

新型海洋微波辐射计遥感原理与发展

马小峰^{1,2}, 林明森², 周武², 张有广²

(1.中国海洋大学 信息科学与工程学院, 山东 青岛 266100; 2.国家卫星海洋应用中心, 北京 100081)

摘要:全极化综合孔径辐射计 (full polarization interferometric radiometer) 结合了干涉式综合孔径成像技术与全极化信息获取技术, 是一种高分辨率、低功耗且可观测多种海洋物理信息的新型微波辐射计。文章分别介绍了全极化和综合孔径微波辐射计的发展历程, 阐明了全极化模式和综合孔径技术应用于海洋信息获取的必要性与原理。以目前在轨运行的 WindSat 和 MIRAS 的优点与不足为例, 论述了多功能微波辐射计和多载荷微波遥感卫星平台在海洋观测方面的优势, 从需求与应用的角度指出多微波遥感器协同开展海洋观测的必要性与难点, 为我国自主研制的海洋盐度观测卫星立项工作提供依据。

关键词:微波辐射计; 全极化; 综合孔径; 海面风场; 海洋盐度; 协同观测

中图分类号: **文献标识码:**A **文章编号:**1007-6336(\$article_year)00-0001-08

Principle and development of new microwave radiometer to observe ocean

MA Xiao-feng^{1,2}, LIN Ming-sen², ZHOU Wu², ZHANG You-guang²

(1.College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2.National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China)

Abstract: Full polarization interferometric radiometer, which can image from interferometric synthetic aperture and get full polarization information, is the new type of microwave radiometer that can measure various physical information of ocean with high resolution and low consumption. By introducing the development of full polarization and synthetic aperture respectively, we expound on the necessity and principle of full polarization and synthetic aperture to acquire ocean information. Taking the advantages and disadvantages of WindSat and MIRAS as an example, we have discussed the advantages of multi-functional microwave radiometer and multi-load microwave sensors satellite to observe ocean. Moreover, to develop our satellite observation of ocean salinity, the necessity and the difficulty of collaborations of full polarization interferometric radiometer are pointed out for the application of multiple microwave remote sensing.

Key words: microwave radiometer; full polarization; synthetic aperture; ocean surface wind field; ocean salinity; collaborative observation

微波辐射计是一种被动遥感器, 可以用于海洋表面温度、盐度、风速、大气垂直温度与湿度剖面和大气水含量的观测, 相对于主动微波遥感器具有体积小、重量轻、耗能低等优点。但是, 传统微波辐射计是单极化或双极化工作模式, 虽然能观测海面风速, 但受大气液态水和水汽影响, 其包含的风向信号较弱, 并不适用于观测海

面风场^[1], 同时, 传统微波辐射计的空间分辨率完全取决于接收天线的物理口径, 从而导致航天应用技术难度大, 且大口径天线也很难实现机械扫描成像^[2]。

由此可见, 扩展极化模式和研制新型天线是推动海洋微波辐射遥感取得突破性进步的关键所在, 而全极化微波辐射测量与综合孔径观测技

收稿日期: 2019-01-25, 修订日期: 2019-04-09

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2016YFC1401006) “海洋环境安全保障专项—盐度计海洋信息提取技术”

作者简介: 马小峰 (1978-), 男, 北京人, 副研究员, 主要研究方向为微波辐射遥感, E-mail: mxffly@mail.nsoas.org.cn

术就是在这种需求中逐渐发展成熟的。

1 全极化微波辐射计的遥感原理与发展

1.1 全极化微波辐射计遥感原理

全极化微波辐射计遥感的工作原理是在传统的正交极化观测基础上,获取观测目标的第3和第4 Stokes 参量。Stokes 参量是用于描述电磁波振幅和极化状态且具有功率密度量纲的值,所以,可以把 Stokes 参量归一化为相应的亮温。其中,第1极化参量(T_v)用于描述垂直极化亮温,第2极化参量(T_h)用于描述水平极化亮温,第3极化参量(T_3)和第4极化参量(T_4)分别用于描述线性极化部分和圆极化部分。 T_3 为垂直和水平极化复相关量的实部, T_4 为复相关量的虚部^[3]。亮温的 Stokes 参量 T_B 如式(1)所示:

$$T_B = \begin{bmatrix} T_v \\ T_h \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix} = \frac{\lambda^2}{\kappa\gamma} \begin{bmatrix} \langle |E_v|^2 \rangle \\ \langle |E_h|^2 \rangle \\ 2\text{Re}\langle E_v E_h^* \rangle \\ 2\text{Im}\langle E_v E_h^* \rangle \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: λ 为电磁波的波长; κ 为玻尔兹曼常数, γ 为波阻抗; E_v 和 E_h 分别为电场强度的垂直和水平分量; $\langle \cdot \rangle$ 表示无限时间平均;Re表示取实部,Im表示取虚部。

全极化微波辐射计可分为组合型和直接相关型两类,由于温度分辨率是物理海洋观测的重要指标,所以,海洋微波辐射计采用灵敏度较高的直接相关型全极化辐射计^[4]。此种类型的全极化微波辐射计有两个相同的接收机,分别接收天线获取的垂直极化和水平极化亮温信号并进入复相关器,由此输出复相关量的实部和虚部分别就是 T_3 和 T_4 两个 Stokes 参量。

由于受大气中的水汽和液态水含量影响较小,全极化微波辐射计的 T_3 和 T_4 可以测量海面风向,且具有低功耗和高风速条件下观测精度高等重要优势^[5]。同时, T_3 还能观测海面降雨的情况, T_4 则是探测大气平流层和中间层的有效手段,而且 T_4 的辐射观测具有不受法拉第旋转效应影响的优点,更适合海面风场的全天候观测^[6-8]。

1.2 全极化微波辐射计的发展

为了给星载全极化辐射计的应用提供验证,美国喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory)

开展了机载全极化微波辐射计研究,并于1993年推出机载微波辐射计 WindRad,其19.35 GHz 频段能观测 T_3 和 T_4 参量,是第一台真正意义上的全极化微波辐射计^[9]。

随后,欧洲的丹麦科技大学和赫尔辛基理工大学分别研制了16 GHz与34 GHz波段的机载全极化成像辐射计 EMIRad 和36.5 GHz波段的机载全极化辐射计 FPR,验证了全极化微波辐射计测量海面风向的可行性^[6,10]。

机载全极化微波辐射计获得成功,2003年1月,美国发射了世界上第一颗星载全极化微波辐射计(WindSat),有3个频率(10.7 GHz、18.7 GHz、37 GHz)能在全球范围内测量海面辐射亮温的所有4个 Stokes 参量,开创了使用星载全极化辐射计进行海面风场观测的先河。WindSat 的首要任务是测量海面风场,但作为第一个全极化微波辐射计,WindSat 获得全极化信息的能力也可以用来对海洋、陆地、海冰和大气等许多领域的物理参数进行测量^[11]。

2009年11月,欧空局发射了用于海洋盐度与土壤湿度观测的遥感卫星 SMOS,其搭载的唯一有效载荷 MIRAS(microwave imaging radiometer with aperture synthesis)是一台二维 L 波段(1.4 GHz)干涉式全极化综合孔径微波辐射计,且具备双极化与全极化两种工作模式。在双极化模式下,由于 MIRAS 可以同时独立获得多个入射角($0^\circ \sim 55^\circ$)的 T_v 和 T_h 亮温的观测数据^[12],从而增加了反演算法矩阵的维数,提升了海洋盐度的反演精度;在全极化工作模式下,MIRAS 可以获取全部的4个 Stokes 参量,由于自然条件的 T_3 和 T_4 辐射值较低,而人造 L 波段辐射源则会导致其绝对值异常增大,所以,MIRAS 也可以用于评估法拉第旋转效应和检测地球表面 RFI(radio frequency interference)源的分布^[13]。

1.3 星载全极化微波辐射计海面风场遥感

海面风场矢量遥感是全极化微波辐射计的重要应用,其原理是基于海面辐射亮温与海面风场的相关性,从而通过对海面辐射亮温的测量来反演海面风场。海面风速的反演主要利用海面辐射亮温与风生海面粗糙度之间的关系,由于风速的变化引起海面粗糙度发生变化,进而导致海

面辐射亮温的变化;海面风向的反演主要利用风生海面辐射亮温的分布同海面风向之间的对应关系,具体表现为辐射亮温随海面风向与亮温观测方向夹角(相对风向角)的周期性变化。

海面辐射亮温的大小与分布随风场发生的变化在 4 个 Stokes 参量上都有体现,但是,星载辐射计观测到的 T_v 和 T_h 受大气影响较大,其有效信息都被淹没在水汽和液态水的辐射信号中,并不适用于风场的观测^[1]。而 T_3 和 T_4 受空间环境干扰较小,在恶劣天气条件下仍然能测量海面风向^[7,10]。在实验中,通过分析 WindSat 的 10.7 GHz 通道观测数据反演结果可以发现,在海面风速相

同的情况下, T_3 的海面辐射亮温随海面风向角变化的幅度约为 T_4 的 1.5~2 倍,特别是在风速较低的情况下, T_3 相对于 T_4 的这种幅度差异更显著。如图 1 可以看出, T_3 对海面辐射亮温各项异性的变化更为敏感,更适合于海面风向的反演。但是,即使在海面风速较高的情况下(大于 20 m/s), T_3 和 T_4 的亮温变化范围也非常小,比 T_v 和 T_h 的亮温变化低两个数量级,所以,为了有效测量海面风向,就需要全极化微波辐射计具有很高的灵敏度和稳定性,并且保证各极化通道的辐射测量精度和定标精度^[11]。

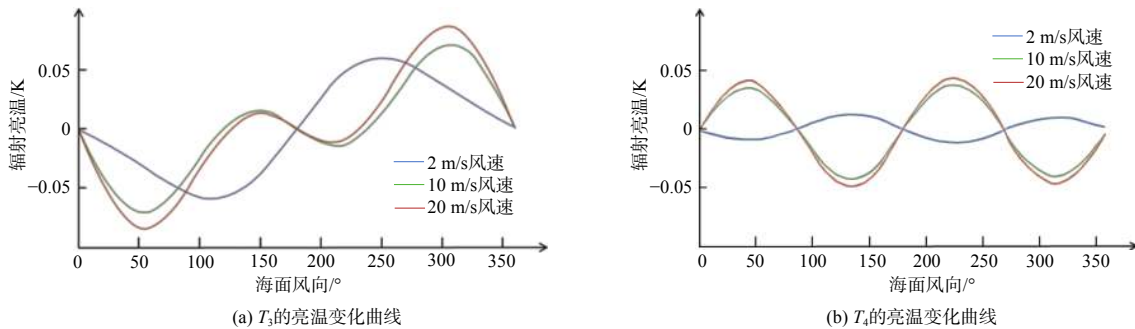


图 1 10.7 GHz 通道的 T_3 与 T_4 参量随海面风向变化曲线

Fig. 1 The variety of T_3 or T_4 with ocean surface wind direction at 10.7 GHz

根据实验结果, WindSat 观测数据在海面风速较高时的反演结果明显优于低风速条件下的情况,风向反演的准确度随着风速的减小而降低^[14]。而对于中低海面风速,微波散射计对风速具有较高的灵敏度,但在高风速时的观测值趋于饱和^[15]。所以,微波散射计和全极化微波辐射计在测量海面风场时具有非常好的互补性,如果搭载于同一卫星平台,可有效提升海面风场的准确性并扩大测量范围,同时,微波辐射计观测的大气参数也可为散射计的大气校正提供辅助数据,从而形成全天候海面风场定量观测组合。

2 综合孔径微波辐射计的遥感原理与发展

2.1 综合孔径微波辐射计遥感原理

传统微波辐射计的空间分辨率可表示为 $W = K \frac{\lambda}{D} H$, 式中: K 为比例常数; λ 为天线探测的中心波长; D 为天线的口面尺寸; H 为天线距离

地面的高度。由于航天器的飞行高度较为固定,且搭载的天线口径也受到制约,所以,传统微波辐射计在低频段的空间分辨率较低。同时,辐射计的空间分辨率还受到积分时间的约束,较长的积分时间将降低辐射计的空间分辨率^[16]。但是,辐射计的温度分辨率同积分时间成正比,缩短积分时间会降低辐射计的灵敏度,这导致了同空间分辨率之间的矛盾^[17]。而综合孔径微波辐射计回避了传统微波辐射计的上述制约,提高了微波辐射计的空间分辨率,使低频辐射计的海洋观测具有应用意义。

综合孔径技术是用天线阵列对空间频域的测量来代替传统真实孔径天线对空间辐射的直接测量,通过天线阵列各观测单元之间的两两相关实现对视场内亮温的空间频域进行干涉测量,并将测量的结果进行相干叠加,从而形成等效的虚拟大孔径天线^[18],再通过对空间频域观测数据作数学变换得到观测区域的亮温图像。

综合孔径辐射计同传统微波辐射计的观测原理有本质区别。从观测天线来说,综合孔径辐射计是利用距离(基线长度)不同的“天线对”进行复相关运算测量(二元干涉测量)场景辐射的空间频域分量,这些不同长度和方向的基线在频域内覆盖了从低频到高频的空间,得到的是观测场景内不同点的空间频率值;从反演算法来说,空间频域中的每个点都具有实际的物理意义,可以通过傅里叶逆变换或其他数学方法将对应的辐射亮温图像映射到整个海洋观测场景平面上。在空间频域和亮温图像之间建立联系的表达式被称为可见度函数(visibility function) $V(u, v)$, 如式(2)所示:

$$V(u, v) = \int \int_{\xi^2 + \eta^2 \leq 1} \frac{T_B(\xi, \eta)}{\sqrt{1 - \xi^2 - \eta^2}} \cdot e^{-j2\pi(u\xi + v\eta)} d\xi d\eta \quad (2)$$

对应图2所示,式中: $(u, v) = (x_1 - x_2/\lambda, y_1 - y_2/\lambda)$ 为两天线单元以波长为单位的距离矢量,对应一组“天线对”的基线矢量; $T_B(\xi, \eta)$ 代表观测场景辐射源的亮温, (ξ, η) 是用方向余弦表示的入射角 θ 与方位角 φ , 对应关系为 $(\xi, \eta) = (\sin\theta \cos\varphi, \sin\theta \sin\varphi)$ 。由式(2)也可以看出, $V(u, v)$ 和 $\frac{T_B(\xi, \eta)}{\sqrt{1 - \xi^2 - \eta^2}}$ 是严格的二维傅里叶变换对。

2.2 综合孔径微波辐射计的发展

根据天线阵列的基线组合方式的不同,目前已应用于实际观测的干涉式综合孔径微波辐射计主要分为一维推扫成像和二维即时成像两大类^[19]。在 NASA 率先开展综合孔径微波辐射计的研制工作以后,我国和欧洲也先后开始进行同类型微波辐射计的设计与试验,如表1所示^[20-28]。最早研制成功的一维综合孔径辐射计是20世纪80年代末由 NASA 戈达德空间飞行中心与马萨诸塞州立大学联合研制的 ESTAR (electronically scanned thinned array radiometer), 是世界上第一台干涉式被动成像系统^[29]。ESTAR 工作在 L 波段(1.4 GHz), 试验期间使用飞机作为搭载平台进行了大量针对海水盐度的观测,反演结果同现场测量结果较为一致,证明了综合孔径技术在被动微波遥感领域中应用的可行性。

一维综合孔径微波辐射计的天线是在交轨方向上采用综合孔径技术提高分辨率,观测范围

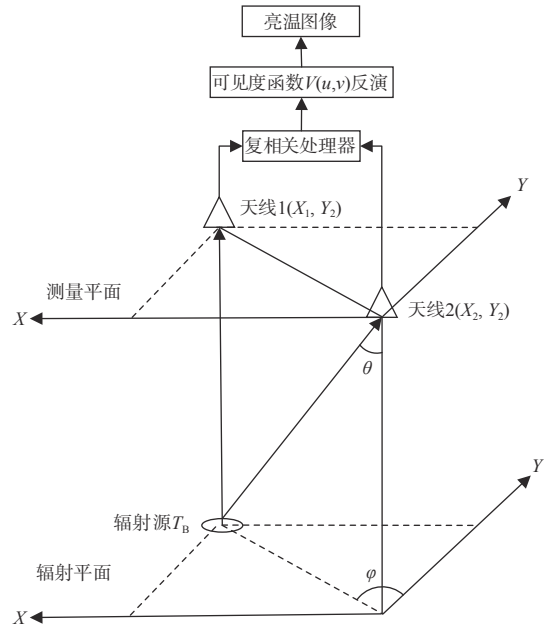


图2 综合孔径微波辐射测量原理示意

Fig. 2 The principle of synthetic aperture microwave radiation measurement

较宽,而在沿轨方向仍采用真实孔径实现高分辨率,导致天线的尺寸和重量仍然较大,且观测范围较窄,需借助飞行器在沿轨方向上的运动进行推扫来实现扫描成像。而二维即时成像系统就可以在整个平面内的两个方向上实现干涉测量的综合孔径观测,也可回避辐射计进行二维观测需要运动扫描的缺点。为此,ESTAR 的研发团队推出了 2D-STAR, 并从 2002 年至 2004 年期间多次使用其进行以测量土壤湿度为目标的飞行试验^[30], 2D-STAR 的工作频段与 ESTAR 相同,天线为方形满阵列,可从中选取 Y 型、T 型、U 型、十型等不同阵型,从而可以分析和比对不同天线阵列方案的优劣,其工作方式也从单极化测量改进为双极化测量^[31]。

2.3 星载综合孔径微波辐射计海洋遥感

频率为 1.4 GHz 的 L 波段是受国际条约保护的观测波段,该波段对海面盐度比较敏感,可以进行除降雨以外的全天候观测,是海洋盐度遥感的首选波段。2002 年, NASA 在 ESTAR 的基础上研制并发射了星载 L 波段一维稀疏天线阵微波辐射计“水星”(HYDROSTAR), 该辐射计采用水平极化方式,实现了对海洋表面盐度和土壤湿度信息的观测^[32]。而对于大尺度海洋盐度遥

表 1 综合孔径微波辐射计系统研制进展情况表

Tab.1 The development of synthetic aperture microwave radiometer system

系统名称	完成时间	研制单位	观测方式	工作频段/GHz	天线形式
C波段综合孔径微波辐射计	2001	中国科学院国家空间科学中心	一维综合孔径	6.6	矩形
STAR-Light	2003	密歇根大学	二维综合孔径	1.4	Y型
X波段综合孔径微波辐射计	2004	中国科学院国家空间科学中心	一维综合孔径	9.4	矩形
GeoSTAR	2004	NASA	二维综合孔径	50-55	Y型
HUST-ASR	2005	华中科技大学	一维综合孔径	37.5	矩形抛物柱面
GAS	2006	ESA	二维综合孔径	53 118 183 380	Y型
HUT-2D	2006	赫尔辛基技术大学	二维综合孔径	1.4	U型
BHU-2D	2006	北京航空航天大学	二维综合孔径	34	T型
FPASMR	2013	中国航天科技集团第五研究院 西安分院, 华中科技大学	二维综合孔径	1.4 10.7 1.4	Y型
MICAP	2015	中国科学院国家空间科学中心	一维综合孔径	6.9 18.7	矩形抛物柱面
				1.26(散射计)	

感来说, 在不同海域和研究方向上, 对观测的分辨率和反演精度则有比较具体的需求^[33], 如表 2 所示。

表 2 海洋盐度观测的精度需求

Tab.2 The accuracy requirement to measure ocean salinity

观测区域或研究目标	分辨率/km	时间范围/d	精度/PSU
太平洋赤道海域热流阻挡层	100×100	30	0.2
海面比热容	200×200	7	0.2
北大西洋热盐环流	100×100	30	0.1
表面淡水流动平衡	300×300	30	0.1

为了满足天基海洋盐度观测的需求, 经过多年的准备, ESA 针对二维综合孔径天线进行了多次地面与机载系统试验, 包括 11 单元的 Y 型天线阵系统 MIRAS breadboard 和 12 单元的 Airborne MIRAS 机载系统^[34], 最终将世界上第一个星载二维综合孔径辐射计 MIRAS 投入使用, 主要任务就是对全球的海洋盐度和土壤湿度进行观测, 其天线采用 Y 型阵列, 星下点空间分辨率约为 32 ~ 100 km^[13]。同时, 它也是目前世界上仅有的一个集二维综合孔径体制和全极化工作模式于一体的星载航天器有效载荷。

根据精度评估试验, MIRAS 在开放海域观测, 当风速范围为 3 ~ 12 m/s、分辨率为 100×100 km

时, 10 d 的平均 SSS 精度为 0.3 ~ 0.5 PSU^[35], 而当风速大于 20 m/s 时, MIRAS 对海面盐度的反演结果误差较大, 这主要是由于高风速条件下, 海面粗糙度和泡沫都对海面亮温观测形成较强的干扰所导致。但是, MIRAS 可在高风速条件下对海面风速进行观测, 从而使天线的观测效率得到了充分的发挥^[36]。如图 3 所示, 分别是 MIRAS 在 2018 年观测到的两个超强台风——“山竹”和“飞燕”, 虽然成像的分辨率相对于微波散射计较低, 但其观测结果也能对海洋风暴的强度和运动路线进行定性分析。同时, MIRAS 也可以测量厚度在 50 cm 以下的新生海冰, 在实际工作中已经被用于对 CryoSat 卫星的补充观测并广受用户的好评。

3 结论与展望

全极化微波辐射计可以利用所有极化方式对不同地物的高敏感度获取多种海面物理信息, 最大限度的发挥了微波的遥感能力, 提高了微波遥感卫星的观测效率; 干涉式综合孔径微波辐射计可以进行传统微波遥感无法实现的高空间分辨率地物辐射亮温观测, 从而将低频段微波纳入到遥感领域, 拓宽了微波遥感的观测窗口。而将

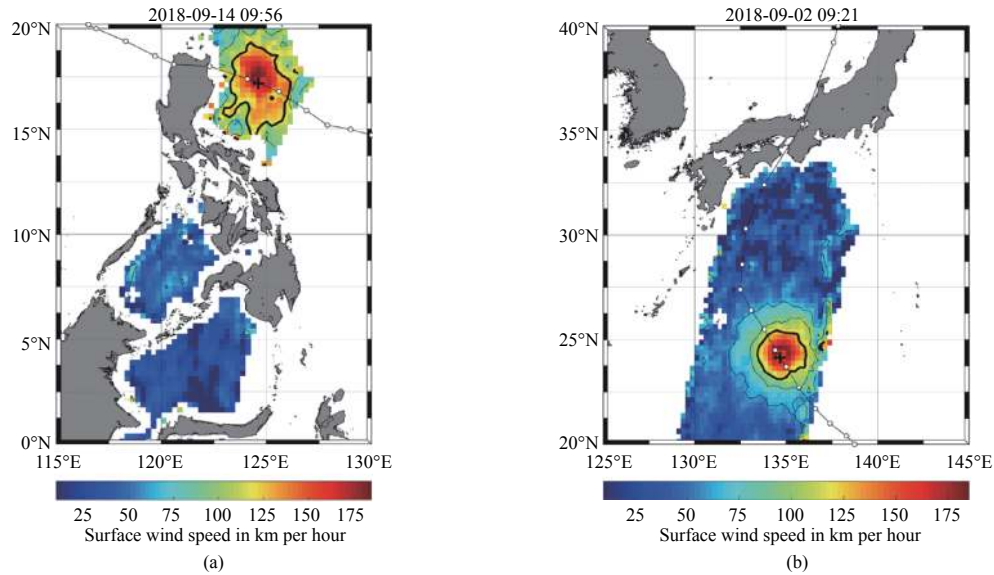


图 3 MIRAS 观测到的台风 (a)“山竹”和 (b)“飞燕”

Fig. 3 Typhoon Mangkhut and Jebi measured by MIRAS

二者有机结合,把全极化模式和综合孔径技术用于同一微波辐射计天线,形成高分辨率、多功能的全极化综合孔径辐射计(FPIR),则可以进一步提高微波遥感卫星的工作效率。

在理论上,如果全极化综合孔径辐射计卫星同时搭载微波散射计,且两种遥感器都可以实现多频段观测,那就可以对海面风场和海洋盐度进行同步观测,不仅可以提高卫星平台的使用效率,节约成本,而且可以将海洋盐度观测的分辨率和反演精度同时得到最大限度的提升。但是,这种组合方案将导致卫星系统非常复杂,加大工程实现的难度,有待工程技术的发展和进一步论证分析。

在实际应用中,微波遥感器不但已经实现全极化模式与综合孔径技术的集成,而且可以进行多波段主被动组合观测,大大提高遥感卫星的使用效率。例如,中国科学院国家空间科学中心提出的主被动联合微波成像仪 MICAP (microwave imager combined active and passive) 采用多波段共用抛物柱形反射面天线方案,其中, L 波段一维综合孔径辐射计观测海洋盐度, C、K 波段一维综合孔径辐射计探测海水温度, L 波段散射计获取海面粗糙度。

MICAP 这种观测机制既保证了空间分辨率与幅宽,又实现了辅助数据同步观测,从反演算

法的输入端提高了海洋盐度的反演精度。而 L 频段的 FPIR 观测机制不但充分提高了空间分辨率,而且可以进行多人射角观测,从反演算法的结构上提高了反演精度。如果将这两种观测机制的有效载荷放置于同一卫星平台进行协同观测,并利用两种观测数据进行海洋盐度联合反演,就可以进一步提升反演精度。

对于观测频段和极化模式都具有多样性的微波遥感器来说,由于它们的工作原理和工作方式也存在本质差异,所以,即使观测目标相同的不同微波遥感器集成在同一卫星平台上,也绝不是观测能力的简单重复或相互比较,而是耦合形成了更具应用意义的新型海洋联合微波遥感器。但是,多种微波遥感功能的集成势必要对天线和卫星平台系统提出较高的要求,同时,观测原理的复杂性和观测方式的多样性也都增加了数据反演算法的复杂程度,这都将延长卫星载荷硬件设备和地面数据处理软件系统的研制周期以及航天器在轨运行测试的时间。

参考文献:

- [1] WENTZ F J. Measurement of oceanic wind vector using satellite microwave radiometers[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(5): 960-972.
- [2] RUF C S, SWIFT C T, TANNER A B, et al. Interferometric synthetic aperture microwave radiometry for the remote

- sensing of the earth[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1988, 26(5): 597-611.
- [3] 李青侠, 陈柯, 郎量, 等. 高分辨率被动微波遥感--综合孔径微波辐射成像[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [4] 王新彪, 李靖, 姜景山. 相关型全极化辐射计研究[J]. *遥感技术与应用*, 2008, 23(5): 582-586.
- [5] 陆浩, 王振占. 全极化辐射计的2 GHz带宽数字相关系统设计[J]. *电路与系统学报*, 2012, 17(4): 128-132.
- [6] LAURSEN B, SKOU N. Wind direction over the ocean determined by an airborne, imaging, polarimetric radiometer system[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(7): 1547-1555.
- [7] MEISSNER T, WENTZ F J. An updated analysis of the ocean surface wind direction signal in passive microwave brightness temperature[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(6): 1230-1240.
- [8] 邢妍, 陈文新. 全极化微波辐射计天线极化纯度的研究[J]. *电子科技*, 2017, 30(1): 29-33.
- [9] 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.
- [10] LAHTINEN J, PIHLFLYCKT J, MONONEN I, et al. Fully polarimetric microwave radiometer for remote sensing[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(8): 1869-1878.
- [11] 王蕊, 史顺文, 陆文. 全极化微波辐射计海面风场反演实验[J]. *遥感信息*, 2014, 29(4): 85-90, 97.
- [12] FONT J, LAGERLOEF G S E, LE VINE D M, et al. The determination of surface salinity with the European SMOS space mission[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(10): 2196-2205.
- [13] KRISTENSEN S S, BALLING J E, SKOU N, et al. RFI detection in SMOS data using 3rd and 4th Stokes parameters[C]//12th Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment (MicroRad). Roman, Italy: IEEE, 2012: 1-4.
- [14] 刘璟怡, 王振占, 殷晓斌, 等. 基于全极化微波辐射计 WindSat亮温数据的海面风场反演[J]. *高技术通讯*, 2008, 18(5): 519-524.
- [15] 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: Oceans*, 2007, 112(C9): C09023.
- [16] 苗俊刚, 刘大伟. 微波遥感导论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [17] LE VINE D M, SWIFT C T, HAKEN M. Development of the synthetic aperture microwave radiometer, ESTAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(1): 199-202.
- [18] THOMPSON A R, MORAN J M, SWENSON G W JR. Interferometry and synthesis in radio astronomy[M]. New York: John Wiley & Sons, 1986.
- [19] 吴季, 刘浩, 孙伟英, 等. 综合孔径微波辐射计的技术发展及其应用展望[J]. *遥感技术与应用*, 2005, 20(1): 24-29.
- [20] DONG X L, WU J, ZHU S Y, et al. Design and implementation of CAS C-band interferometric synthetic aperture radiometer[C]// Proceedings of 2000 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Honolulu, Hawaii, USA, 2000, 2: 866-868.
- [21] LIU H, WU J, BAN S Z, et al. The CAS airborne x-band synthetic aperture radiometer: system configuration and experimental results[C]//Proceedings of 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Anchorage, AK, USA: IEEE, 2004, 3: 2230-2233.
- [22] DONG J, LI Q X, GUO W, et al. A sparse antenna array with offset parabolic cylinder reflector at millimeter wave band[C]//2008 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. Nanjing, China: IEEE, 2008, 4: 1667-1670.
- [23] LAMBRIGTSEN B, WILSON W, TANNER A, et al. GeoSTAR-a synthetic aperture approach for a geostationary microwave sounder[C]//2004 IEEE Aerospace Conference Proceedings. Big Sky, MT, USA: IEEE, 2004, 2: 1008-1014.
- [24] CHRISTENSEN J, CARLSTROM A, EKSTROM H, et al. GAS: the geostationary atmospheric sounder[C]//2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Barcelona, Spain: IEEE, 2007: 223-226.
- [25] CARLSTROM A, CHRISTENSEN J, EMRICH A, et al. Image retrieval simulations for the GEO atmospheric sounder (GAS)[C]//Proceedings of 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Boston, MA, USA: IEEE, 2008: 6-11.
- [26] RAUTIAINEN K, BUTORA R, AUER T, et al. Development of airborne aperture synthetic radiometer (HUT-2D)[C]//Proceedings of 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Toulouse, France: IEEE, 2003, 2: 1232-1234.
- [27] 薛永, 苗俊刚, 万国龙. 8mm波段二维综合孔径微波辐射计 (BHU-2D)[J]. *北京航空航天大学学报*, 2008, 34(9): 1020-1023.
- [28] ENGLAND A W, PHAM H, DE ROO R, et al. Performance of STAR-Light receivers during CLPX[C]//Proceedings of 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Toulouse, France: IEEE, 2003, 2: 1235-1237.

- [29] LE VINE D M, GRIFFIS A J, SWIFT C T, et al. ESTAR: a synthetic aperture microwave radiometer for remote sensing applications[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1994, 82(12): 1787-1801.
- [30] RYU D, THOMAS J J, BINDLISH R, et al. Soil moisture retrieval using an L-band synthetic aperture radiometer during the soil moisture experiments 2003(SMEX03) and 2004(SMEX04)[C]//*Proceedings of 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Boston, MA, USA: IEEE, 2008, 2: 233-236.
- [31] RYU D, JACKSON T J, BINDLISH R, et al. Two-dimensional synthetic aperture radiometry over land surface during soil moisture experiment in 2003(SMEX03)[C]//*2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Barcelona, Spain: IEEE, 2007: 1842-1845.
- [32] 唐治华. 国外海洋盐度与土壤湿度探测卫星的发展[J]. *航天器工程*, 2013, 22(3): 83-89.
- [33] CAMPS A, FONT J, VALL-LLOSSERA M, et al. The WISE 2000 and 2001 field experiments in support of the SMOS mission: Sea surface L-band brightness temperature observations and their application to sea surface salinity retrieval[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(4): 804-823.
- [34] 王新强. 综合孔径微波辐射计误差及校正仿真分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- [35] BOUTIN J, WALDTEUFEL P, MARTIN N, et al. Surface salinity retrieved from SMOS measurements over the global ocean: Imprecisions due to sea surface roughness and temperature uncertainties[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2004, 21(9): 1432-1447.
- [36] ESA. SMOS offers new perspective on hurricanes[EB/OL]. http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/SMO/S/MOS_offers_new_perspective_on_hurricanes, 2018-09-25/2018-12-25.