、中尺度涡、海面风场、海浪和潮汐等方面有良好的应用前景^[11]。

2.1 国外成像高度计发展现状

宽刈幅海洋高度计 WSOA (Wide-Swath Ocean Altimeter) 计划最先由美国 NASA 提出, NASA 的喷气推进实验室 JPL 负责实施。然而在 2005 年由于

考虑到对 Jason-2 任务可能造成的风险以及预算超支, WSOA 被取消。

SWOT (Surface Water Ocean Topography) 任务作为 WOSA 计划的后续发展, 由 NASA/JPL 和 CNES 联合开发^[12-13], 其主要任务是: 以 10 km 以及更高的空间分辨率刻画海洋的中尺度和次中尺度环流, 提供全球超过 250 m² 的水体和宽度达到 100 m (目标为 50 m) 的河流的储量, 以及这些储量的月/旬/年变化。SWOT 卫星数据的产品见表 1。

表 1 SWOT 卫星数据的产品

数据产品	描述
1 级产品	雷达干涉仪、高度计、辐射计和其他辅助数据
2 级海洋产品	海表面高度、坡度、高度不确定性和后向散射
2 级水文产品	陆地水高度、坡度及不确定性, 水体分类
2 级加强水文产品	全球河水流量估算, 河漫滩高度图(年更新)

2.2 国内成像高度计发展现状

我国科学家早在“七五”期间就提出了海陆兼容成像高度计的设想。以姜景山院士为首的专家们提出了一种新型的海陆兼容并且能够实现三维成像的雷达高度计系统 (CIALT, China Imaging Altimeter)。CIALT 成功地结合了传统雷达高度计技术、孔径综合处理技术和干涉处理技术^[14]。

表 2 CIALT 的工作参数

项目	参数
频率	Ku 波段(13.58 GHz)
极化方式	VV
带宽	20 MHz, 40 MHz
峰值功率	<500 W
天线尺寸	2.1 m×0.3 m
基线	3 m
输入信号强度	-65~95 dB
接收机噪声指数	4.5 dB
I/Q 的振幅不稳定性	1.0 dB
I/Q 的相位不稳定性	<3°
相位稳定度	0.05°
脉冲宽度	10~30 μs
脉冲重复频率	2 000 Hz, 7 000 Hz
数据速率	40 Mbps
幅宽	80 km
分辨率	海洋: 100 m(2D), 10 km(3D) 陆地: 100 m(2D), 300 m(3D)
高度精度	海洋: 5~10 cm, 陆地: 5 m

CIALT 在应用于海洋时采用轻微偏离天顶点的观测方式,在增加刈幅宽度的同时可以获得距离向的高分辨率,通过传统高度计 BROWN 模型的修正,在海面平均高度、有效波高测量方面可以获得与传统高度计相当的精度。而在海冰或陆地模式下,它偏离天顶点较大,从而获得更宽的刈幅。在这两种模式下,它都通过采用双天线接收干涉处理技术,获得地面分辨单元的高程信息;而且每一个接收机采用合成孔径成像技术,以实现高地面空间分辨率。

2002 年 4 月,中国科学院国家空间科学中心对成像雷达高度计机载样机进行了首次飞行试验。试验区域内既有机场、公路、铁路、桥梁等人工目标,又有河流、农田和小丘陵等典型自然目标。试验得到了上述目标的雷达图像、干涉相位图及相干系数图像^[15]。2012 年,其又开展了陆地水体的成像高度计干涉实验,首次获得了反映湖面水体高度变化的干涉测量结果,实验表明:若在飞行姿态非常稳定的情况下,可以得到非常好的干涉相位图^[16]。

2.3 成像高度计发展“十三五”设想

成像高度计技术已列入发展计划,在卫星发射前建议开展的重点工作:

(1) 在现有 CIALT 的基础上,进一步开展校飞实验,改进系统设计方案。

(2) 基于校飞及仿真数据,开展成像高度计信息提取算法及校正算法研究。

(3) CIALT 采用的入射角小于 5° , 频段为 Ku 波段,因此原有 SAR 的海洋探测机理和相应的反演算法在 CIALT 中受到一定的限制,需发展针对 CIALT 的海洋探测理论、数据处理方法和海洋参数反演方法研究。

3 盐度计

星载盐度计 SMOS 和 Aquarius 的成功发射,使人类第一次拥有了从太空进行海洋盐度监测的能力^[17-18]。由于刈幅较宽 (SMOS 为 $1\,050\text{ km}\times 640\text{ km}$, Aquarius 为 390 km), 两颗卫星可在 2~7 d 内覆盖全球南北纬 80° 以内的海域,完成对全球海洋盐度的观测。据 NASA 估计,在 Aquarius 在轨运行的前几个月所获得的观测数据,将超过历史上所有盐度数据的总和。

3.1 国外盐度计发展现状

3.1.1 SMOS 卫星 SMOS 卫星是欧洲空间局地球探索者系列的第二颗卫星,于 2009 年 11 月发射升

空试运行并传回首批观测数据,2010 年 5 月进入了正式运行阶段。SMOS 卫星采用太阳同步轨道,轨道高度为 757 km ,轨道倾角为 98.44° ,重访周期为 2~3 d。SMOS 卫星的载荷为综合孔径微波成像辐射计 (Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis, MIRAS)^[19]。MIRAS 是首个极轨运行的星载二维干涉辐射计,考虑到对盐度变化的敏感性, MIRAS 工作频段选择为 1.413 GHz 波段。 1.413 GHz 波段对海面盐度的灵敏度可达 $0.2\sim 0.8\text{ K/psu}$;同时该频段比常规微波辐射计工作波段更低,大气透射率高,受气候影响更小,保证了对海表盐度的有效观测。

表 3 SMOS 卫星主要技术指标

项目	技术指标
入射角	$0^\circ\sim 55^\circ$ (视场中心为 32°)
工作频率	1.413 GHz (中心频率)
极化方式	双极化和全极化模式
灵敏度	$0.8\sim 2.2\text{ K}$
定标方式	噪声注入和冷空定标
地面分辨率	$40\sim 90\text{ km}$
单次盐度测量精度	1 psu
产品精度	200 km , 30 d 平均后 0.1 psu
工作寿命	3 a

3.1.2 Aquarius 卫星 Aquarius/SAC-D 卫星 (宝瓶座)是 2011 年 6 月发射的星载 L 波段主被动联合微波遥感卫星。由 NASA、阿根廷太空署 (CONAE) 合作开发研制,巴西、加拿大、法国、意大利等多国航天部门也参与其中。Aquarius 的轨道为太阳同步轨道,轨道高度为 757 km ,轨道倾角为 98° ,重访周期为 7 d。

宝瓶座是一个工作在 L 波段 (辐射计为 1.413 GHz , 散射计为 1.26 GHz) 的主被动组合仪器^[20]。主被动传感器同时对海面同一区域进行观测,辐射计测量海面辐射亮温,散射计用以修正表面粗糙度,两种遥感数据联合进行反演,获得高精度的盐度数据。辐射计和散射计在时间上交替观测,并共用同一个直径 2.5 m 的天线。

表 4 Aquarius 卫星主要技术指标

项目	技术指标
轨道	太阳同步轨道
重访周期	7 d
空间分辨率	$\sim 100\text{ km}$
工作频率	1.413 GHz (辐射计), 1.26 GHz (散射计)
极化方式	全极化
刈幅	390 km
产品精度指标	0.2 psu (150 km , 10~30 d 平均)

3.1.3 SMAP 卫星 NASA 的 SMAP (Soil Moisture Active/Passive) 极化则继续使用真实孔径天线,但增大了天线孔径(由 2.5 m 增大到 6 m),并采用了更方便折叠的网状天线,从而将空间分辨率提高到 40 km (原来近 100 km)^[21]。扫描方式由三馈源推帚扫描改为单馈源圆锥扫描,刈幅增大到 1 000 km (原来 390 km)。载荷方面与 Aquarius 类似,也同样搭载了 L 波段辐射计和散射计进行同步观测。虽然 SMAP 计划的主要任务为土壤湿度测量,但其载荷与 Aquarius 相似,具有在海洋盐度遥感方面应用的潜力。

3.1.4 目前盐度卫星存在的问题 影响卫星盐度反演精度的因素主要包括:亮温系统偏差、地面无无线电射频干扰、风致粗糙海面辐射模型等。

有研究者采用 2010 年 8 月的 SMOS 亮温数据,研究了 SMOS 实测亮温与模拟亮温的偏差,标准差可达 2 K^[22]。因此,利用 SMOS 亮温反演盐度之前首先需进行 OTT(Ocean Target Transformation)修正。

盐度计工作的 L 波段除了对海面盐度变化敏感之外对海面风速也比较敏感。海面风场改变了海面粗糙度,在长周期重力波的海面上覆盖着小尺度的毛细波,使得海面发射率增大,进而增大了盐度遥感卫星观测的 L 波段辐射亮温。当风速大于某一阈值时(7 m/s),由于海面波浪破碎导致的白冠和泡沫会进一步增大海面辐射亮温。L 波段亮温对风速的敏感性为 0.3~0.4 K/ms⁻¹,在海面风速为 10 m/s 时, L 波段亮温中的风速信号可达 3~4 K,与盐度信号相当。SOMS 辐射计 L2 数据产品处理过程中采用了三种海面发射率模型(双尺度模型、小斜率方法/微扰法、经验模型)对风致亮温效应进行修正,但是在高风速条件下盐度反演精度仍然相对较低^[23]。同时 SMOS 卫星缺少观测海面风速的载荷,目前的盐度反演算法中采用 ECMWF 再分析数据提供的风速,通过时空坐标插值获得风速数据。由于缺少同步观测数据,也会带来一定误差。

在盐度计工作的 L 波段,地面存在大量的非法无线电射频发射源,SMOS 和 Aquarius 在近岸海域的亮温数据受到严重的 RFI 干扰的影响。有研究表明,东亚、欧洲和北非地区是 RFI 主要发生区域,导致盐度反演精度下降甚至无法正常反演盐度^[24]。

3.1.5 未来盐度遥感卫星 SMOSops-H 为了提高 L 波段综合孔径微波辐射计地面分辨率、测量灵敏度以及 RFI 抑制能力、优化天线设计,欧洲空间局研究了 Y 型、双 Y 型、星型、三角形和六边形

等形状的天线,发现六边形天线设计可以在保持 SMOS 50 km 空间分辨率的基础上,提高辐射分辨率(由 0.29 K 提高到 0.07 K,视场中心)、减小天线展开尺寸(由 8 m 减小到 6.5 m)^[25]。SMOSops-H 主要指标如表 5 所示。

表 5 SMOSops-H 任务主要技术指标

项目	技术指标
任务周期	5 a
覆盖范围	80° S~80° N
刈幅	946 km
入射角	0°~55°
地面分辨率	33 km
辐射灵敏度	0.84 K
带宽	19 MHz(1 404~1 423 MHz)
极化方式	全极化

3.2 国内盐度计的发展现状

国内有中科院国家空间科学中心、华中科技大学、中科院海洋研究所和国家海洋局第一海洋研究所等单位在星载/机载盐度计仪器研制、盐度反演机理方面以及信息提取方法开展了相关工作。

中科院国家空间科学中心在“十一五”期间研制了一台机载 L/C 双频段微波辐射计,并开展了地基盐度池试验及机载试验;“十二五”期间开展了“主被动联合探测盐度计”的研制工作。

华中科技大学开展了综合孔径辐射计遥感海表盐度全链路仿真研究工作,对两种天线阵型(T 型和 Y 型)的亮温数据以及反演的盐度场进行了数值仿真,发现采用 T 型天线的盐度反演 RMS 误差为 0.92 psu, Y 型天线盐度反演 RMS 误差为 0.78 psu。

中科院海洋研究所利用变换场理论方法研究了复杂随机复合介质微波电磁散射特性进行了研究,重点研究了高海况条件下白冠覆盖率、气泡粒径分布等因素对 L 波段海表辐射率和海表盐度反演精度的影响。

国家海洋局第一海洋研究所利用国外在轨盐度计 Aquarius 数据,建立了粗糙海面辐射特性的地球物理函数模型,进而提取了平静海面亮温信号,反演了海面盐度,与 Argo 现场数据比较,盐度反演标准差优于 0.7 psu,同时利用手持式 L 波段微波辐射计,开展了盐池实验和渤海湾海域 L 波段亮温现场观测试验,积累了大量实验数据。

3.3 盐度计发展“十三五”设想

目前限制盐度计发展的因素主要有两个,即空间

分辨率和盐度反演精度的问题,建议开展的重点工作:

(1) 由于盐度敏感频段的限制,盐度计工作频段较低,为L波段,导致采用真实孔径天线的星载盐度计(如NASA的Aquarius卫星)空间分辨率为100 km左右,限制了其在近岸地区的应用。目前发展的趋势是采用稀疏天线阵列的合成孔径技术,在不增大天线物理尺寸的前提下提高空间分辨率。

(2) L波段亮温对盐度的敏感性受到SST等因素的影响,平均只有0.5 K/psu,而全球99%的海域盐度在33~37 psu之间,因此L波段亮温中的盐度信号只有2~3 K,属于典型的弱信号探测。同时亮温数据还受到海温、海面风场、波高甚至降雨的综合影响。因此目前在轨盐度计SMOS和Aquarius盐度反演精度均未达到其设计指标。未来可利用盐度卫星搭载的多波段、主被动传感器,实现多信息源联合盐度反演方法,以改善盐度反演精度。

(3) 针对不同海洋环境动力过程,开展盐度卫星数据精度指标论证工作,为我国未来自主盐度卫星数据处理与应用做好预研工作。

4 总结

基于空间的海浪方向谱观测目前主要依赖于

SAR,但由于SAR图像谱扭曲,在方位向产生截断效应,从而限制了SAR海浪谱探测范围。海浪波谱仪通过小入射角下的方位向360°扫描方式探测海浪谱,克服了SAR探测缺陷。传统雷达高度计主要用于提取沿轨海面高度,无法提供三维海面高度的小尺度信息,成像高度计在传统高度计基础上,引入干涉技术从而实现了三维海面高度场的观测。海表盐度是海洋动力过程以及气候变化研究中的重要参数,目前国外已发射针对全球海表盐度观测的卫星,而国内相关研究刚刚起步,从而有必要针对国产海洋盐度卫星开展相关技术研究。

针对三种新型微波遥感器,需开展的重点工作有:对于已发射升空的盐度计,重点开展信息提取算法改进、射频干扰校正算法及系统改进优化设计研究。对于列入计划的海浪波谱仪与成像高度计,重点开展机载校飞试验,以及基于校飞和仿真数据的信息提取算法研究。

致谢:感谢中科院国家空间科学中心张云华研究员在成像高度计部分编写过程中给予的帮助;感谢殷晓斌研究员、刘浩研究员在盐度计部分编制中给予的帮助;另外,王进、范陈清、张晰也参与了材料编写,在此一并致谢。

参考文献:

- [1] 马丁. 海洋遥感导论[M]. 蒋兴伟,译. 北京:海洋出版社,2008.
- [2] Jackson F C. An Analysis of Short Pulse and Dual Frequency Radar Techniques for Measuring Ocean Wave Spectra from Satellites[J]. Radio Science, 1981, 16(6):1385-1400.
- [3] F C Jackson, W T Walton, P L Baker. Aircraft and Satellite Measurement of Ocean Wave Directional Spectra Using Scanning-Beam Microwave Radars[J]. J Geophys Res, 1985, 90: 987-1004.
- [4] F C Jackson, W T Walton, C Y Peng. A Comparison of In Situ and Airborne Radar Observations of Ocean Wave Directionality [J]. J Geophys Res, 1985, 90:1005-1018.
- [5] Hauser D, Caudal G, Rijckenberg G, et al. RESSAC: A new airborne FM/CW Radar Ocean Wave Spectrometer [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30(5): 981-995.
- [6] Alexis A Mouche, Danièle Hauser, et al. Dual-Polarization Measurements at C-Band Over the Ocean: Results from Airborne Radar Observations and Comparison with ENVISAT ASAR Data[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 2005, 43(4): 753-769.
- [7] DANIELE HAUSER, ELBATOUL SOUSSI, et al. SWIMSAT: A Real-Aperture Radar to Measure Directional Spectra of Ocean Waves from Space—Main Characteristics and Performance Simulation[J]. J Atmos Oceanic Technol, 2001, 18: 421-437.
- [8] C Tison, C Hauser, G Carayon, et al. A Spaceborne Radar for Directional Wave Spectrum Estimation: First Performance Simulations [C]// IGARSS08, 2008: I-347-I-350.
- [9] C Tison, T Amiot, J Bourbier, et al. Directional Wave Spectrum Estimation by SWIM Instrument on CFOSAT [C]// IGARSS09, Cape Town, South Africa, 2009: V-312-V-315.

- [10] C Tison, T Amiot, V Enjolras, et al. Performance Status of the Wave Scatterometer SWIM[C]// IGARSS10,2010: 4170- 4173.
- [11] 张荣, 杨劲松, 黄韦良,等. 三维成像雷达高度计的工作机理及其可能的海洋学应用[J]. 海洋学研究, 2009, 27(3):99- 102. DOI: 10.3969/j.issn.1001- 909X.2009.03.014.
- [12] Fjortoft R, Gaudin J - , Pourthie N, et al. KaRIn on SWOT: Characteristics of Near- Nadir Ka- Band Interferometric SAR Imagery[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2014, 52(4):2172- 2185.
- [13] Durand M, Fu L, Lettenmaier D P, et al. The Surface Water and Ocean Topography Mission: Observing Terrestrial Surface Water and Oceanic Submesoscale Eddies[J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 98(5):766 - 779.
- [14] 张鸿远, 张祥坤, 许可,等. 三维成像雷达高度计成像模拟研究[J]. 遥感技术与应用, 2001, 16(3):184- 189. DOI:10.3969/j.issn. 1004- 0323.2001.03.010.
- [15] 张云华, 姜景山, 张祥坤, 等. 三维成像雷达高度计机载原理样机及机载试验 [J]. 电子学报, 2004, 32 (6):899- 902. DOI: 10.3321/j.issn:0372- 2112.2004.06.005.
- [16] 张云华. 宽刈幅海洋雷达高度计[J]. 高科技与产业化, 2013 (11): 9- 16.
- [17] Mecklenburg S, Drusch M, Kerr Y H, et al., ESA's Soil Moisture and Ocean Salinity Mission: Mission Performance and Operations[J]. IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, 2012, 50(5):1354- 1366.
- [18] D Vine, G Lagerloef, S Torrusio. Aquarius and Remote Sensing of Sea Surface Salinity from Space [J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 98(5): 688- 703.
- [19] H Barré, B Duesmann, Y Kerr. SMOS: The Mission and the System[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2008, 46(3): 587- 593.
- [20] D Vine, G Lagerloef, F Colomb, et al. Aquarius: An Instrument to Monitor Sea Surface Salinity from Space [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2007,45(7): 2040- 2050.
- [21] Molly E Brown, Vanessa Escobar, Susan Moran, et al. NASA's Soil Moisture Active Passive (SMAP) Mission and Opportunities for Applications Users[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2013,94(8): 1125- 1128.
- [22] Yin X, Boutin J, Spurgeon P. First Assessment of SMOS Data Over Open Ocean: Part I—Pacific Ocean[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2012, 50(5): 1648- 1661.
- [23] N Reul, J Tenerelli, J Boutin. Overview of the First SMOS Sea Surface Salinity Products. Part I: Quality Assessment for the Second Half of 2010[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2012, 50(5): 1636- 1647.
- [24] Roger O, Elena D E, Yann H K, et al. SMOS Radio Frequency Interference Scenario: Status and Actions Taken to Improve the RFI Environment in the 1400- 1427- MHz Passive Band[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2012, 50(5):1427- 1439.
- [25] Alberto M Zurita, Ignasi Corbella. Manuel Martín- Neira, Towards a SMOS Operational Mission: SMOSOps- Hexagonal [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2013, 6(3):1769- 1780.

Research Progress of Novel Marine Microwave Remote Sensor Technologies

ZHANG Jie¹, LIU He-guang², LIN Ming-sen³, ZHANG Zhen-hua⁴, CHEN Ping⁵

1. *First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, Shandong Province, China;*

2. *National Space Science Center, CAS, Beijing 100000, China;*

3. *National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China;*

4. *Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100000, China;*

5. *Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei Province, China*

Abstract: The microwave remote sensors are an important means for marine applications such as the measurement of global oceanic dynamic environment parameters and supervision of targets on the sea. To overcome the shortcomings of currently-used microwave remote sensors in ocean observation, it is inevitable to develop novel marine microwave remote sensors. This paper mainly introduces 3 kinds of novel microwave remote sensors, including wave spectrometer, imaging altimeter and L-band radiometer. On the basis of summarizing the research progress both domestic and overseas, this paper proposes the research priorities in the near future.

Key words: novel microwave remote sensors; wave spectrometer; imaging altimeter; L-band radiometer