

阎诚,黄耀辉,王丽丽,等.中法海洋卫星的系统设计与技术特点[J].海洋气象学报,2024,44(4):12-21.

YAN Cheng, HUANG Yaohui, WANG Lili, et al. System design and technical characteristics of CFOSAT[J]. Journal of Marine Meteorology, 2024, 44(4): 12-21. DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20240401002. (in Chinese)

## 中法海洋卫星的系统设计与技术特点

阎诚<sup>1</sup>,黄耀辉<sup>1</sup>,王丽丽<sup>1</sup>,Daniele Hauser<sup>2</sup>,Patrick Castillan<sup>3</sup>,Jean-Michel Lachiver<sup>3</sup>,郎姝燕<sup>4,5</sup>

(1.航天东方红卫星有限公司,北京 100094;2.法国大气、介质和空间观测实验室,法国 巴黎 78280;3.法国国家空间研究中心,法国 图卢兹 31401;4.国家卫星海洋应用中心,北京 100081;5.自然资源部空间海洋遥感与应用重点实验室,北京 100081)

**摘要** 中法海洋卫星(China-France Oceanography SATellite, CFOSAT)是中国和法国联合研制的海洋动力探测遥感卫星。它是世界上第一颗具备全球海面波浪谱和海面风场联合同步观测能力的卫星,同时也是中国首次在系统层面与世界先进宇航机构开展全方位、全流程合作的航天工程项目。文中介绍了中法海洋卫星的系统设计和研制历程等内容,展示了中法海洋卫星高度的技术先进性以及鲜明的技术特点,同时回顾了项目国际合作中的主要工作与成就。

**关键词** 中法海洋卫星;SWIM 波谱仪;散射计;海洋遥感;风浪同步联合观测

**中图分类号**: V474;TP722.6 **文献标志码**: A **文章编号**: 2096-3599(2024)04-0012-10

**DOI**: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20240401002

## System design and technical characteristics of CFOSAT

YAN Cheng<sup>1</sup>, HUANG Yaohui<sup>1</sup>, WANG Lili<sup>1</sup>, Daniele Hauser<sup>2</sup>, Patrick Castillan<sup>3</sup>,  
Jean-Michel Lachiver<sup>3</sup>, LANG Shuyan<sup>4,5</sup>

(1. DFH Satellite Co., Ltd., Beijing 100094, China; 2. Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales (LATMOS), Paris 78280, France; 3. Centre National d'Études Spatiales (CNES), Toulouse 31401, France; 4. National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China; 5. Key Laboratory of Space Ocean Remote Sensing and Applications, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China)

**Abstract** The China-France Oceanography SATellite (CFOSAT) is an ocean dynamics remote sensing satellite developed under the international cooperation between China and France. It is the first satellite to provide joint simultaneous and co-located observations of ocean surface wave spectrum and wind field at the global scale. Meanwhile, it is, for the first time, the aerospace engineering cooperation project between China and world-class organization in full scale and full process at system level. In this paper, we introduce the information of CFOSAT such as its system design and development process, exhibit its technical advancement and distinguished technical characteristics, and show the main course and achievement of the international cooperation project.

**Keywords** China-France Oceanography SATellite (CFOSAT); SWIM (Surface Waves Investigation and Monitoring) spectrometer; scatterometer; ocean remote sensing; joint simultaneous observation of wave and wind

收稿日期:2024-04-01;修订日期:2024-07-05

基金项目:国家重点研发计划专项(2021YFC3101502)

第一作者简介:阎诚,男,硕士,高级工程师,主要从事卫星总体设计工作, email:yancheng@163.com。

通信作者简介:郎姝燕,女,硕士,副研究员,主要从事海面风场遥感反演和台风监测工作, langshuyan@mail.nsoas.org.cn。

## 引言

中法海洋卫星(China-France Oceanography SATellite, CFOSAT)是由中国和法国联合研制,用于探测海面波浪谱和海洋风场等海洋动力环境信息的海洋遥感卫星<sup>[1]</sup>,是中国海洋卫星系列的重要组成部分,是世界上第一颗具备海面风浪联合同步观测能力的遥感卫星,同时也是中国第一个在系统层面与世界先进宇航机构开展全方位、全流程合作的卫星项目<sup>[1-2]</sup>。通过该项目,完成了国际上首台星载海浪谱测量仪器的研制工作<sup>[3-6]</sup>;完成了国际上首个采用扇形波束旋转扫描体制散射计的研制工作<sup>[7-11]</sup>;完成了卫星总体设计<sup>[12-14]</sup>,攻克了大功率Ku波段微波载荷在小卫星平台上同时工作的电磁兼容性技术难点,采用全新的“内单外双”准双母线供电系统<sup>[15]</sup>,开创性地采用独一无二的星上固存分区设计理念以满足中法两国特殊的在轨数据传输需求;研发了小入射角海浪方向与高空间分辨率海面风场反演算法,形成海浪谱与海面风场产品体系<sup>[16-18]</sup>;建立了两国联合以及星地一体化业务运行管理机制;最终完成了国际上唯一一颗风浪联合同步观测卫星的设计与验证工作。

## 1 研制历程

2005年,借助中法国际合作平台,中国国家航天局(China National Space Administration, CNSA)与法国国家空间研究中心(Centre National d'Études Spatiales, CNES)联合组织专家论证,提出了共同研制一颗中法海洋卫星的合作建议。2009年4月,中法海洋卫星正式立项启动研制,经历一年的方案设计工作,于2010年5月进入初样研制阶段,2010年9月完成中法联合概要设计评审。2011—2016年,完成电性星、力学星、热控星、辐射模型星的研制与试验,以及卫星系统与地面测控系统、中方地面应用系统和法方地面应用系统的对接试验,2015年11月完成中法联合详细设计评审,2016年7月完成所有鉴定产品的研制工作,于2016年11月进入正样研制阶段。2017年5月,开始进入正样整星总装、集成与测试阶段,先后完成电性能测试、第一次电磁兼容性(electro magnetic compatibility, EMC)试验、力学实验、热试验、磁试验、第二次EMC试验、出厂前

老炼试验及出厂改装工作。卫星于2018年9月14日通过国家国防科技工业局组织的出厂评审,9月16日通过中法联合组织的出厂评审。

2018年9月19日,卫星运抵酒泉卫星发射中心,在经历42天的发射场测试准备工作后,于10月29日08:43由长征二号丙运载火箭成功发射入轨。中法海洋卫星的成功发射引发了巨大关注,入选2018年中国海洋十大新闻、中国航天十大新闻、国防科技工业十大新闻、海洋科技进步十大进展、中国遥感领域十大事件,并先后荣获2019年中国海洋科学技术奖一等奖、2021年度海洋工程科学技术奖一等奖、2023年中国航天科技集团科学技术奖一等奖、2023年北京市科学技术奖二等奖、2024年国防科技进步奖二等奖等荣誉。2019年6月30日,卫星完成在轨测试工作,9月9日通过在轨测试总结评审。2020年2月交付自然资源部,正式投入使用。在轨运行和业务应用表明:中法海洋卫星平台和有效载荷工作稳定,各项功能和性能经在轨测试均符合研制总要求,遥感数据质量良好;海面风场、波浪谱实现了联合同步探测;海面风场产品质量处于世界领先水平<sup>[3]</sup>。

## 2 科学目标

中法海洋卫星的主要科学目标是,通过获取全球海表面波浪谱信息和风场信息,开展海洋动力学研究,进而在海洋天气预报、海洋灾害监测、海洋气候变化研究等方面发挥作用。其独具特色并具有开创性意义的风浪联合观测模式、星载波浪谱观测仪器、扇形波束扫描体制散射计等先进技术,可以填补当前国际天基海洋遥感观测领域的空白,获取的数据可与已有海洋观测数据相互补充与校核,提高海洋气象预报精度与时效,为全球变暖机制的研究提供素材,为减少海洋灾害损失、带动海洋经济发展、推动海洋科学进步做出贡献。其大幅宽、全天时工作的特点,能够有效提高海洋综合调查的工作效率,降低人力物力成本。在服务海洋观测的同时,卫星的探测数据还可以应用于陆地表面土壤湿度与粗糙度调查、南北极冰原冰盖特征提取等,对现有其他类型的卫星遥感数据产品进行有益补充。借助中法海洋卫星项目形成的中国与法国合作平台,可以全面推动中法两国在航天技术与海洋科学等领域的深入合作。

为完成此功能任务,中法海洋卫星配置了一台用于海面波浪谱探测的 SWIM (Surface Waves Investigation and Monitoring) 波谱仪和一台用于海面风场探测的微波散射计 (CFOSAT SCATterometer, CSCAT)。其最终生成的科学数据地面应用产品指标见表 1。

表 1 卫星应用产品指标

Table 1 Specification of satellite application product

产品	参数	指标
海面波谱	海浪空间分辨率	优于 70 km×90 km
	海浪波向精度	优于 15°
	海浪波长精度	优于 15%
	有效波高精度	有效波高的 10% 或 0.5 m (有效波高小于 5.0 m)
	地面分辨率	优于 12.5 km×12.5 km
海面风场	风速测量精度	优于 2 m/s 或风速的 10% (取大值) (4~24 m/s 风速范围内)
	风向精度	优于 20°

### 3 卫星系统设计方案

中法海洋卫星由中法双方联合研制。根据《法国国家空间研究中心和中国国家航天局谅解备忘录》中的相关条款,中法两国具体分工为:中方提供卫星平台和散射计,法方提供波谱仪,中法两国联合研制 X 波段数传分系统。运载火箭、卫星发射和地面测控由中方负责。中法双方均建有 X 波段数传地面接收站,星载科学数据双方共享。

卫星由航天东方红卫星有限公司负责总研制,采用具有成熟在轨飞行经验的 CAST2000 小卫星平台,运行于轨道高度 520.98 km、降交点地方时 07:00 的太阳同步轨道。卫星起飞质量为 652 kg (含 21 kg 燃料),整星最大功耗约为 900 W,设计使用寿命为 3 年。卫星平台主要技术指标见表 2;发射状态构型见图 1,在轨状态构型见图 2。

卫星轨道选择轨道高度 520.98 km 的太阳同步轨道,在该高度上可以满足散射计 3 天覆盖、波谱仪 13 天覆盖的任务要求,并留有足够的相邻条带重叠裕度(在赤道上的相邻条带重叠区域,波谱仪大于 20 km,散射计大于 50 km),可以降低周期性轨道维持的频次,减少载荷因为轨道维持而无法工作的时间,有效提高载荷在轨数据探测效能。选择 07:00 的晨昏轨道降交点地方时,一方面可以采用固定帆板,取消帆板转动机构,简化卫星设计,满足载荷 24 小时工作的大功率需求;另一方面可以与属于同一用户、

降交点地方时为 06:00 的其他卫星错开,既可以降低多颗卫星同时进入同一地面站的冲突概率,也可以拓展不同时段的数据获取能力。由于卫星按照标称轨道倾角入轨后,降交点地方时将向午夜方向漂移,因此采用轨道倾角偏置设计,使卫星入轨后的降交点地方时首先向中午方向漂移,再逐渐转向午夜方向漂移,如此设计可以大幅度降低降交点地方时漂移范围,使卫星在 3 年使用寿命期内能够始终处于相对稳定的光照角度范围,有效延长卫星在轨使用寿命。

表 2 卫星平台主要技术指标

Table 2 Main technical specification of satellite platform

项目	具体参数	指标
轨道	类型	太阳同步圆轨道
	轨道平均高度	520.98 km
	轨道倾角	97.45°
	降交点地方时	07:00
质量	推进剂	21 kg
	发射重量	652 kg
尺寸	卫星本体尺寸	1 451 mm×1 451 mm×1 270 mm
	收拢状态包络尺寸	Φ3 031 mm×3 350 mm
	展开状态跨度	8 898 mm
姿轨控	模式	对地三轴姿态稳定
	姿态控制精度	三轴 0.1° (3σ)
	姿态稳定度	三轴 0.01 (°)/s (3σ)
	姿态测量精度	0.03° (3σ)
测控	体制	USB+GPS
	上行码速率	2 000 bps
	下行码速率	16 384 bps
	GPS 定位精度	50 m
星务	程控指令存储空间	不少于 1 000 条
	数据总线	CAN2.0
供配电	太阳电池阵	三结砷化镓
	太阳电池阵面积	7.548 m <sup>2</sup>
	输出功率	初期:1 548.5 W 末期:1 318.9 W
	蓄电池组	70 Ah

构型与结构方面,整星采用舱板式结构形式,分为平台舱和有效载荷舱两部分,设置 6 个主承力点,所有 18 块结构舱板均采用铝合金面板的铝蜂窝夹层板结构。载荷电子设备置于有效载荷舱中;波谱仪天线重约 180 kg,置于载荷舱顶部,在轨飞行时天线反射面对地;散射计天线置于+Z 下侧板,天线阵面对地。采用直径为 Φ937 mm 的对接环连接卫星和运载火箭。由于卫星采用降交点地方时为 07:00 的太阳同步轨道,太阳光一直从-Y 方向照来,因此采用固定太阳翼的方案,单侧 4 块、两侧共 8 块太阳翼,安装于星体±X 面,发射时收拢,依靠锁紧装置压紧,入轨后展开,展开后的太阳电池片指向-Y 方向。为了便于



地面总装操作并明确中法两国工作项目之间的接口界面,采取如下设计:法方波谱仪的全部设备均装在+Y载荷舱顶板,其中电子设备在舱内侧,波谱仪天线在舱外侧。法方数传通道设备全部放在+Z上侧板,电子设备在舱内侧,数传天线在舱外侧。+Y载荷舱顶板和+Z上侧板在中国生产完成后,运往法国进行法方设备的总装测试,然后再将已安装好法方设备的结构板整体运回中国,参加整星总装测试工作。

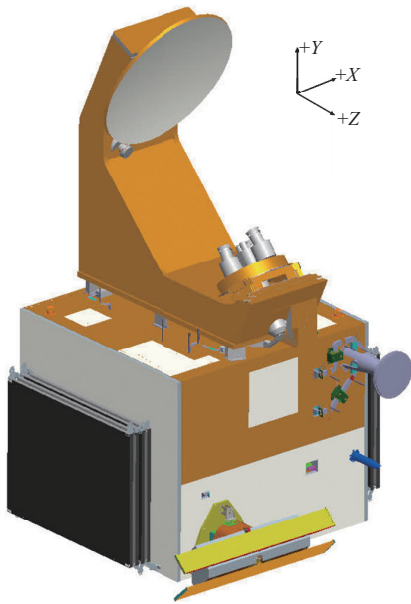


图1 卫星发射状态构型  
Fig.1 Satellite state during launch

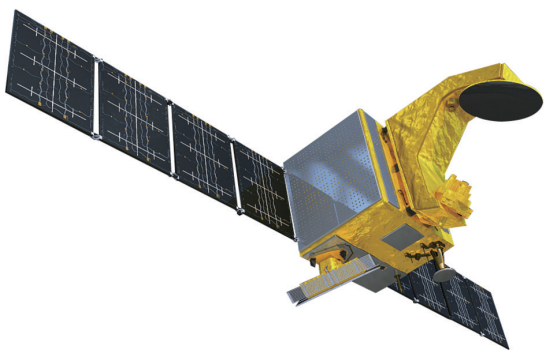


图2 卫星在轨状态构型  
Fig.2 Satellite state in orbit

热控方面,卫星的2个有效载荷均为在轨长期连续工作,其中大部分热耗集中在2台载荷的大功率行放上,因此卫星采用平台舱和有效载荷舱隔热和舱内等温化设计的热控方案,以被动热控为主,以电加热为辅,重点对行放、蓄电池等大热耗设备进行

单独的热设计。另外,考虑到在轨异常情况下载荷关机导致热耗减小、舱内温度降低,在载荷舱设置了大量的补偿加热回路,以在载荷断电的情况下提高舱内设备的温度。

星上信息交换采用控制器局域网(Controller Area Network, CAN)总线通信方式,星务中心计算机作为上位机,其余各设备计算机作为下位机,上、下联合完成整星数据采集、指令和数据传送等工作,共同完成整星各类任务。设置平台CAN总线和载荷CAN总线,以星务中心计算机作为2条总线间进行数据交互的中间站点。卫星利用全球定位系统(global positioning system, GPS)接收机输出的高精度秒脉冲作为整星的时间系统基准,将整星的各种探测设备、姿态、轨道等数据统一在该时间系统中,满足中法海洋卫星有效载荷设备探测时对平台高精度时间的需求。同时,星务中心计算机设计了全面的系统级故障检测、隔离与恢复(fault detection, isolation and recovery, FDIR)方案,对星上关键参数进行实时监测,当发现异常时,可以及时采取故障隔离措施,保护整星安全<sup>[4]</sup>。

测控采用完全成熟的统一S频段(Unified S Band, USB)测控体制辅以GPS定轨模式。星上USB应答机与地面USB测控系统一起,共同完成卫星的跟踪测轨、遥测和遥控任务。利用星上的接收机接收GPS导航星发送的信号,确定卫星的位置、速度和时间信息,并将解算后的轨道数据送星务中心计算机,由星务中心计算机通过CAN总线向全星所有节点进行广播。

姿轨控方面,鉴于星上2种载荷天线均有转动部件,控制系统要能够抵消天线转动所带来的长期偏置角动量,同时综合考虑系统重量、功耗、成熟度、可靠性等因素,卫星采用3个正装动量轮加1个斜装动量轮的三轴稳定对地定向的“零动量”控制方案,利用X、Y、Z三个方向的磁力矩器进行残余角动量卸载。在姿态确定方面,利用陀螺完成卫星在轨姿态机动期间的姿态确定,使用星敏感器获得载荷工作时卫星的精确姿态数据,提高姿态测量精度,并配备红外地球敏感器和数字太阳敏感器作为紧急状态下的姿态确定手段,提高整个控制分系统的可靠性。同时,针对波谱仪0°波束对地表指向的特殊要求,在小卫星平台上首次引入地表指向坐标系与地心指向坐标系的切

换功能,并设计了小角度姿态机动与长期偏置飞行模式,利用在轨探测数据作为标准,校正由于在轨力热变形所带来的波谱仪天线波束电轴指向偏差,使得波谱仪 $0^\circ$ 波束能够精准地垂直指向星下点。

供配电方面,采用大面积( $7.548\text{ m}^2$ )三结砷化镓太阳能电池阵与 $70\text{ Ah}$ 大容量镉镍蓄电池组的组合供电方式,降低放电深度,延长卫星寿命,提高卫星可靠性。由于卫星轨道为晨昏轨道,一年中的一半时间处于全日照,因此在太阳能电池阵上设置涓流充电阵用于补偿蓄电池组在全日照轨道时期的自放电。设备供电采用分散供电方式,一次母线采用 $28.5\text{ V}$ 全调节体制,变化范围为 $(28.5\pm 1)\text{ V}$ 。考虑到2台微波探测载荷均为脉冲工作体制,在轨均为24小时长期工作,其对整星供电母线的反射纹波影响较大,为此卫星首次设计了“内单外双”的准双母线配置。具体做法是:太阳能电池阵充电电流进入电源控制器后,将载荷大功率脉动工作部件的供电母线与平台其他电子设备的供电母线分开,2条母线之间设置了由多只并联电容和滤波电感组成的滤波组件模块,负责平滑载荷母线、减小载荷负载脉动对平台母线的影响,使得卫星各个分系统的设备都能够在稳定、可靠的供电条件下工作,防止载荷的脉动特性对卫星母线品质产生影响,进而影响平台设备安全<sup>[6]</sup>。

#### 4 星上有效载荷

中法海洋卫星有2台用于进行科学观测的有效载荷,即法方研制的雷达波谱仪和中方研制的微波散射计,分别用于海浪谱和海面风场探测。另外,星上配备X波段数传分系统,用于数据存储和传输。

波谱仪由法国CNES研制,是世界上首个全球连续观测波浪谱的星载仪器设备<sup>[7-10]</sup>。波谱仪工作于Ku波段,中心频率为 $13.575\text{ GHz}$ ,是一种真实孔径雷达,其天线包括6个偏置馈源,安装于机械圆锥扫描圆盘上,扫描速率为 $5.7\text{ r/min}$ ,扫描圆盘转轴与星体Z轴形成 $40.18^\circ$ 的夹角。6个波束均采用线性调频脉冲,通过波束切换来实现分时工作,共用1个雷达反射面,反射后形成的波束沿星下点垂线旋转,入射角分别为 $0^\circ$ (天底指向)、 $2^\circ$ 、 $4^\circ$ 、 $6^\circ$ 、 $8^\circ$ 、 $10^\circ$ 。结合卫星在轨飞行和波束旋转扫描,在海面形成1条直线轨迹和5个螺旋线扫描轨迹,每个波束在海面的足印为 $1.5^\circ\sim 1.8^\circ$ ,从而获取不同入射角条件

下、 $360^\circ$ 方位向的海面小角度准镜面散射信息,在 $520\text{ km}$ 的轨道高度上观测刈幅大于 $180\text{ km}$ 。利用上述信息,经过地面反演,可以得到海面波浪的二维方向谱,并进一步获取海浪波长、波高、波向等海洋动力学信息。其基本工作过程(图3)为:射频脉冲信号经过功率放大后,从馈源射出,经天线反射面反射后射向海面;经海面反射的回波信号再次经天线反射面反射后被天线接收,经后处理获得海面后向散射系数;同时,发射机的部分功率在设备内部被送到接收机中,从而实现内部定标功能,以消除信道传输过程中产生的测量误差<sup>[5-8]</sup>。

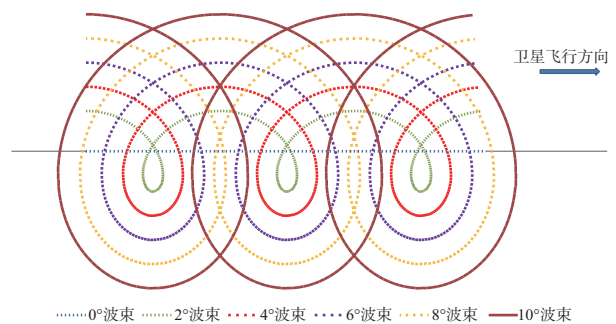


图3 波谱仪工作原理示意图

Fig.3 Fundamental diagram of SWIM spectrometer

波谱仪由能源供应单元(power distribution unit, PDU)、数据处理单元(data processing unit, DPU)、射频单元(radio frequency unit, RFU)、天线单元(antenna unit, AU)组成。同时,为便于集中管理波谱仪设备和中方平台及数传设备之间的接口,设计了专门的接口支架,将所有的功率和信号等电接口接插件全部集中到这台单独的设备上。波谱仪分系统组成如图4所示。

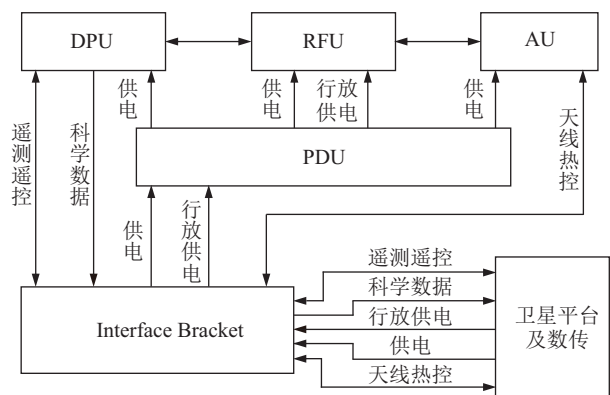


图4 波谱仪组成图

Fig.4 Composition of SWIM spectrometer

波谱仪天线构型如图5所示。卫星发射时,6个馈源所在的旋转圆盘通过锁紧释放装置固定,入轨后解锁释放并开始转动。由于波谱仪需要在法国完成分系统安装与调试,然后运到中国参加整星级测试与试验,因此整个波谱仪分系统的电子设备、波导和天线被设计成全部安装在卫星的+Y载荷舱顶板上,如图6所示,便于调试完成后进行整体运输。

中法海洋卫星所搭载的散射计由中国科学院国家空间科学中心研制,与波谱仪同样工作于Ku波段,中心频率为13.256 GHz。该款散射计是国际上首次使用扇形波束旋转扫描体制的星载散射计<sup>[11-13]</sup>,天线转速为3.4 r/min。散射计的工作过程与波谱仪类似,也是通过接收星上发射的信号经过海面散射形成的回波来反演出海面后向散射系数,同时需要将部分发射功率送入接收机内与回波信号一起进行内部定标。与波谱仪不同的是,散射计波束较宽(20°),入射角较大(26°~46°)、天线无反射面,射频功率信号经过天线阵面直接馈散到空间中。2个天线阵面背对背共同安装在同一个天线支撑组件上,通过旋转关节机构驱动天线转动,其转轴平行于星下点垂线,波束在海面形成的螺旋扫描宽幅条带,

单次采样足印约为 $1.2^{\circ} \times 20^{\circ}$ ,在520 km的轨道高度上观测刈幅大于1 000 km,与波谱仪的探测结果形成有效互补(图7)。

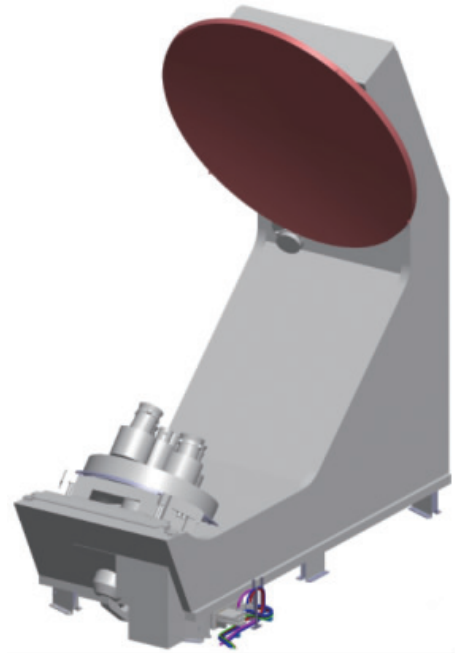


图5 波谱仪天线构型  
Fig.5 Antenna configuration of SWIM

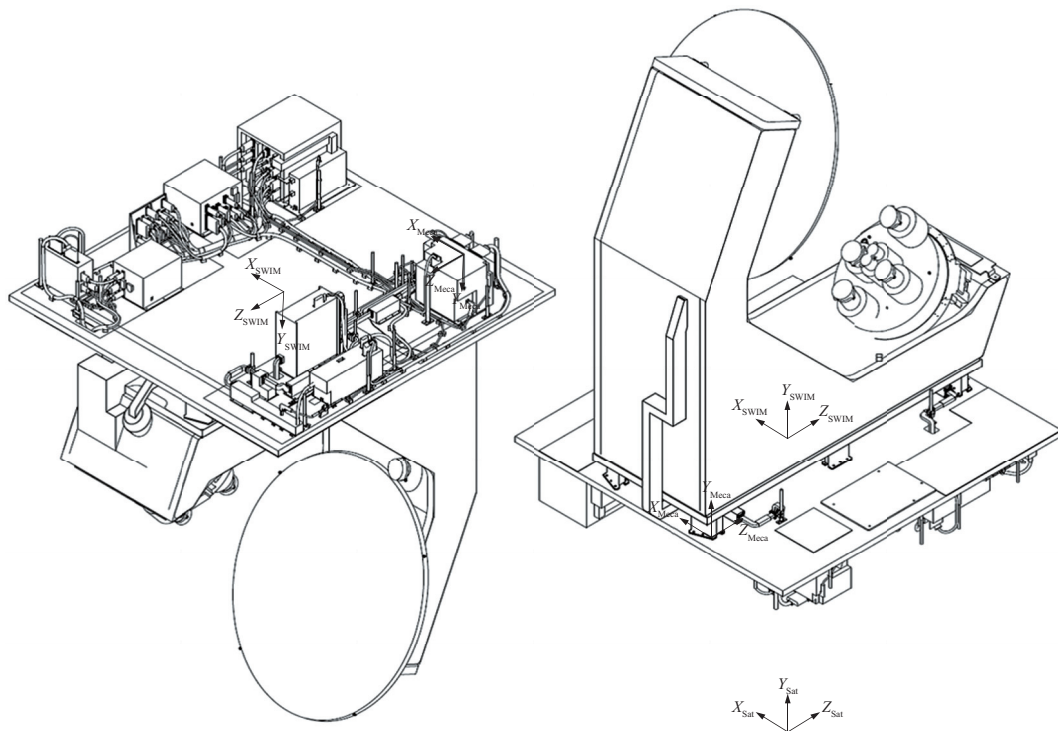


图6 波谱仪分系统构型  
Fig.6 Subsystem configuration of SWIM



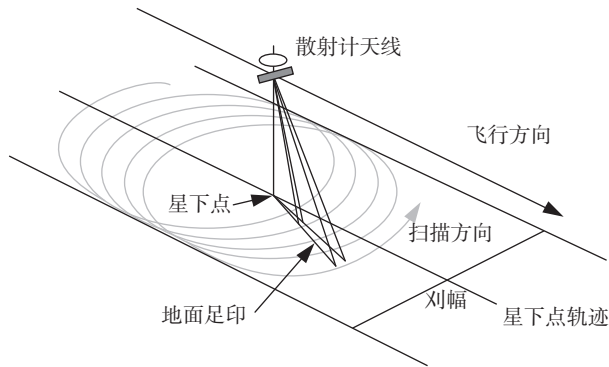


图7 散射计工作原理图  
Fig.7 Fundamental diagram of CSCAT

散射计的分系统架构与波谱仪类似,也是由配电单元、数字单元、射频设备(包括收发单元、微波前端、射频接收机、行波管放大器等)、天线等组成(图8)。从分系统架构及对外接口上,散射计与波谱仪的不同主要表现为:(1)散射计使用主备2台行放,所有射频通道设备均为主备双通道,在轨为冷备份工作,而波谱仪仅使用1台行放,单路射频通道。(2)散射计未设计类似波谱仪一样的单独接口支架,因此与平台及数传间的电接口接插件较为分散。(3)散射计天线与波谱仪天线不同,无主动热控需求,因此与卫星平台间无热控接口。

散射计天线有水平(HH)和垂直(VV)两种极化方式,分别采用2个波导缝隙阵天线来实现。波导缝隙阵天线由辐射波导、馈电波导等组成,连接到双通道旋转关节,实现对地圆周扫描,并要求旋转关节电压驻波比和插损在 $360^\circ$ 转动范围内波动要小。同时,由于采用扇形波束体制的散射计波束宽度( $20^\circ$ )较宽,导致天线波束近点与远点的雷达作用距离差别较大,因此为了保证远端回波信号功率,对天线进行波束赋形设计。卫星发射时,扫描机构通过锁紧释放装置固定,入轨后解锁释放并开始转动。天线与扫描机构组件构型如图9所示,2个波导缝隙阵天线如图10所示。

X波段数传分系统由中法两国联合研制,采用集成化设计,实现遥感信息的编码、存储、调制与发射。中方负责研制数传基带系统(数传控制单元、数据处理器、固存、调制器等),法方负责研制数传通道部分(数传行放、波导、天线等)。采用低电压差分信号(low-voltage differential signaling, LVDS)总线接收波谱仪与散射计获取的科学观测数据,在星

上完成存储和四相移相键控(quadrature phase-shift keying, QPSK)编码后,在卫星飞经地面数传站时进行数据回放,回放结束后擦除星上存储数据并重新开始记录。中法双方均可通过各自的数传地面站接收卫星在轨科学数据,并对接收到的数据各自独立进行解调、去格式、反演及应用。

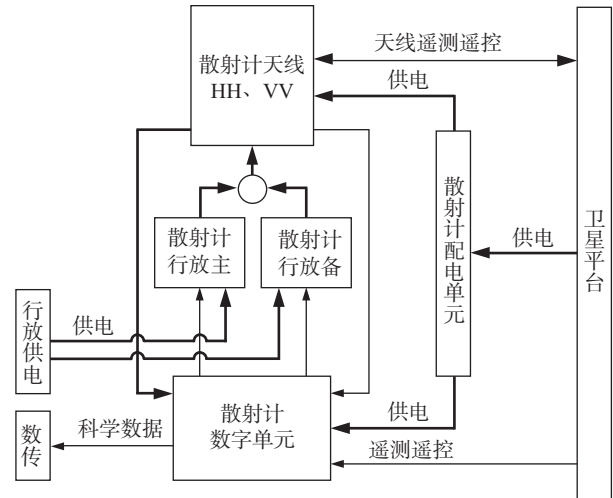


图8 散射计组成  
Fig.8 Composition of CSCAT

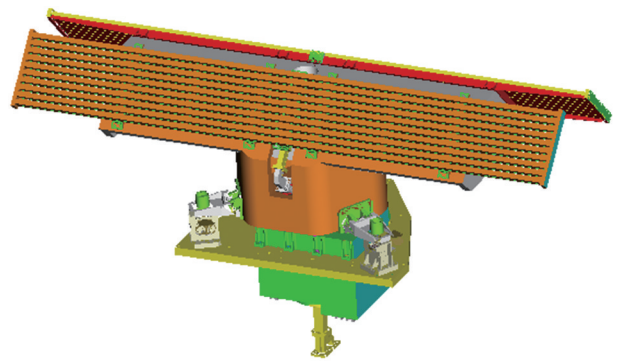


图9 散射计天线组件构型  
Fig.9 Antenna module configuration of CSCAT

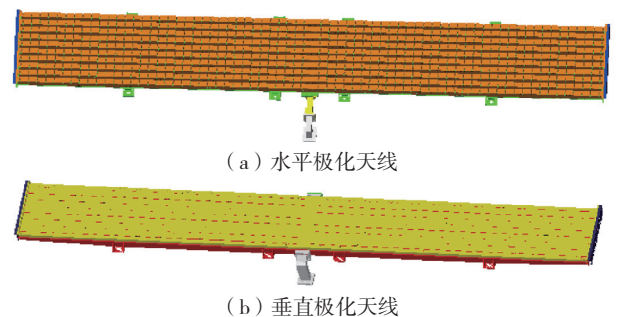


图10 散射计天线  
Fig.10 HH antenna and VV antenna of CSCAT

波谱仪、散射计和数传的具体参数及技术指标如表3所示。

表3 波谱仪、散射计和数传主要技术指标  
Table 3 Main technical specification of SWIM, CSCAT and data transmission service

项目	具体参数	指标
波谱仪	工作频率	13.575 GHz
	天线入射角	0°、2°、4°、6°、8°、10°
	带宽	320 MHz
	极化方式	HH
	行发射功率	120 W
	后向散射系数 测量精度	优于 0.5 dB
散射计	天线转速	5.7 r/min
	天线增益	39 dB
	工作频率	13.256 GHz
	天线入射角	26°~46°
	带宽	0.5 MHz
	极化方式	HH、VV
数传	行发射功率	120 W
	后向散射系数 测量精度	优于 0.5 dB(风速 6~24 m/s) 优于 1.0 dB(风速 4~6 m/s)
	天线转速	3.4 r/min
	天线增益	俯仰向远端增益: ≥28 dBi@ 46° 俯仰向近端增益: ≥23 dBi@ 26°
	频点	8 356 MHz
	码速率	60 Mbps
数传	发射功率	35 W
	天线增益	优于 1.5 dB(离轴角±67.2°)
	调制方式	QPSK
	存储容量	2×(96+96) Gbits

## 5 中法海洋卫星主要技术创新点

中法海洋卫星从概念提出到最终发射成功,历时13年,解决了大量技术难题,完成了许多开创性工作,主要有以下技术创新点。

(1)中法海洋卫星是国际上首颗联合同步观测海洋波浪谱和海面风场的遥感卫星。星上搭载的2台主动微波载荷均为真实孔径雷达,可24小时连续不停地在全球范围内获取海面波谱和风场信息。散射计观测刈幅大于1 000 km,在3天内即可基本实现全球覆盖;波谱仪观测刈幅大于180 km,在13天内可基本实现全球覆盖。两者的波束入射角一大一小,观测范围互不重叠,互为补充。基于同步观测结果,可以获取不同尺度条件下的海浪及海风信息,为验证波浪谱建模准确性、推进海浪时空变化研究创造更好的条件。通过风浪联合观测,还可以利用数据融合技术来优化风浪数据的时空分布精度,丰富、完善和细化海浪模型,提高海浪数据同化效果。

(2)搭载世界上第一台在轨飞行的星载海浪谱测量仪器。观察海浪的形态,研究海浪的特征,对于探索海洋具有重要意义。目前对海浪谱进行观测的主要手段为浮标、高度计和合成孔径雷达。而从20世纪80年代开始提出概念,并经过长期理论研究和开发的星载波谱仪,在海浪探测方面具有显著优势:第一,浮标一般仅投放于近海,海浪观测范围受限,无法进行全球范围远海大尺度大面积观测。而星载波谱仪不受地域限制,可以完成全球海域海浪信息采集。第二,高度计仅能探测海浪波高,无法获取波长、波向等更多信息。第三,合成孔径雷达对海浪反演在非线性和非线性方面有一定限制。且从工程实现的角度来看,其功耗高、数据量大的特点,不适于在轨长时间开机成像;而利用真实孔径雷达原理的星载波谱仪具有数据量小(仅有约2 Mbps)、体积功耗低的突出优点,非常适合搭载在卫星上,进行连续不间断地海浪观测。第四,与机载波谱仪相比,星载波谱仪不受飞机滞空时间和离岸距离的限制,且由于观测高度更高,因此刈幅更大,观测范围更广。

波谱仪的工作原理要求其同时发射和接收星下点波束和小角度(一般要求小于15°)斜视波束。星下点波束与雷达高度计类似,用来获取海表面波高和风速信息;小角度斜视波束获取准镜面散射下的海面后向散射系数。波浪在海面产生的倾斜会对海面后向散射系数造成影响,通过对其观测,结合星下点波束获取的波高信息,可以反演出波浪谱,并进一步得到波向和波长等信息。这正是中法海洋卫星所搭载的波谱仪的创新点所在。

(3)搭载世界上第一台采用扇形旋转扫描体制的散射计。散射计的工作原理是测量风生毛细波对厘米级波长的微波所产生的布拉格散射效应,再经过数据反演得到海面风场信息,包括风速、风向等。从20世纪70年代开始,国际已有多台散射计在不同卫星上完成在轨飞行应用,取得了良好的观测效果。中法海洋卫星散射计首次采用扇形旋转扫描体制,配合全新研制的双极化赋形波导缝隙阵天线。相比于传统笔形波束散射计,其具有如下优点:第一,扇形波束宽度(20°)较大,因此可以在同一时间获取海面更多入射角的后向散射系数独立观测样本。第二,可以同时获得俯仰向和方位向后向散射系数的观测样本,便于获取高相干测量数据,提高海



面风场反演精度。第三,由于扇形波束较宽,因此散射计天线可以采用较低的旋转扫描速度来获取相同的数据样本数。降低天线转速可以减少转动角动量以及转速不稳定所带来的姿态扰动,进而降低对卫星平台承载能力和姿态控制能力的影响,对于卫星总体设计实现小型化、轻量化等工程目标具有重要意义,并可大幅降低卫星研制成本和火箭发射成本。第四,通过降低天线转速,还可以在方位向数据采集方面获得更多冗余,有利于提高反演产品的空间分辨率。

由实际在轨飞行的结果来看,中法海洋卫星的扇形波束扫描体制散射计在轨表现优异,风速、风向等测量结果均满足设计要求,与其他卫星同类产品相比,性能相当或更强;风场空间分辨率提高至  $12.5\text{ km}\times 12.5\text{ km}$ ,达到世界领先水平。

(4)首次实现2台Ku波段大功率主动微波载荷在小卫星平台上同时工作。中法海洋卫星的波谱仪和散射计均工作在Ku波段,其中心频率间隔仅有319 MHz,频率带宽边缘间隔仅有159 MHz,在轨均为24小时连续观测,各自的射频发射功率均高达120 W,接收设备灵敏度高,其同时工作的模式对卫星的工程研制水平提出了很高要求。同时,中法海洋卫星采用CAST2000小卫星公用平台,星体较小(仅有 $1.4\text{ m}\times 1.4\text{ m}\times 1.3\text{ m}$ ),2副舱外载荷天线馈源的距离仅为1.5 m左右。在如此狭小有限的空间内,2台大功率微波设备同时工作,频率非常接近,电磁环境复杂,容易造成一台设备的回波信号误入另一台设备的接收通道,从而产生误码,影响设备的正常工作。因此,避免2台设备的相互电磁干扰,加强电磁兼容性,是卫星总体设计和载荷射频设计的重要内容。而为了满足电磁兼容性试验的准确性和可靠性,还需要保证对射频信号的精确测量。

为解决电磁兼容性难题,中法海洋卫星联合研制团队在波谱仪和散射计各自的射频通道中针对性地设计滤波器进行隔离,并提出基于时域波门控制的墙体反射信号抑制方法,以提升2台载荷同时工作时的天线隔离度测量精度,准确获取误接收干扰信号的电平特性。同时,从方案阶段开始,便将整星电磁兼容分析、设计、隔离与试验作为设计与验证的重点,从平台外形、设备布局、电缆走向、各类天线间的位置与距离及射频设备研制等方面开展工作,通

过合理布局并采取必要的结构设计和材料设计等措施增大天线隔离度,以提高系统的抗干扰能力,并在初样阶段利用辐射模型星进行试验验证,正样阶段在微波暗室内进行了2次整星级全状态EMC试验(图11)。由EMC试验结果以及在轨表现来看,中法海洋卫星完全实现了预期的电磁兼容性设计目标,满足2台大功率Ku波段微波载荷的使用需求。

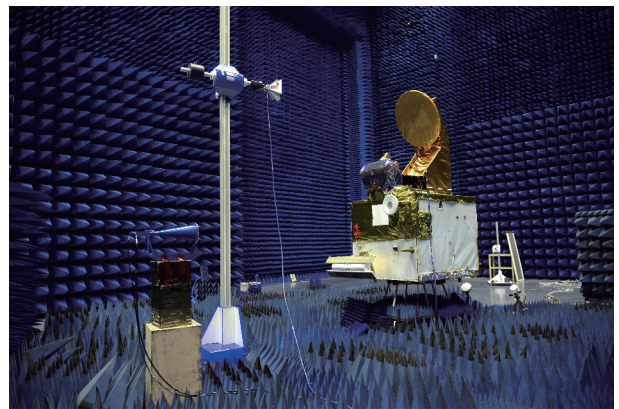


图11 2017年12月EMC试验  
Fig.11 EMC test in December 2017

(5)首次采用星上固存分区、分时回放的方式,载荷数据分别进行存储与下传。中法海洋卫星在轨探测的科学数据由中法双方用户共享,需要在中法两国地面站分别进行回放。为了保证中法双方地面站均具有独立完整下传在轨科学数据的能力,中法海洋卫星开创性地对星上固存进行分区设计,固存一区 and 固存二区分别供法方和中方使用,这是中法海洋卫星不同于其他卫星的独有特点。星上科学数据在地面站以外区域时,同时进入固存一区 and 固存二区存储记录;当卫星经过法方地面站时,回放固存一区数据,回放完成后擦除固存一区并重新开始记录,在此期间固存二区一直维持在纪录状态;当卫星经过中方地面站时,则回放固存二区数据,回放完成后擦除固存二区并重新开始记录,在此期间固存一区一直维持在记录状态。2个固存分区的工作互相独立,互不影响,充分满足了中法双方对载荷数据分别进行存储与下传的需求。同时,2个分区中的固存数据形成相互备份的关系,如果中法两国某一方的数据接收出现问题时,可以迅速通过地面网络系统从另一方获取丢失的数据,保证了科学数据的完整性和连续性。

## 6 结语

作为中国海洋卫星系列的重要组成部分,也是中法科技合作的重要项目,中法海洋卫星首次实现了海面风浪联合同步观测。中法联合研制团队针对任务特殊的技术要求以及全新的国际合作研制模式,进行了一系列针对性的优化设计和管理创新,最终圆满完成了研制任务。卫星在轨表现优异,获取的全球海面风场、海浪谱产品在台风、飓风、海浪、南北极海冰监测示范应用中效果明显,已投入业务应用。

中法海洋卫星的成功研制,使中国获得了一颗高性能的海洋遥感卫星,填补了海洋遥感全球尺度风浪联合观测领域的空白,是中国积极参与应对全球气候变化的重要里程碑,充分体现了中国对联合国《巴黎协定》的积极响应,有助于提升中国的国际政治地位,塑造一个有担当、负责任的大国形象。此外,通过卫星的研制,还成功突破了多项分系统级和系统级关键技术,拓展了 CAST2000 小卫星平台的应用领域;通过与世界先进宇航机构在系统层面的全面合作,大大开阔了眼界,全方位深入了解了对方在航天工程管理、技术研发、质量控制、海洋技术应用等方面的运作机制与优势特点,为中国宇航技术和应用赶超世界先进国家、开拓国际卫星市场打下了坚实基础,积累了宝贵经验。

### 参考文献:

- [1] HAUSER D, DONG X L, AOUF L, et al. Overview of the CFOSAT mission [C]//2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Beijing, China:IEEE,2016:5789-5792.
- [2] HAUSER D, TOURAIN C, LACHIVER J M. CFOSAT: a new mission in orbit to observe simultaneously wind and waves at the ocean surface[J]. Space Res Today,2019,206:15-21.
- [3] XU Y, LIU J Q, XIE L L, et al. China-France Oceanography Satellite (CFOSAT) simultaneously observes the typhoon-induced wind and wave fields[J]. Acta Oceanol Sin,2019,38(11):158-161.
- [4] 阎诚,黄耀辉,王丽丽.中法海洋卫星总体设计技术难点与解决措施[J].航天器工程,2020,29(5):1-10.
- [5] 韩浪,王韶波,陈娟,等.中法海洋卫星有效载荷系统级故障检测隔离与恢复实现方法研究[J].计算机测量与控制,2017,25(11):193-196,200.
- [6] 赵海峰,徐伟,乔学荣,等.中法海洋卫星电源分系统设计与在轨应用[J].电源技术,2022,46(9):1053-1056.
- [7] HAUSER D, TISON C, AMIOT T, et al. SWIM: the first spaceborne wave scatterometer[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens,2017,55(5):3000-3014.
- [8] 林文明,董晓龙.星载雷达波谱仪反演海浪谱的精度研究[J].海洋学报,2010,32(5):9-16.
- [9] 林文明,董晓龙,周玉驰.星载真实孔径雷达波谱仪的海浪谱反演仿真[J].电子学报,2010,38(12):2867-2874.
- [10] 鲍青柳,董晓龙,林文明,等.雷达波谱仪信号仿真及海面各向异性的修正[J].电子与信息学报,2014,36(10):2497-2503.
- [11] LIN W M, DONG X L, PORTABELLA M, et al. A perspective on the performance of the CFOSAT rotating fan-beam scatterometer[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens,2019,57(2):627-639.
- [12] 王刚,董晓龙,朱迪.基于星载旋转扫描雷达的高分辨率实现[J].遥感技术与应用,2017,32(6):1071-1077.
- [13] 郎姝燕,林文明.星载微波散射计两种体制的比较[J].海洋技术学报,2017,36(1):19-23.
- [14] 董晓龙,朱迪,林文明,等.中法海洋卫星微波散射计在轨性能验证[J].空间科学学报,2020,40(3):425-431.
- [15] 林文明,郎姝燕,赵晓康,等.中法海洋卫星散射计近海岸海面风场反演研究[J].海洋学报,2021,43(10):115-123.
- [16] 郎姝燕,孙从容,鲁云飞,等.中法海洋卫星微波散射计近海岸产品在台风遥感监测中的应用[J].海洋气象学报,2022,42(2):74-80.
- [17] 朱爱军,胡秀清,林曼筠,等.风云三号D气象卫星全球数据获取方法及数据分发[J].海洋气象学报,2018,38(3):1-10.
- [18] 周冠博,董林,王海平,等.2020年西北太平洋和南海台风活动概述[J].海洋气象学报,2021,41(1):1-10.