

地球物理模式函数与 卫星散射计遥感海面风场

王志雄 赵朝方 林明森 著



科学出版社

地球物理模式函数与卫星 散射计遥感海面风场

王志雄 赵朝方 林明森 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要论述地球物理模式函数与卫星散射计遥感海面风场,简要回顾卫星散射计和与之伴随的地球物理模式函数的发展,叙述与卫星散射计反演海面风场相关的最新理论和方法,重点论述地球物理模式函数以及卫星散射计反演风场的误差特征,包括海表温度影响海面雷达后向散射截面的物理机制、考虑海表温度影响的 Ku 波段地球物理模式函数的建立、地球物理模式函数中风向调制的改进研究、多卫星散射计风场产品的不一致性分析。此外,本书还涵盖天气预报模式预报风场与卫星散射计反演风场的对比分析,以及影响卫星散射计反演风场质量的因素分析。

本书可作为海洋技术、海洋科学等相关学科本科生或研究生的教学参考书,也可作为海洋遥感科研人员和海面风场数据用户的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

地球物理模式函数与卫星散射计遥感海面风场/王志雄,赵朝方,林明森著. —北京:科学出版社,2019.3

ISBN 978-7-03-060622-8

I. ①地… II. ①王… ②赵… ③林… III. ①海洋遥感-海面-风场
IV. ①P715.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 034991 号

责任编辑:杨光华 / 责任校对:湛 莉
责任印制:彭 超 / 封面设计:苏 波

科 学 出 版 社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

武汉精一佳印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

开本: B5 (720×1000)

2019 年 3 月第 一 版 印张: 10 1/2

2019 年 3 月第一次印刷 字数: 210 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

卫星散射计能够提供 10~100 km 尺度分辨率的全球海面风场资料,因其具有空间覆盖范围广、反演风矢量、测量精度高和可长期稳定运行等特点,在诸多类型的卫星海洋遥感器中具有不可替代的作用。近年来,国内外卫星散射计在轨运行的数量迅速增加,有望形成虚拟观测星座,从而缩短连续观测同一海面区域的时间间隔,将极大提高准实时的散射计风场产品在数值天气预报、极端天气预警等应用中的积极作用。然而,由于不同卫星散射计的系统设计和观测几何有差异、不同数据发布机构所采用的数据处理方法有差异,导致不同卫星散射计或同一散射计不同机构提供的海面风场产品之间存在较大差异。这种差异给用户带来不便,也制约了宝贵的多卫星产品发挥最大应用价值。因此,卫星散射计相互定标技术的研究成为领域内国际前沿热点话题。

地球物理模式函数 (geophysical model function, GMF) 表达了卫星散射计测得的归一化雷达散射截面 (normalized radar cross section, NRCS) 与海洋动力参数 (如风速、风向、温度、海流等) 和观测方式 (雷达频率、天线指向、入射角和极化方式) 的关系。地球物理模式函数把卫星遥感技术与海洋动力环境参数联系起来,因此对卫星数据反演的质量具有决定性作用,是实现多卫星散射计风场产品相互定标的关键因素。

本书依据 Ku 波段散射计海面风场反演受到海面温度影响

十分显著的事实,采用由 Kudryavtsev 海浪频谱和二阶小斜率近似方法构成的海面雷达后向散射理论模型,系统分析海水动力粘滞系数、表面张力和介电常数等海水物理性质随温度变化的关系,阐述海表温度对归一化雷达散射截面影响的物理机制,并利用现有卫星散射计数据进行相关的验证。在此基础上,提出考虑海表温度影响的地球物理模式函数参数化表达式,改进现有散射计海面风场反演的地球物理模式函数,并给出实验验证结果。本书共 7 章,各章内容概要如下。

第 1 章回顾卫星散射计与地球物理模式函数的发展,叙述海面 10 m 处三种风(真实风、等效中性风和应力等效风)的含义与联系,概述目前卫星散射计业务化风场反演的主要流程与方法。

第 2 章介绍几种典型的卫星散射计风场产品和数值天气预报模式预报数据,以及风场数据比较方法。

第 3 章介绍海水物理性质与温度的关系,提出海面雷达后向散射理论模型,并通过该理论模型阐明海表温度影响归一化雷达散射截面的物理机制,最后使用该理论模型仿真模拟海表温度对归一化雷达散射截面的影响及其与风速、入射角、极化方式和雷达频率的关系。

第 4 章首先展示卫星散射计全球覆盖所隐含的风速与海表温度分布的联系,然后叙述 C 波段和 Ku 波段散射计反演的风速偏差与海表温度存在密切相关的事实;其次通过分析风场反演残差揭示海表温度对风场反演过程的影响,并展示海表温度对 Ku 波段 RapidSCAT 散射计测量归一化雷达散射截面的影响;最后总结 Ku 波段经典地球物理模式函数与海表温度的内在联系。

第 5 章首先提出 Ku 波段归一化雷达散射截面随海表温度变化关系的参数化表达式,然后叙述如何使用卫星数据对表达式中的参数进行拟合并建立新的地球物理模式函数,最后展示使用多种方法评价基于新建立的地球物理模式函数反演得到的风场数据的结果。

第 6 章提出改进风向调制的方法,使用该方法并基于 OSCAT-2 测量数据进行风向调制改进实验,通过实验结果分析,论述地球物理模式函数中风向的调制。

第 7 章基于卫星散射计风场产品的配对数据,分别讨论风场产品的风速误差特征和风向误差特征,以及误差特征形成的主要因素。

本书研究工作和初稿主要由王志雄完成,赵朝方和林明森参与了本书研究工作并负责了本书的策划、架构设计、内容审查和校稿。本书第 1~6 章研究得到了国家 863 计划课题“海洋动力环境微波遥感信息提取技术与应用”(2013AA09A505)的资助,第 7~8 章得到了国家自然科学基金国际合作与交流重点研究项目“新概念雷达海洋动力参数遥感基础理论及应用研究”(41620104003)的资助,在此表示感谢。

本书在研究和编写过程中得到了荷兰皇家气象研究所 Ad Stoffelen 以及南京

信息工程大学海洋科学学院何宜军、张彪、林文明和李秀仲等人的帮助，在此一并感谢！

由于地物物理模式函数和卫星散射计遥感海面风场的相关技术和理论还在不断发展和完善，加之作者水平有限，书中疏漏与不足之处在所难免，敬请有关专家和读者批评指正。

作者

2019 年 3 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 卫星散射计风场产品的主要应用	3
1.2 卫星散射计发展概述	5
1.2.1 固定天线卫星散射计	5
1.2.2 旋转扫描天线卫星散射计	7
1.2.3 未来卫星散射计的发展	10
1.3 卫星散射计地球物理模式函数及其发展	12
1.3.1 风矢量单元及其归一化雷达散射截面	12
1.3.2 真实风、等效中性风和应力等效风	13
1.3.3 地球物理模式函数的定义	15
1.3.4 经典地球物理模式函数的发展简述	16
1.3.5 NSCAT-4 GMF 和 COMD7 GMF 的绘图展示	22
1.4 地球物理模式函数与风场反演	25
第 2 章 海面风场产品与海表温度	29
2.1 卫星散射计风场产品	31
2.1.1 ASCAT-A 和 ASCAT-B 25 km 风场产品	31
2.1.2 RSCAT 25 km 风场产品	31
2.1.3 OSCAT-2 25 km 和 12.5 km 风场产品	31
2.2 数值天气预报模式数据	32

2.2.1 数值天气预报海表温度数据	32
2.2.2 数值天气预报风场数据	32
2.3 ASCAT 和 RSCAT 卫星散射计配对数据集	33
2.3.1 ASCAT 与 RSCAT 配对数据集	33
2.3.2 ASCAT 与 R4 风速偏差的地理分布	34
2.4 风场数据比较	36
2.4.1 数据分组方法	37
2.4.2 ASCAT 或 R4 风场与数值天气预报风场对比分析	37
2.5 本章小结	42
第 3 章 海表温度影响海面后向散射截面的模拟仿真	45
3.1 海水物理性质与温度的关系	47
3.1.1 海水动力粘滞系数	47
3.1.2 海水表面张力	48
3.1.3 海水介电常数	49
3.2 海面雷达后向散射理论模型	51
3.2.1 Kudryavtsev 海浪谱的简介	51
3.2.2 Kudryavtsev 海浪频谱与海表温度的关系	52
3.2.3 二阶小斜率近似方法的简介	54
3.3 基于海面雷达后向散射理论模型仿真模拟海表温度 对归一化雷达散射截面的影响	56
3.4 本章小结	58
第 4 章 基于卫星散射计数据的仿真结果印证	61
4.1 海表温度的概率密度函数	63
4.2 卫星散射计风速偏差与海表温度的影响	65
4.2.1 ASCAT 与 R4 的风速偏差	65
4.2.2 RSCAT 散射计 VV 和 HH 极化反演的风速偏差	69
4.3 风场反演残差与海表温度的关系	71
4.4 海表温度对 Ku 波段归一化雷达散射截面的影响	73
4.5 Ku 波段经典地球物理模式函数与海表温度的关系	76
4.6 本章小结	77

第 5 章 考虑海表温度影响的 Ku 波段地球物理模式函数的建立	79
5.1 海表温度对归一化雷达散射截面影响的参数化方法介绍	81
5.1.1 海表温度对归一化雷达散射截面影响的参数化表达式	81
5.1.2 VV 和 HH 极化归一化雷达散射截面对海表温度的依赖关系	83
5.1.3 VV 和 HH 极化归一化雷达散射截面对海表温度依赖关系的比值	85
5.2 海表温度对归一化雷达散射截面影响的量化结果和讨论	86
5.2.1 VV 和 HH 极化归一化雷达散射截面对海表温度的依赖关系	86
5.2.2 VV 和 HH 极化归一化雷达散射截面对海表温度依赖关系的比值	91
5.3 考虑海表温度影响的 Ku 波段地球物理模式函数的建立	93
5.3.1 考虑海表温度影响的 Ku 波段地球物理模式函数建立的总体思路	93
5.3.2 NSCAT-4pSST GMF	94
5.3.3 NSCAT-5 GMF	97
5.4 R4T 和 R5 风场产品评价	98
5.4.1 风场反演残差	99
5.4.2 风速概率密度函数	101
5.4.3 风速偏差	102
5.4.4 三配对数据分析法	105
5.5 本章小结	106
第 6 章 地球物理模式函数中风向调制的改进	109
6.1 风向调制的改进方法	111
6.1.1 依赖风向变化的反演风速偏差	111
6.1.2 计算风向调制归一化雷达散射截面校正值的方法	113
6.2 风向调制的改进结果	115
6.2.1 风向调制归一化雷达散射截面校正值	115
6.2.2 风向调制的校正示例	117
6.2.3 风向调制系数的拟合	118
6.2.4 NSCAT-4D 与 NSCAT-4 GMF 的比较	121
6.3 风向调制改进结果的印证	122
6.3.1 风向对比分析	122
6.3.2 风矢量分量的对比分析	125

第 7 章 多卫星散射计风场产品的不一致性分析	127
7.1 数据介绍	129
7.2 风速的误差特点	130
7.3 风向的误差特点	135
7.4 质量标识的有效性分析	139
参考文献	143
附录	153

第 1 章

绪 论

美国于 1978 年发射了世界上第一颗海洋卫星 SEASAT-A，微波散射计是其主要荷载之一。至今，卫星散射计遥感技术的发展已有 40 余年。在本章中，将首先简要回顾卫星散射计的发展历程，比较不同散射计天线设计的优缺点；然后介绍与卫星散射计遥感海面风场相关的最新理论认识，以及地球物理模式函数的定义和发展；最后简述卫星散射计反演海面风场的基本流程。

1.1 卫星散射计风场产品的主要应用

海面风场在海洋-大气相互作用、海洋环流、海洋生态系统、区域和全球范围天气变化、气候变化等自然动力过程中扮演重要的角色 (de Chiara, 2014; England et al., 2014; Young et al., 2011; Chelton et al., 2006; Isaksen et al., 2004; 叶安乐, 1992; Stewart, 1969)。因此, 全球的海面风场资料是影响人类安全高效地从事涉海活动的基本物理参数之一。卫星遥感具有大面积同步测量、覆盖范围广和重访周期短等特点, 是获取全球海面风场信息的主要方式。而在诸多卫星遥感方式中, 卫星散射计以其能够全天候观测、反演风矢量、测量精度高等独有特点成为目前为止获取全球海面风场观测资料最主要的卫星传感器 (林明森 等, 2013)。

目前, 业务化、准实时的卫星散射计风场产品最主要的应用之一是数值天气预报 (numerical weather prediction, NWP) 模式, 比如欧洲中尺度天气预报中心 (European Centre for Medium-range Weather Forecasts, ECMWF) 和美国国家环境预报中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 等。卫星散射计 ERS/AMI、QuikSCAT/SeaWinds (QSCAT) 和 MetOp/ASCAT (ASCAT) 风场产品先后被同化到欧洲中尺度天气预报中心和美国国家环境预报中心模式且都表现出了显著的积极影响 (Bi et al., 2011; Chelton et al., 2006; Isaksen et al., 2004)。Laloyaux 等 (2016) 和 de Chiara (2014) 等基于欧洲中尺度天气预报中心集合预报系统 (integrated forecasting system, IFS) 研究了 ASCAT-A、ASCAT-B 和 Oceansat-2/Scatterometer (OSCAT) 散射计风场产品对预报系统的影响, 研究表明若增加 ASCAT-A、ASCAT-B 和 OSCAT 风场数据同化对减小模式 24 小时预报误差的贡献 (forecast error contribution, FEC) 约占 7.5% (Cardinali, 2009); 特别地, 散射计风场产品对减小模式在南半球预报误差的贡献更为显著。另一方面, 当前卫星散射计风场产品在模式预报中的作用并没有被完全开发, 人们有望通过改进模式数据同化策略进一步提高散射计风场对减小预报误差的贡献 (Lin et al., 2017; Liu, 2002)。

卫星散射计能够在多云、降雨等复杂或恶劣天气情况下较为准确地获取海面后向散射截面并反演矢量风场, 这对掌握海面状况具有不可替代的参考价值。单一或者多个卫星散射计的连续观测为热带气旋在海上的生成、发展、成熟和消亡等活动过程的研究提供宝贵的监测资料, 更是热带气旋预报模式输入和修正的必要数据 (Zhao et al., 2016; 林明森 等, 2014; Zhong et al., 2012; Bourassa et al., 2010;

Zou et al., 2010; Brennan et al., 2009; Wang et al., 2008; Sharp et al., 2002)。

随着海洋经济的日益发展,尤其是海上丝绸之路的推动建设,海洋运输安全和效率的管理面临新的机遇和挑战。卫星散射计提供的准实时全球海面风场资料能够服务于海洋船舶运输行业。一方面,准实时数十千米级空间分辨率的卫星散射计风场资料可以帮助船舶掌握大范围的海面实时情况,规避和减小海上船舶受恶劣天气的损害。另一方面,卫星散射计风场产品通过同化到数值天气预报模式,提高天气预报的准确性,进而实现基于天气预报(包括海风、海流等)和船舶特性的“最优路径”的选择,对于船舶减少运输时间和燃料消耗且降低危险天气的损失具有重要意义(Li et al., 2015; Chen et al., 1998; Graf et al., 1998)。

除了以上列举的应用之外,卫星散射计风场产品还广泛应用于海洋模式(Tokmakian, 2005)、海气相互作用研究(Chelton et al., 2010)、热带辐合带(intertropical convergence zone, ITCZ)以及该地区海温、海流和风场耦合研究(Chelton et al., 2004; Kelly et al., 2001),以及估计海洋风能及其分布等(Liu et al., 2008)。

卫星散射计提供除陆地和冰以外全球范围的海面风场资料,帮助提高了对海洋现象和过程背后物理机制的理解,对改善气候和天气预报能力发挥了关键作用,也提高了人们评估气候变化和恶劣天气对社会和经济影响的能力。我国首个业务化运行的海洋二号 A 星(HY-2A)微波散射计已经在轨运行 7 年多,其风场数据产品已经应用到海洋风暴潮监测、海冰监测、海气相互作用和大洋渔业等业务应用系统,并在海洋防灾减灾、海洋环境预报、海洋资源开发、海洋科学研究及国际合作等领域发挥了显著作用,取得了极大的社会效益和经济效益(蒋兴伟 等, 2014)。

近年来,国内外越来越多的卫星散射计发射运行或计划发射,使在轨运行的多个卫星散射计能够联合提供更高空间覆盖率、更短重访周期的海面风场观测资料。然而,单一卫星散射计风场产品的质量,以及多个卫星散射计风场产品之间的差异却成了大量宝贵数据发挥最大应用价值的主要限制因素。已有研究表明, Ku 波段卫星散射计的风速偏差与海表温度有关。这将导致 Ku 波段卫星散射计风场产品的误差与海表温度的地理分布相关,同时也使得不同卫星散射计反演风场之间的差异呈地理相关性。这种与海表温度有关的偏差将对模式数据同化等应用造成不利影响,一定程度上降低了卫星散射计数据的应用价值。本书将分析卫星散射计误差特点,阐述海表温度对海面归一化雷达散射截面影响的物理机制,并最终建立考虑海表温度影响的卫星散射计地球物理模式函数。研究结果将提升 Ku 波段卫星散射计反演风场产品的质量,也将为建立长期的卫星散射计海面风场气候数据集提供不可缺少的理论支撑。

1.2 卫星散射计发展概述

随着海面电磁散射理论、卫星遥感技术的发展和积累,自第一颗星载卫星散射计发射以来,星载微波散射计的系统设计(包括雷达波长、极化方式、天线观测几何等)呈现多样性。为了反演海面分辨单元的风速和风向信息,要求卫星散射计对同一海面分辨单元获取至少两个不同方位角的观测。根据天线观测方式把目前的卫星散射计分为两类,一类为固定天线卫星散射计,主要有 Seasat-A/SASS (Seasat-A satellite scatterometer) (Johnson et al., 1980; Grantham et al., 1977)、ERS/AMI (active microwave instrument) (Brooks et al., 1985)、ADEOS-1/NSCAT (the NASA scatterometer) (Naderi et al., 1991) 和 MetOp/ASCAT (advanced scatterometer) (Gelstorp, et al., 2000); 另一类为旋转扫描天线卫星散射计,主要有 QuikSCAT/SeaWinds (QSCAT) (Tsai et al., 2000; Wu et al., 1994)、Oceansat-2/SCAT (OSCAT) (Parmar et al., 2006)、HY-2/SCAT (HSCAT) (Jiang et al., 2012)、ISS/RapidScat (RSCAT) (Madsen et al., 2016)、SCATSAT-1/OSCAT-2 和 CFOSAT/RFSCAT 等。

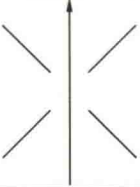
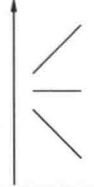
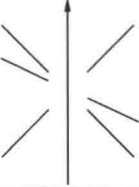
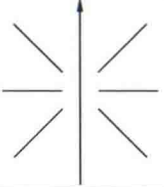
1.2.1 固定天线卫星散射计

固定天线卫星散射计由于其天线波束的地面足印为扇形,也称为固定扇形波束散射计。固定天线卫星散射计的雷达频率、极化方式和天线观测几何等信息如表 1.1 所示。

表 1.1 固定天线卫星散射计基本信息

类型	固定天线卫星散射计			
传感器	SASS	AMI	NSCAT	ASCAT
卫星平台	Seasat-A	ERS-1 ERS-2	ADEOS-1	MetOp-A MetOp-B MetOp-C
轨道类型	非太阳同步近圆形极地轨道	太阳同步轨道,升交点地方时约为: 22:30 UTC	太阳同步轨道,升交点地方时约为: 22:30 UTC	太阳同步轨道,升交点地方时约为: 21:30 UTC
轨道倾角	108°	98.52°	98.625°	98.704°

续表

类型	固定天线			
传感器	SASS	AMI	NSCAT	ASCAT
所属国家或机构	美国	欧洲空间局	美国	欧洲空间局
频率/GHz	14.6 (Ku 波段)	5.3 (C 波段)	14.0 (Ku 波段)	5.3 (C 波段)
极化方式	VV 或 HH	VV	VV (所有天线), HH (中间天线)	VV
天线观测几何示意图				
正常运行时间	1978.06~1978.10	ERS-1: 1991.07~1996.06 ERS-2: 1995.04~2001.01	1996.08~1997.06	MetOp-A: 2006.10 至今 MetOp-B: 2012.09 至今 MetOp-C: 2018.11 至今

国际上,美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)于 1978 年成功发射第一颗业务化运行的卫星散射计 Seasat-A/SASS,不仅验证了星载散射计测量海面风场的可行性,也为后续卫星散射计的发展奠定了基础。1991 年和 1995 年先后成功发射的欧洲空间局(European Space Agency, ESA) ERS-1、ERS-2 卫星搭载的主动微波散射计(AMI)积累了约 10 年的观测资料,为地球物理模式函数、风场反演、质量控制、数据同化、极地海冰检测、陆地土壤水分估算等相关研究提供了大量可靠的卫星观测数据。

欧洲空间局在 2006 年、2012 年和 2018 年分别发射的 MetOp-A、MetOp-B 和 MetOp-C 系列卫星都搭载了 ASCAT 散射计。ASCAT 散射计继承和发展了 ERS/AMI 散射计的设计,采用双刈幅观测以提高空间覆盖率,采用较大入射角(AMI: $18^{\circ}\sim 57^{\circ}$; ASCAT: $25^{\circ}\sim 65^{\circ}$),以使后向散射截面对风速更敏感,进而改善反演风场的精度(Figa-Saldaña et al., 2002)。

Ku 波段的 NSCAT 散射计和 C 波段的 AMI 或 ASCAT 散射计的观测几何相似,均可获得前中后三个天线波束的观测。前后波束指向与卫星平台前进方向的夹角分别为 45° 和 135° 。观测几何的不同点主要体现在中间波束指向与卫星平台前进

方向的夹角不同, NSCAT 散射计为 115° (右侧刈幅) 或 65° (左侧刈幅), 而 AMI 或 ASCAT 散射计为 90° (右侧刈幅)。此外, NSCAT 散射计的中间天线以 VV 和 HH 两种极化方式工作, 因此每一个风单元可以获得 4 次 (3 次 VV 和 1 次 HH) 不同的测量。AMI 和 ASCAT 散射计都只有 3 次 VV 极化观测。NSCAT 散射计的入射角范围较大, 前后波束约为 $20^\circ < \theta < 64^\circ$, 中间波束约为 $16^\circ < \theta < 54^\circ$ 。NSCAT 散射计虽然只运行了约 10 个月的时间, 但是为建立比较完整的 Ku 波段地球物理模式函数提供了宝贵的观测资料。

固定天线卫星散射计的主要优点包括以下两个方面。

(1) 每个雷达脉冲都能够观测到整个刈幅范围, 因此有较多的时间可用于临近测量的平均和噪声削减。

(2) 固定的观测方位角 (特别是前后观测相差 90°) 有利于确定风场反演目标函数的局部最小点, 即风向模糊解, 一定程度上提高了风场反演的准确性。

固定天线卫星散射计的主要缺点包括以下三个方面。

(1) 存在星下点观测盲区。这主要是由于在星下区域的观测入射角较小 (小于 20°), 此时测量后向散射截面的主要贡献来自镜面散射。小入射角测量的海面后向散射截面随风速风向的函数关系复杂, 且与中等入射角差异较大, 这导致小入射角观测条件下很难准确地反演风场。

(2) 刈幅内风单元的观测入射角不尽相同, 给不同位置的后向散射测量定标以及风场验证带来一定的困难。

(3) 扇形波束天线的增益一般比较低, 对应的测量信噪比较低、误差较大。由于天线脉冲能量分布在整个刈幅宽度, 在计算单个 (重采样) 风矢量单元时尤其需要根据雷达方程考虑后向散射能量随距离的四次方衰减。

1.2.2 旋转扫描天线卫星散射计

旋转扫描天线卫星散射计大多数采用单个抛物面天线, 通过双馈源提供 VV 或 HH 极化的两个固定入射角的笔形波束, 即内波束和外波束 (郎姝燕 等, 2017)。旋转扫描天线散射计的内波束均采用 HH 极化, 而外波束均采用 VV 极化, 如此设计的主要考虑因素包括: 相同入射角时, VV 极化的海面后向散射截面大于 HH 极化; HH 极化后向散射截面对海面风向的变化较敏感, 有利于风场反演过程中的风向模糊解去除; 不同极化信息对风场反演有利 (Tsai et al., 2000)。目前, 旋转扫描天线卫星散射计按波束又可分为笔形波束和扇形波束。目前的旋转扫描笔形波束卫星散射计的雷达频率、极化方式、天线观测几何等信息如表 1.2 所示。