

海洋遥感雷达的一体化发展趋势*

赵启钊¹, 孙光才¹, 李 航¹, 张振华^{2,4}, 张 杰^{3,4}

(1 西安电子科技大学 西安 710071

2 北京遥测技术研究所 北京 100094

3 自然资源部第一海洋研究所 青岛 266061

4 自然资源部海洋遥测技术创新中心 青岛 266061)

摘要: 利用雷达高度计、微波散射计、海洋波谱仪和合成孔径雷达 SAR (Synthetic Aperture Radar) 观测海面风、浪等海洋动力环境要素的技术已经日趋成熟, 针对现有单星多传感器体制存在的重量大、稳定性差、功耗高、整星系统复杂等缺点, 首先对以上四种海洋微波遥感器的发展和应用情况进行了梳理, 随后根据目前的发展趋势, 提出了一种新的多模式一体化设计方法并进行详细描述, 最后, 对未来星载海洋微波遥感器的多模式一体化技术进行了展望, 为今后海洋微波遥感器的多模式一体化研究提供参考。

关键词: 海洋微波遥感器; 一体化; 新体制

中图分类号: TN959.3

文献标识码: A

文章编号: CN11-1780(2021)03-0048-09

The development of integrated marine remote sensing radar

ZHAO Qizhao¹, SUN Guangcai¹, LI Hang¹, ZHANG Zhenhua^{2,4}, ZHANG Jie^{3,4}

(1. Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100094, China;

3. The First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China;

4. Ocean Telemetry Technology Innovation Center, MNR, Qingdao 266061, China)

Abstract: Technologies for observing sea wind, wave and other marine dynamic environmental factors using radar altimeter, scatterometer, spectrometer and SAR (Synthetic Aperture Radar) is maturing. It has the disadvantage of large weight, poor stability, high power consumption and complex system for the existing single-star multi-sensor systems. In this paper, the development and application of the above four kinds of marine microwave remote sensors are reviewed firstly. Then, according to the current development trend, a new multi-mode integrated design method is proposed and described in detail. Finally, the multi-mode integration technology of space-borne ocean microwave remote sensor is prospected, which provides reference for the multi-mode integration research of ocean microwave remote sensor in the future.

Key words: Marine microwave remote sensor; Integration; New system

引 言

地球上海洋总面积约为 3.6 亿平方公里, 约占地球表面积的 71%, 因此, 海洋环境的观测对于全球环境的观测具有不可替代的重要意义^[1]。过去, 针对海洋环境的观测主要采用浮标、潜标以及海床基系统^[2]等方法, 但是这些方法难以获得大范围、高精度和长时间的观测数据^[3]。因此, 利用卫星平台进行海洋环境观测的技术研究被提上日程。

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来获取海面动力和热力信息的一种技术手段, 并通过极化^[4]、相位、干涉^[5]等技术获得更多、更精确的海洋表面信息^[6]。

海洋二号^[7]这种单星多传感器海洋微波遥感卫星是通过搭载多种独立工作的传感器实现对多种海洋要素的观测, 各传感器之间缺乏互相支持, 导致了卫星体积、质量较大, 整星系统复杂, 运行风险增加

*基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (61931025)

收稿日期: 2020-09-03 收修改稿日期: 2021-03-10

等问题。针对以上问题,本文提出了一种新的多模式一体化设计方法,共用一副相控阵天线,实现在不同入射角下多种传感器同时工作,从而获取同步的海洋风、浪观测信息,解决单星多传感器稳定性差、体积和质量大等问题。

目前,新型多模式一体化设计方法在相控阵天线设计、时序设计以及回波信号分离等方面还存在一定的技术问题,需要在已经成熟的技术基础之上,发展出适用于新体制的设计方法。

1 海洋微波遥感卫星的发展与应用

雷达高度计是一种主动式实孔径雷达,通常工作在 Ku 波段或 C 波段,它通过测量高度计向星下点发射的脉冲与海面回波之间的时间延迟来计算高度计至海平面的高度,再通过相应的信号处理手段,获得海面有效波高和后向散射系数等数据^[8]。图 1 (a) 为星载雷达高度计工作示意图。

微波散射计是一种工作在中等入射角的实孔径雷达,通过海面 Bragg 散射得到回波信号,利用回波强度对不同风速下海面粗糙度的响应和多角度观测来提取海面风场信息^[9]。图 1 (b) 为星载扇形波束圆锥扫描体制微波散射计工作示意图。

海洋波谱仪的原型为窄脉冲波束扫描的实孔径雷达,它通过方位角 360°扫描观测来获取二维海浪谱。海洋波谱仪的工作原理是基于雷达波的海面准镜面散射理论,受波浪调制的雷达后向散射功率谱密度与波浪的斜率谱成线性关系^[10]。图 1 (c) 为星载海洋波谱仪工作示意图。

合成孔径雷达通常安装在飞机或卫星上,在飞行过程中发射和接收宽频带的信号对固定的地面场景做观测,将接收存储的信号做合成阵列处理,就可得到距离向分辨率和方位向分辨率均很高的地面场景图像^[11]。图 1 (d) 为条带模式星载合成孔径雷达工作示意图。

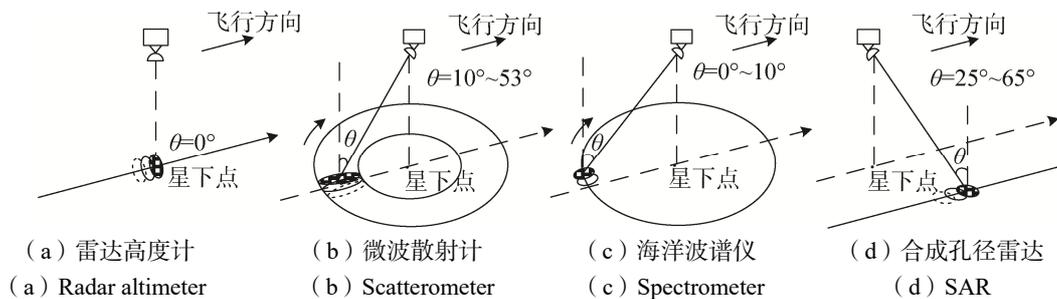


图 1 四种海洋微波遥感器工作示意图

Fig. 1 Four kinds of marine microwave remote sensors

海洋微波遥感卫星的研究起步于上个世纪 60 年代初期,在 70 年代就已经得到了初步的应用,在 80 年代到 90 年代得到了长足的发展。进入新世纪后,海洋微波遥感卫星已经向着高分辨率、高稳定性、大覆盖以及多要素的方向发展。

1.1 海洋微波遥感卫星发展现状

1973 年,美国宇航局利用土星 5 号火箭发射了 Skylab 天空实验室,携带了 S-193 型主动和被动测量系统,这个系统包含有国际上第一个星载雷达高度计。1978 年,美国发射了世界上第一颗真正意义上的海洋微波遥感卫星 SEASAT-A,星上搭载有高度计、SAR、散射计和微波辐射计等传感器,它们的测高精度小于 8 cm,风速测量精度不高于 1.3 m/s。1984 年,美国海军发射了高度计专用卫星 Geosat^[12]以获得更高精度的数据。

1991 年,欧空局发射了第一颗欧洲遥感卫星 ERS-1,其上搭载有 SAR、风散射计、雷达高度计以及辐射计等微波遥感器。2016 年 1 月 17 日,Jason-3 卫星发射,它由 NOAA (美国国家海洋和大气管理局)和 EUMETSAT (欧洲气象卫星开发组织)等机构共同研发,有效载荷为 Poseidon-3B 高度计和先进微波辐射计 AMR-2 (Advanced Microwave Radiometer-2)^[13]。任务目标是提供高精度的海洋地形学数据,在数据精度上超过 TOPEX/Poseidon、Jason-1 和 Jason-2,并且每 10 天对全球海平面高度实现精度优于 4 cm 的测量,以便可以对海洋循环、气候变迁和海平面上升进行监测^[14]。

我国的海洋微波遥感卫星研发较晚。2002 年 12 月, 神舟四号 (SZ-4) 飞船搭载着多模态微波遥感器发射升空, 多模态微波遥感器^[15,16]是由雷达高度计、散射计和辐射计组成。2011 年 8 月 16 日成功发射海洋二号 (HY-2A) 卫星^[17], 这是我国第一颗海洋动力环境卫星, 其主要载荷有雷达高度计、微波散射计和微波辐射计等。2018 年 11 月 29 日, 搭载着微波散射计和海洋波谱仪的中法海洋卫星 (CFOSAT) 发射成功, 其中, 波谱仪 SWIM 是世界上第一个小入射角下星载海浪主动微波遥感器。2020 年 2 月, 中法海洋卫星正式在轨交付自然资源部投入业务应用, 目前已经可以访问 2019 年 7 月底以来的卫星观测数据^[18]。表 1 列出了目前为止主要的海洋微波遥感卫星, 其中 SAR 部分只列出了用来进行海洋遥感的 SAR 卫星。由于星载波谱仪发展较晚, 波谱仪部分除了 SWIMSAT 和 CFOSAT 外, 均为机载或试验系统。

表 1 主要的海洋微波遥感卫星

Table 1 Main marine microwave remote sensing satellite

时间	高度计	SAR	波谱仪	散射计
1970~1980 年	Skylab Geos-3 Seasat-A	Seasat-A	SCR	Seasat-A
1980~1990 年	Geosat		ROWS	
1990~2000 年	ERS-1 TOPEX ERS-2	ERS-1 ERS-2	RESSAC	ERS-1 ERS-2 ADEOS-1
2000~2010 年	Jason-1 Envisat SZ-4 (中国)	Envisat	STORM SWIMSAT	SZ-4 (中国) MetOp-1
2010 年以后	HY-2 (中国) SARAL Jason-3	Sentinel-1	CFOSAT (中法合作)	HY-2 (中国) CFOSAT (中法合作)

注: 由于星载波谱仪发展较晚, 表中波谱仪部分, 除 SWIMSAT 和 CFOSAT 外, 均为机载或试验系统。

1.2 HY-2 的应用情况

HY-2 卫星具有全天候、全天时、全球探测能力, 其主要使命是监测和调查海洋环境, 获得包括海面风场、浪高、海流、海面温度等多种海洋动力环境参数, 可直接为灾害性海况预警预报提供实测数据, 为海洋防灾减灾、海洋权益维护以及国防建设等提供支撑服务^[19]。

HY-2 卫星装载雷达高度计、微波散射计、扫描微波辐射计和校正微波辐射计等传感器。其中, 雷达高度计用于测量海面高度、有效波高及风速等海洋基本要素, 微波散射计主要用于全球海面风场观测, 其技术指标见表 2。

表 2 HY-2 高度计主要技术指标及应用

Table 2 Main technical indexes and application of HY-2's altimeter

参数名/单位	参数值	参数名/单位	参数值
工作频率/GHz	13.58 (Ku 波段) 5.25 (C 波段)	工作带宽/MHz	320/80/20 在轨实时自适应
峰值功率/W	Ku 波段: 10 C 波段: 20	脉冲重复频率/kHz	Ku 波段: 2.30 C 波段: 0.76
测距精度/cm	≤4 (海面星下点)	有效波高测量范围/m	0.5~20
应用	建立平均海面高度模型、海洋重力场反演、计算大地水准面等		

表 3 HY-2 散射计主要技术指标及应用

Table 3 Main technical index and application of HY-2's scatterometer

参数名/单位	参数值	参数名/单位	参数值
工作频率/GHz	13.256 (Ku 波段)	发射功率/W	120
扫描方式	机械圆锥扫描	天线转速/(r·min ⁻¹)	16.67
测量幅宽/km	内: 1400, 外: 1700	风速测量精度/(m·s ⁻¹)	1.5
风速测量范围/(m·s ⁻¹)	2~24	风向测量精度/(°)	±20
应用	海洋天气、海浪预报等		

HY-2 雷达高度计采用双频段工作模式，通过向海面垂直发射信号，分析回波特征，从中提取出海面高度、有效波高和海面风速等信息。HY-2 微波散射计采用 VV、HH 两种极化下的点波束^[20]，其中，内波束入射角为 35°，外波束入射角为 40.5°。由于利用散射计进行海面风场反演时，至少需要对同一风场单元进行四次不同角度的观测，才能获得无模糊的海面风场信息，因此，采用双波束就可以实现在前视和后视两个方向上获得四个不同的后向散射测量值。图 2 为 HY-2 号散射计和高度计工作示意图。

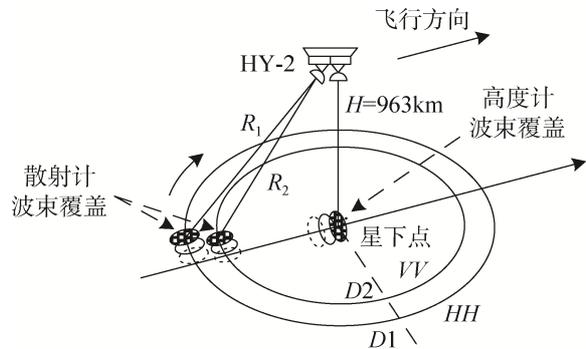


图 2 HY-2 号散射计和高度计工作示意图
Fig. 2 HY-2's scatterometer and altimeter

HY-2 自发射以来，已经获得了大量的海洋遥测数据，其风场图像清晰，风速和风向的测量精度均达到了国际先进水平，HY-2 已经应用于我国的海洋环境预报尤其是在对极端海洋气候预报中发挥了重要作用。图 3 (a) 和图 3 (b) 分别给出了 HY-2 雷达高度计在 2012 年 2 月 16 日的海面高度和有效波高测量结果，图 3 (c) 给出了 HY-2 微波散射计在 2012 年 2 月 17 日的海面风场测量结果。

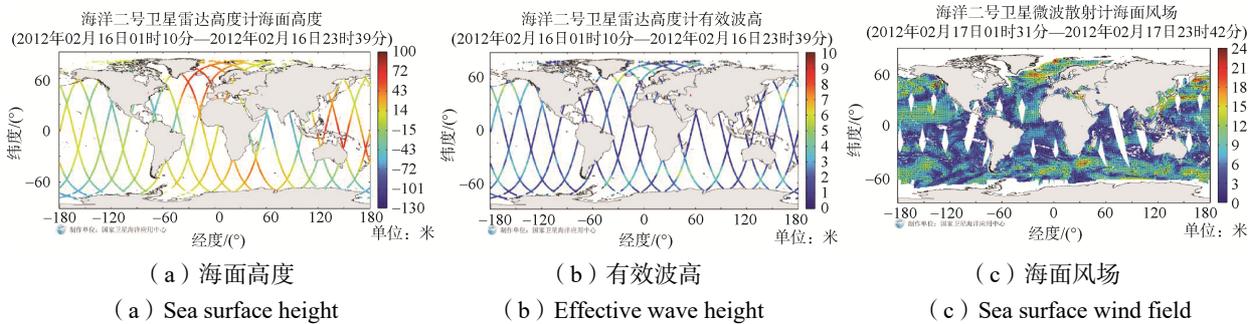


图 3 HY-2 海面高度、有效波高和海面风场产品

Fig. 3 Measurements of sea surface height, effective wave height and sea surface wind field in HY-2
注：图片制作单位为国家卫星海洋应用中心

1.3 ENVISAT-1/ASAR 的应用情况

Envisat 对地观测卫星是欧空局在 2002 年 3 月发射的一颗太阳同步轨道卫星，ASAR (Advance Synthetic Aperture Radar) 为星上的主要载荷。ASAR 是以 ERS-1/2 为基础设计制造的主动微波仪 (AMI)，目的是继续采用 SAR 进行海陆观测，提供有关海浪、海冰范围及运动情况、陆地冰雪的分布范围、土壤湿度及实地范围等观测信息^[21]。

ASAR 有 5 种工作模式，分别为成像模式 IM (Image)、交替极化模式 AP (Alternating Polarization)、宽幅模式 WS (Wide Swath)、全球监测模式 GM (Global Monitoring)、波模式 WV (Wave)。表 4 列出了 ASAR 波模式的部分工作参数。

表 4 ASAR 波模式工作参数及应用

Table 4 Working parameters and application of ASAR's wave-mode

参数名/单位	参数值	参数名/单位	参数值
极化方式	HH 或 VV	空间分辨率/m	5×5
照射宽度/km	5	入射角/(°)	15~45
功率/W	647	下行数据率/Mbps	0.9
辐射分辨率/dB	≤2.5	定位精度/km	0.32
应用	巨浪、海洋热带风暴、风暴潮等灾害性海况预报		

ASAR 的波模式是相对独立的低速率模式，主要用来获取全球海洋观测数据，它采用 7 个扫描条带模式和 HH/VV 的极化方式。ASAR 波模式不需要连续的数据条带，可以在扫描条带内对要成像的部分海域按照一定的间隔成像，在 100 km 的照射宽度内采集 5 km×5 km 的海浪谱图像。图 4 为 ASAR 的 5 种工作模式示意图。

2 海洋微波遥感卫星发展趋势

随着技术的发展, 海洋微波遥感卫星的发展已呈现出一些新的特点和趋势, 主要包括以下几个方面。

① 海洋微波遥感器多模式化

海面风、浪是重要的海洋动力环境要素, 也是与人类活动最直接相关的海洋现象。在复杂的海面风、浪环境中, 利用单一微波遥感器对一种海面信息很难进行精确测量。并且, 要获得多要素的海洋信息, 必须利用多种微波遥感器进行观测。我国的第一颗海洋动力环境卫星 HY-2 同时搭载了雷达高度计和微波散射计, 它们都可以用来测量海面中等风速 (2 m/s ~24 m/s), 原理上也比较接近。图 5 展示了相同时间相同经度下高度计和散射计测量风速的对比情况。图中可以看出, 两种载荷对风速的观测结果并不完全一致。并且, 两种传感器测量精度也有差异, 根据国家卫星海洋应用中心的数据, 在对同一地域同一时刻的海面风速测量中, 散射计的风速测量精度可以达到 1.5 m/s, 而高度计的风速测量精度只有 2 m/s 左右^[22]。

因此, 在一颗卫星上搭载多种微波遥感器, 无论是对单一海洋信息还是多种海洋信息的观测都是十分必要的, 这不仅有利于提高对海洋环境要素的观测精度, 而且还有可能同时获取多种海洋观测信息。

② 海洋微波遥感器逐渐实现高精度大入射角范围

海洋面积占地球总面积的 71% 左右, 面对广阔的海面, 必须能够及时提供对全水域的海面测量信息, 这就为星载海洋微波遥感器的发展提出了挑战。目前, 高分辨率宽测绘带星载 SAR 成像技术^[23]和多模式星载 SAR 技术^[24]都已日趋成熟。类似加拿大的 RadarsAT-2、德国的 Discover-2 这种多模式 SAR 卫星, 可以先利用条带或者扫描等分辨率较低的成像模式实现对广阔地面或海面的观测, 随后对需要精确测量的区域再利用聚束或滑动聚束进行高分辨成像。因此, 伴随着这些技术的持续发展, 未来星载 SAR 在海洋遥感方面将发挥更大的应用。

③ 海洋微波遥感器向着一体化方向发展

传统的单星多传感器体制会使得卫星的系统相对复杂、重量增加, 影响了整个卫星的稳定性。然而, 携带着多模态微波遥感器的 SZ-4 发射成功, 为多任务下海洋微波遥感器的一体化发展提供了新的参考。SZ-4 的多模态体制采用统一数字化管理系统来完成系统的控制管理, 降低了载荷的重量和功耗, 可以实现多种复合对地观测模式, 可以获取对同一观测区域的多重观测数据, 为数据反演和融合处理提供条件。因此, 多种海洋微波遥感器的一体化发展已经成为一种趋势。

④ 海洋微波遥感卫星逐渐小型化和轻质化

伴随着微电子、集成电路以及自动化控制等技术的发展, 卫星小型化技术也得到了长足的发展。小型化卫星通常是指重量在 600 kg 以下的卫星。相对于 CFOSAT 和 Jason-3 这种上千公斤的大中型海洋微波遥感卫星, 小型化的海洋微波遥感卫星具有成本低、研制周期短、风险小等优势。目前, 海洋微波遥感卫星正朝着高分辨率、高稳定性、大覆盖以及多要素的方向发展, 应该利用海洋微波遥感小卫星的优势, 加快推进海洋微波遥感小卫星的发展和应用, 使之成为大中型海洋微波遥感卫星的补充。目前, 针

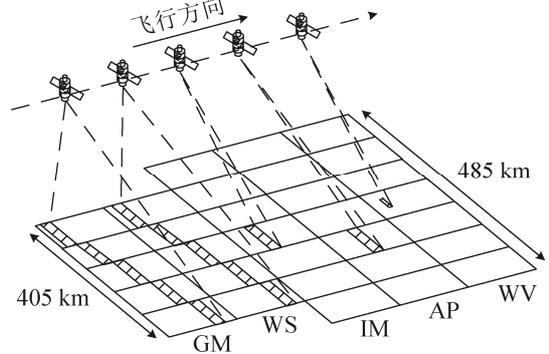


图 4 ASAR 工作模式示意图
Fig. 4 The working mode of ASAR

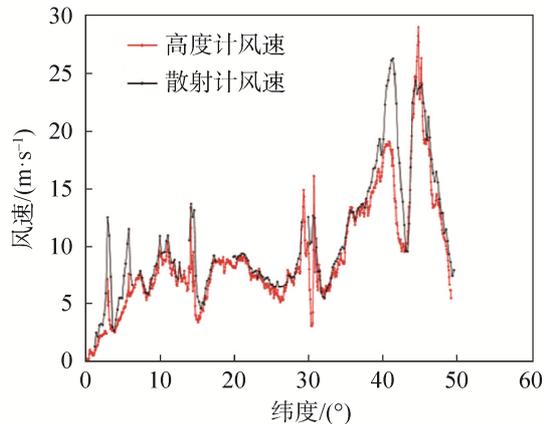


图 5 同时同地高度计和散射计测量风速对比^[22]
Fig. 5 Altimeter and scatterometer measured wind speed contrast at the same time with the ground^[22]

对小型化海洋微波遥感卫星的研究并不多见，与之相关的方向主要是对地观测小卫星 SAR 和光学遥感小卫星。例如，目前仍在轨运行的以色列的 Odeq-10（地平线 10 号）卫星于 2014 年 4 月 9 日发射，卫星重量 400 kg，分辨率约为 0.5 m^[25]。未来可以将小卫星相关技术应用于海洋微波遥感领域，这将为海洋环境的观测和应用提供新的研究方向。

3 海洋微波遥感卫星的新型一体化模式

对于单星多传感器海洋微波遥感卫星，为了保证不同的雷达载荷的性能和耐用性，通常各载荷具有单独的天线等信号收发模块，本文提出一种多模式微波遥感一体化新体制，各传感器共用中央控制设备和收发天线，这样有利于获得宽刈幅、高分辨率的海洋风、浪遥感的同步观测数据。

3.1 新体制的技术难点

由于新体制要求载荷天线具备同时多波束照射与扫描能力，以满足同时多模式观测需求，因此，首要难点在于天线的选取；其次，由于要对大入射角范围同时发射多种频率信号，接收多种回波信号，如何设计时序以及波位才能减少模糊也是一个难点；最后，对于难以避免的多种回波信号混叠，需要四种信号从混叠信号中分离出来。

针对以上难点，拟采用以下技术方案解决：相控阵天线具有同时多波束形成以及波束空域捷变的技术特点，因此，相控阵天线满足新体制要求；要降低模糊，需要对整个观测区域进行一体化联合波位和时序设计；为了实现多模式遥感信号的分离，需要研究基于空时频资源划分的信号收发技术。

3.2 天线的选择

新体制下，雷达需要同时发射四种频率不同的信号，并且向海面发射信号的角度也不同，所以，不仅需要其既能够形成多种波束，还要能够灵活快速地改变波束指向。因此，可以利用相控阵雷达的同时数字多波束形成技术^[26]与多接收通道技术相结合，采用多发多收体制进行信号的收发^[27]。二维相控阵天线存在成本高、质量大的问题，因此，采用轻量化相控阵天线设计方案，对减轻系统重量、降低功耗具有一定意义。相控阵天线轻量化可以采用轻型低剖面方案^[28]、薄膜相控阵天线方案^[29]以及高集成小型 T/R 组件^[30]等技术。但是，目前利用单相控阵天线同时多模式多波束发射和接收从而实现微波遥感宽刈幅、多要素获取技术还没有相关研究，仍然需要在系统层次上进行进一步研究。

3.3 多模式信号复用

波谱仪、散射计和高度计通常采用 Ku 波段的线性调频信号作为发射信号。因为各个微波遥感器对于带宽和载频频率的需求不同，所以在同时发射信号时，就需要用频分复用的方法对频谱资源进行划分。因为高度计与波谱仪都工作在小入射角范围内，所实现距离高分辨率要求带宽较高，SAR 模式工作在中等入射角条件下，所需带宽较小，而散射计的入射角相对较大且主要用于反演大尺度的风场信

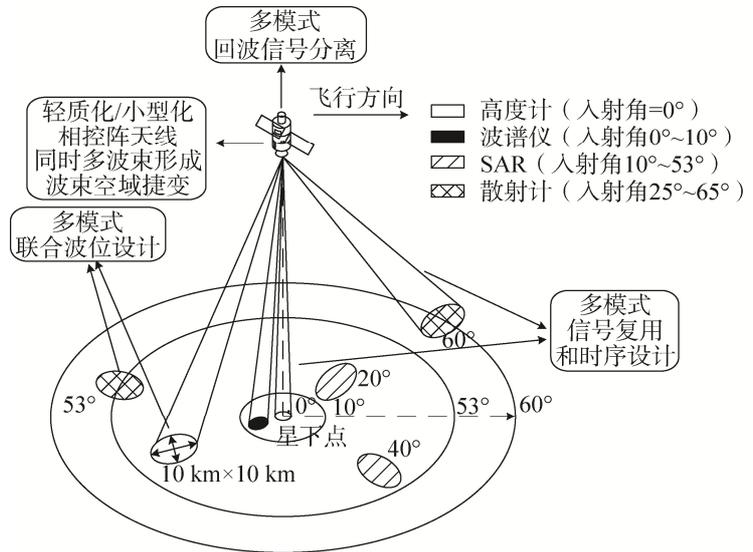


图 6 多模式多波束同时观测示意图

Fig. 6 Simultaneous multi-mode and multi-beam observation

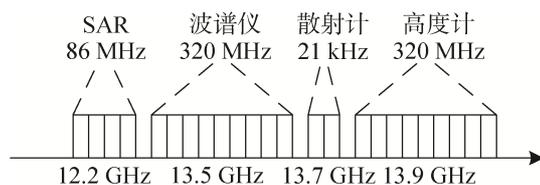


图 7 Ku 波段多模式信号频率划分

Fig. 7 Frequency division of multi-mode signals in Ku band

息, 因此带宽要求最小。以中法海洋卫星搭载的波谱仪 SWIM 为例, 要达到波谱仪单视数下 0.47 m 的斜距分辨率, 信号带宽应为 320 MHz^[31]。

3.4 多模式联合波位设计

根据天线波束覆盖能力对可观测区域进行栅格化划分, 并针对各个网格区域中心位置进行波位设计, 采用统一的数字化编码管理可观测区域的波位。高度计、散射计、波谱仪和 SAR 对于工作体制都有着一定的要求。例如, 散射计要求对同一海面风场单元至少在 4 次不同的角度进行观测才能正确反演出海面风场信息^[32]; 波谱仪要求在一个积分时间内对回波信号进行平均, 还需要对多个相邻方向的一维海浪谱平均, 最终才能得到一个方向上的有效海浪谱^[33]。因为相控阵雷达具有波束空域捷变^[34]的特点, 并且采用栅格化的波位设计方法后, 仍然需要满足波谱仪、散射计、高度计和 SAR 的这种工作体制要求, 所以就需多个波

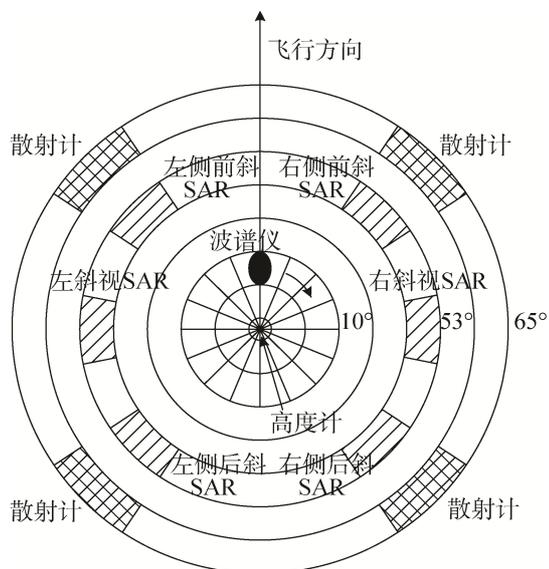


图 8 多模式联合波位设计示意图

束对每个网格区域不断快速“打点”观测, 才能获得精确的全海域的风、浪信息。由于栅格化的波位设计方法只需要波束依照测量要求对相应的网格区域进行“打点”观测, 因此减少了测量数据的冗余, 并且由于网格区域的位置相对固定, 系统时序设计的复杂程度也会降低。

3.5 多模式信号时序设计

星载雷达的时序通常使用斑马图^[35]来设计。在新体制下, 多种回波信号导致时序设计变得复杂, 传统的基于 PRF (Pulse Repetition Frequency) 和距离幅宽的两维斑马图已经不适用于进行一体化时序设计, 需要引入空间或者频率变量, 对回波信号做更多维度的区分, 才能使得时序设计更加合理。除了上述考虑外, 对于多模式信号时序设计, 还要考虑不同工作模式对观测频率的需求。为了实现波谱仪对小入射角下海浪信息的观测, 需要波谱仪工作在很高的 PRF 下; 为避免方位模糊, SAR 模式要求的 PRF 也较高; 散射计对 PRF 要求低, 但要实现全海域测量就需要及时调整每个脉冲的波位。针对不同模式的 PRF 要求, 首先根据 SAR 对 PRF 的要求设计系统最高 PRF, 通过将单个脉冲划分成子帧来实现波谱仪要求的高 PRF, 对于低 PRF 的散射计模式, 可以通过对波谱仪进行脉冲抽取来实现。

3.6 多模式信号分解

雷达在同时多模式下工作时, 接收天线同时接收多种模式的回波信号。接收窗内, 天线阵元接收的不同波位下多种模式回波信号可能会混叠。但是, 由前述的方法设计的信号波形至少在时间、空间和频点的某一个域中存在区别, 所以可以设计空时频自适应滤波器^[36], 将混合回波信号分离成各自独立的回波信号。在设计空时频自适应滤波器时, 首先由混合回波信号的空时频信息计算出信号的协方差矩阵, 随后根据天线导向矢量求解出加权矢量, 紧接着将权系数输入空时频自适应滤波器, 进而可以分离出各自独立的回波信号^[37]。

4 结束语

为了满足我国日益增长的海洋观测需求, 未来多模式一体化的海洋微波遥感传感器将向着小型化、大覆盖、高精度、多要素和低成本的方向发展, 功能越来越完善。然而, 为了将以上的新思想、新方法真正地工程化、实用化, 仍然有许多的技术问题需要解决。但随着海洋遥感技术与相控阵雷达技术的发展, 这些问题都将会被解决, 从而推动海洋微波遥感传感器的发展进入一个新的阶段。

参考文献

- [1] 林明森, 张有广, 袁欣哲. 海洋遥感卫星发展历程与趋势展望[J]. 海洋学报, 2015, 37(1): 1–10.
LIN Mingsen, ZHANG Youguang, YUAN Xinzhe. The development course and trend of ocean remote sensing satellite[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2015, 37(1): 1–10.
- [2] 自然资源部北海局. 海洋气象主要监测手段[EB/OL]. 2014: 7. <http://ncs.mnr.gov.cn/n1/n129/n172/190307104023853440.html>.
- [3] 吴培中. 卫星海洋遥感及其在我国的应用和发展目标[J]. 国土资源遥感, 1993(1): 1–7.
- [4] 张庆君. 卫星极化微波遥感技术[M]. 中国宇航出版社, 2015.
- [5] 张彪. 干涉合成孔径雷达海浪遥感理论与应用研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2008.
ZHANG Biao. Theoretical and application study of remoting sensing ocean wave by interferometric synthetic aperture radar[D]. Qingdao: The Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2008.
- [6] 马丁. 海洋遥感导论[M]. 蒋兴伟, 译. 北京: 海洋出版社, 2008.
SEELYE MARTIN. An introduction to ocean remote sensing[M]. Beijing: Maritime Press, 2008.
- [7] 许可, 董晓龙, 张德海, 等. HY-2 雷达高度计和微波散射计[J]. 遥感技术与应用, 2005, 20(1): 89–93.
XU Ke, DONG Xiaolong, ZHANG Dehai, et al. HY-2 radar altimeter and microwave scatterometer[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2005, 20(1): 89–93.
- [8] 郭伟, 张俊荣, 张升伟, 星载雷达高度计系统设计及测高精度分析[J]. 遥感学报, 1999, 3(1): 23–30.
GUO Wei, ZHANG Junrong, ZHANG Shengwei. Design of a spaceborne radar altimeter system with it's height precision analysis[J]. Journal of Remote Sensing, 1999, 3(1): 23–30.
- [9] LONG D G, SPENCER M W, TSAI Wu-Yang. 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(3): 567–581.
- [10] 张振华, 宋诗艳, 胡继军, 等. 机载波谱仪的波浪参数反演研究[J]. 空间电子技术, 2012(3): 28–34.
ZHANG Zhenhua, SONG Shiyang, Hu Jijun, et al. Research on wave parameter retrieval from airborne wave spectrometer[J]. Space Electronic Technology, 2012(3): 28–34.
- [11] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 2.
- [12] J GEOPHY RES. Geosat special issue [M]. Mar. 1990.
- [13] 龚燃. “贾森”高度计卫星系列增添新成员[J]. 国际太空, 2016(3): 33–38.
GONG Ran. Jason altimeter satellite series adds a new member[J]. Space International, 2016(3): 33–38.
- [14] 佚名. Jason-3 卫星情况调研[EB/OL]. [2017-04-17]. http://blog.sina.com.cn/s/blog_43f446fb0102x59l.html.
- [15] 张德海, 姜景山, 郑震藩, 等. 神舟4号主载荷—多模态微波遥感器[J]. 遥感技术与应用, 2005, 20(1): 74–80.
ZHANG Dehai, JIANG Jingshan, ZHENG Zhenfan, et al. SZ-4 main payload-multi-mode microwave remote sensor[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2005, 20(1): 74–80.
- [16] 许可, 刘和光, 姜景山. 神舟四号雷达高度计在轨工作模式及实时数据处理[J]. 遥感技术与应用, 2005, 20(1): 162–165.
XU Ke, LIU Huguang, JIANG Jingshan. The operational modes and the real time processing of the SZ-4 radar altimeter[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2005, 20(1): 162–165.
- [17] 许可, 刘和光, 姜景山. HY-2A 卫星雷达高度计设计及其在轨工作结果[J]. 中国工程科学, 2013, 4: 25–32.
XU ke, LIU Huguang, JIANG Jingshan. HY-2A radar altimeter design and in flight results[J]. Strategic Study of CAE, 2013, (7): 25–32.
- [18] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 中法海洋卫星(CFOSAT)已正式在轨交付投入业务应用[EB/OL]. 2020
- [19] 国家卫星海洋应用中心. HY-2A 卫星用户手册[R/OL]. 2012: 5.
- [20] 王小宁, 刘丽霞, 陈文新. 海洋二号卫星微波散射计系统设计与应用[J]. 中国工程科学, 2013, 15(7): 33–38.
WANG Xiaoning, LIU Lixia, CHEN Wenxin. The system design and application of HY-2A scatterometer[J]. Strategic Study of CAE, 2013, 15(7): 33–38.
- [21] 陈劲松, 邵芸, 林晖. Envisat-ASAR 数据的特点及其在多云多雨地区的应用前景[J]. 遥感技术与应用, 2004, 19(6): 517–520.

- CHEN Jindong, SHAO Yun, LIN hui. Characteristics and analysis of application of Envisat-ASAR data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2004, 19(6): 517-520.
- [22] 贾永军, 张有广, 林明森. HY-2 卫星雷达高度计风速反演验证[J]. 中国工程科学, 2014, 16(6): 54-59.
JIA Yongjun, ZHANG Youguang, LIN Mingsen. Verification of HY-2 satellite radar altimeter wind retrieval[J]. Strategic Study of CAE, 2014, 16(6): 54-59.
- [23] 冯帆. 多通道高分辨率宽测绘带星载 SAR 系统研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2012.
- [24] 谢亚楠. 星载高分辨多模式 SAR 的建模仿真和总体设计[J]. 上海航天, 2001, 18(4): 2-6.
XIE Yanan. The simulation and design of high resolution and multimode spaceborne SAR[J]. Aerospace Shanghai, 2001, 18(4): 2-6.
- [25] 姜秀鹏, 常新亚, 姚芳, 等. 合成孔径雷达小型卫星进展[J]. 空间电子技术, 2016, 13(1): 77-82.
JIANG Xiupeng, CHANG Xinya, YAO Fang, et al. Progress of small satellite of synthetic aperture radar[J]. Space Electronic Technology, 2016, 13(1): 77-82.
- [26] 蓝海, 杨玲玲. 同时多波束相控阵天线技术[J]. 信息系统工程, 2014, (5): 135-137.
- [27] 程普, 王展, 方凌江, 等. 调频连续波 SAR 方位多波束成像[J]. 现代电子技术, 2013, 36(3): 12-15.
CHENG Pu, WANG Zhan, FANG Lingjiang, et al. Imaging of FMCW SAR using multiple azimuth beams[J]. Modern Electronics Technique, 2013, 36(3): 12-15.
- [28] 王敏男, 郝书吉, 朱允锋, 等. 一种新型低剖面宽带相控阵单元研究[J]. 电波科学学报, 2010, 25(6): 1130-1134.
WANG Minnan, HAO Shuji, ZHU Yunfeng, et al. Study of a novel wideband phased-array antenna unit[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2010, 25(6): 1130-1134.
- [29] 徐明明, 刘嘉山, 蔺祥宇, 等. 薄膜有源相控阵天线的设计与实现[C]//2017 年全国天线年会论文集(上册). 2017.
- [30] 许兰锋. 多波束小型化 T/R 组件关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学. 2017.
XU Lanfeng. The research of key technologies on miniaturized T/R module with multi-beam[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017.
- [31] 黄萍. 海洋波谱仪海浪探测机理及仿真研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
HUANG Ping. The study on detection mechanism and simulation of ocean wave for ocean wave spectrometer[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.
- [32] LIN C C, ROMEN B, WILSON J J, et al. An analysis of a rotating, range-gated, fan-beam space-borne scatterometer concept[J]. IEEE Trans. Geos. and Remote Sensing, Vol. 38: 2114-2121, 2000.
- [33] 华蕾. 海浪波谱仪海浪谱反演研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
HUA Lei. The study on inversion of ocean wave spectrum for ocean wave spectrometer[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [34] 薛鹏. 多模式相控阵雷达系统中的时序控制与信号处理程序设计[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
- [35] 易锋, 刘春静. 基于斑马图的天基雷达 PRF 设计[J]. 雷达科学与技术, 2015(6): 667-670.
YI Feng, LIU Chunjing. PRF design of space-based radar based on coverage diagram[J]. Radar Science and Technology, 2015(6): 667-670.
- [36] 张双喜. 高分辨宽测绘带多通道 SAR 和动目标成像理论与方法[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
ZHANG Shuangxi. High-resolution and wide-swath multi-channel SAR and moving target imaging theory and methods[D]. Xi'an: Xidian University. 2014.
- [37] 王永良, 彭应宁. 空时自适应信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.

[作者简介]

- 赵启钊 1994 年生, 在读硕士研究生, 主要研究方向为星载合成孔径雷达成像和体制设计。
孙光才 1984 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为合成孔径雷达成像和动目标检测。
李航 1996 年生, 在读博士研究生, 主要研究方向为星载卫星体制设计。
张振华 1977 年生, 高级工程师, 主要研究方向为雷达信号处理、系统设计和应用。
张杰 1963 年生, 研究员, 主要研究方向为海洋遥感技术与应用。