

海洋二号卫星微波辐射计系统设计

李延明,姜敏,余锐,陈文新

(中国空间技术研究院西安分院,西安 710000)

[摘要] 海洋二号(HY-2A)卫星是我国首颗海洋动力环境卫星,微波辐射计是该星的4个微波载荷之一,主要用于测量全球海洋表面温度、海面风速、海洋上空水汽和降雨等参数。HY-2A微波辐射计采用圆锥扫描方式,使用冷空反射器和星载热定标源完成在轨两点定标,覆盖频率范围为6~37 GHz,本文对系统、天线、接收通道和配平设计进行了介绍。

[关键词] 微波辐射计;系统设计;天线;微波通道

[中图分类号] V443+.5 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)07-0039-05

1 前言

海洋二号(HY-2A)卫星为国内首颗海洋动力环境卫星,卫星上装载的微波辐射计是我国第一个采用外转子和冷空反射天线设计的辐射计系统,采用的直接微波检波技术也是第一次在轨应用。系统设计中主要考虑的是天线、通道、扫描驱动和数字处理之间的关系,解决了其中的关键问题,卫星于2011年8月16日成功发射。HY-2A卫星微波辐射计得成功研制和发射,为我国后续的星载微波辐射计的设计和应用积累了经验。

2 系统设计

微波辐射计具有一个1 m的偏置抛物面反射器,两个馈源喇叭,在轨以16.67 r/min转速进行圆锥扫描,波束地面入射角 47.8° 。在卫星飞行方向 $\pm 70^\circ$ 范围内观测地球,形成1 600 km的地面条带,保证每天观测地球的90%。HY-2A卫星微波辐射计使用冷空反射器和星载热定标源定标,冷空反射器反射宇宙背景辐射,星载热源温度稳定在大约290 K。由于在轨处理降低了随机噪声,可以收集到数量充足的定标数据。整个仪器功耗约67 W,重量81 kg,主要的性能参数和指标见表1,原理框图见图1。

表1 HY-2A卫星微波辐射计分系统主要参数要求

Table 1 Main specifications of HY-2A radiometer

参数	性能指标				
中心频率/GHz	6.6	10.7	18.7	23.8	37
带宽/MHz	350	100	200	400	1 000
极化	VH	VH	VH	V	VH
测温灵敏度	0.5	0.6	0.5	0.5	0.8
波束宽度/ $^\circ$	3.1	2.1	1.1	0.9	0.66
主波束效率	> 90%				
动态范围/K	2.7~350				
入射角/ $^\circ$	53				
扫描刈副/km	1 600				
量化位数/bits	16				

HY-2A卫星微波辐射计包含4个装星单机,分别是探测头部、控制器、驱动器和温度采集器。探测头部包含高频箱、主反射器、定标组件(冷空反射器和热源)及扫描机构。所有接收机、天线馈电组件、数据采集器和配电器全部集成在八角形的高频箱内。探测头部安装在卫星上表面前端,冷空反射器波束指向方位角 150° ,俯仰角 80° 。高精度的配平在地面完成配平,基于高精度的配平和高稳定的扫描速度专用的动量补偿装置没有使用,正常扫描状态下,卫星姿态几乎不受影响。

[收稿日期] 2013-04-22

[作者简介] 李延明(1977—),男,内蒙古通辽市人,高级工程师,主要研究方向为星载微波遥感;E-mail:liy_m_cast@126.com

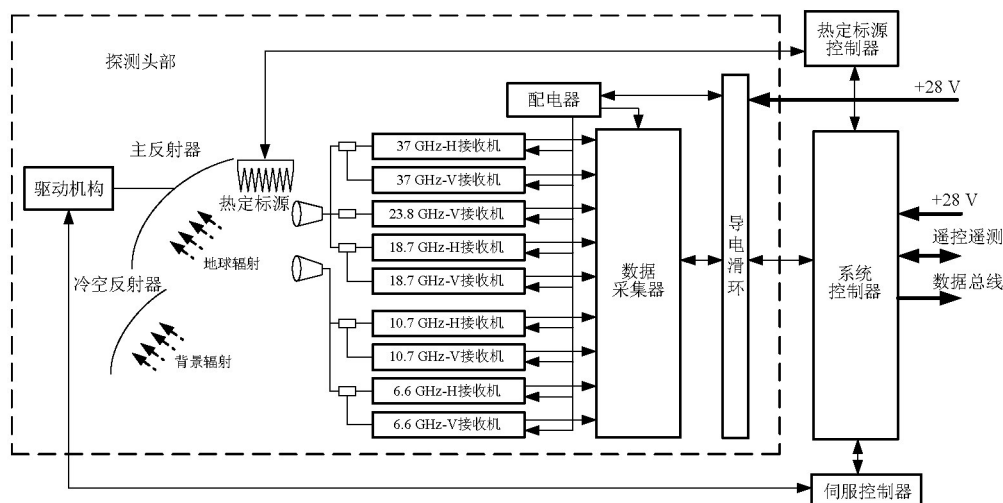


图1 HY-2A 卫星微波辐射计原理框图

Fig.1 Instrument configuration of HY-2A radiometer

3 天线设计

3.1 天线波束效率

作为一种被动式定量微波遥感器,天线的作用是接收来自地面的微波辐射能量,天线通过设计好的入射角和极化方式对这种能量进行接收。实际应用中希望接收的能量尽可能来自天线瞬时视场,做到尽量真实地描述该区域的辐射特性,由此得出了主波束效率的概念,也就是说微波辐射计天线设计的主旨是尽可能接收来自天线主瓣范围内的能量,尽量降低接收旁瓣能量,主波束效率的定义见公式(1)。

$$\eta_m = \frac{\int_{2.5 \times 3 \text{ dB}}^{\text{main}} F_n(\theta, \varphi) d\theta d\varphi}{\int_{4\pi}^{\text{main}} F_n(\theta, \varphi) d\theta d\varphi + \int_{4\pi}^{\text{cross}} F_n(\theta, \varphi) d\theta d\varphi} \quad (1)$$

不同的极化对应不同的信息,不同极化之间应该尽量做到隔离,因此交叉极化的因素在主波束效率中也应该得到考虑。

由于微波辐射计的应用特点,一般的微波辐射计系统都是多频共用的,多为不同的馈源喇叭共用一个反射器和一个冷空反射器,此时不同的边缘照射电平和冷空反射器在不同方位角的遮挡效应,天线方向图差异较大,天线仿真和测试过程中应该考虑整个 4π 立体角范围内,并且考虑不同的方位角的天线方向图的仿真和测试,特别要注意天线背瓣,如果不进行全面测试则容易被忽略^[1]。

3.2 冷空天线

微波辐射计系统通常采用冷空背景作为在轨定标的低端场景,实际应用采用不同焦距的两幅反射器实现,当馈源喇叭扫描进入到焦距较短的冷空反射器覆盖区域后形成冷空照射波束,如图2所示,此时主反射器正好位于冷空反射器背面,由于漏射和边缘绕射的原因,馈源辐射的能量没有被冷空反射器完全拦截,照射到主反射器上,方向图叠加在冷空反射器辐射方向图上,形成了寄生辐射。由于主反射器电轴指向地球,形成冷空定标天线的对地旁瓣,从而影响冷空定标的精度。

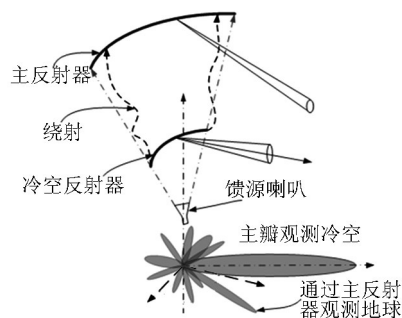


图2 冷空定标天线对地旁瓣

Fig.2 Cold sky reflector pattern

冷空定标天线接收到的来自地球的亮温温度 T_{AE} 由公式(2)给定:

$$T_{AE} = \frac{\iint_{AE} T_{sp}(\theta, \varphi) F_n(\theta, \varphi) d\Omega}{\iint_{4\pi} F_n(\theta, \varphi) d\Omega} \quad (2)$$

式(2)中, $F_n(\theta, \varphi)$ 为归一化的天线方向图, $T_{ap}(\theta, \varphi)$ 为地球的亮温分布。地球地貌复杂多变, 亮温的变化十分复杂, 并且与不同天气状况直接相关, 通过公式(2)修正地球对冷空观测的影响是十分复杂的, 并且精度难以提高。实际设计中, 尽量降低冷空天线的地球旁瓣至关重要, HY-2A 卫星微波辐射计设计中笔者等针对频率最低的 6.6 GHz 频率开展工作, 仿真设计中考虑主反射器的影响, 仿真模型见图 3。

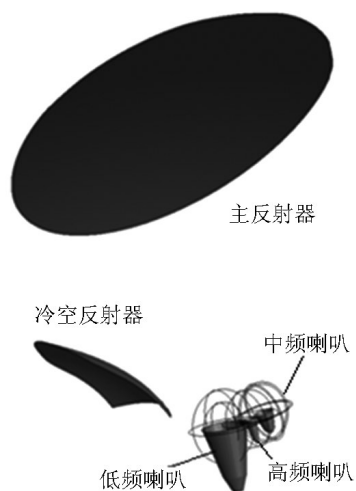


图3 微波辐射计天线仿真模型
Fig.3 Simulation model of antenna

通过设计, 6.6 GHz 冷空天线指向地球的旁瓣电平控制在 -20 dB 以下, 通过计算对冷空观测亮温的影响可控制在 0.5 K, 这种情况下, 在轨修正中通过简单的模型再对亮温进行修正, 其结果即达到设计目的, 二维方向图见图 4。

4 接收机设计

HY-2A 卫星微波辐射计均采用直接微波检波的接收机, 这种接收机具有功耗小、体积小和电磁设计简单的特点。这种接收机的设计难点在于保证线性度, 由于辐射计覆盖频率范围广, 因此使用的微波检波器覆盖范围广, 随着频率的提高, 检波器的检波灵敏度下降, 线性区间内信号输出变化小, 增加了设计难度; 另一方面由于接收机所有的增益均在射频链上, 因此射频放大链路的稳定性至关重要, 这样才能保证进入到检波器的信号电平始终处于线性区间。

微波通道的增益稳定性与环境温度直接相关, 对于好的低噪声放大器, 其增益稳定度一般不会低

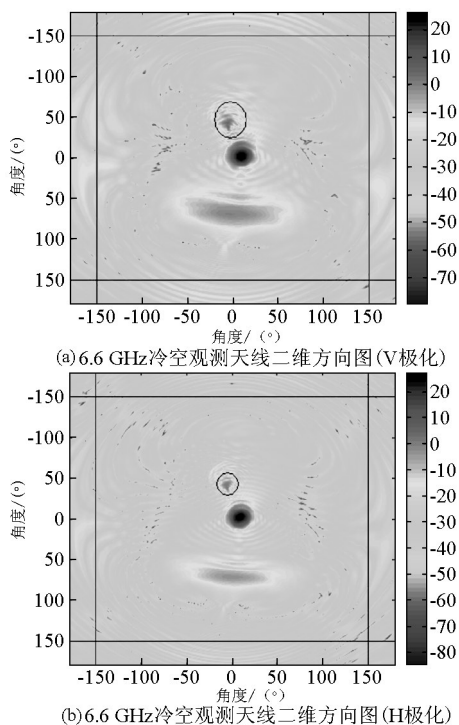


图4 6.6 GHz冷空观测天线二维方向图
Fig.4 2-D pattern of 6.6 GHz cold reflector

于 0.05 dB/°C, 对于微波辐射计系统来说, 链路增益一般在 60 dB 左右, 需要 3 级放大器才能实现, 因此最恶劣的增益波动不会超过 0.15 dB/°C。

HY-2A 卫星微波辐射计工作温度范围定义为 $-10 \sim 45$ °C, 对一般太阳同步轨道卫星, 假设每个轨道圈内接收机的温度变化不超 ± 10 °C, 温度变化速率不超过 2 °C/min, 这种情况下, 可以保证 700 ms 时间范围内增益变化率不超过 $1.33E-4$, 完全满足测温灵敏度的需求, 但是另一方面功率电平变化则超过 3 dB, 一般来说已经接近检波器线性区间的边缘。

这种结果是建立在比较理想的情况下, 也就是说在轨的温度预测是准确的, 但是实际情况是可能出现任何一个温度点上, 如果按照 $-10 \sim 45$ °C 的温度范围, 则可能的检波前功率电平变化超出 8.25 dB, 一般的微波检波器不可能有如此大的线性区间, 因此必要的温度补偿措施是需要的。

设计中采用了压控衰减器进行温度补偿, 通过地面的温度试验调节压控电路参数实现温度补偿功能, 通过试验能够做到在 $-10 \sim 45$ °C 的温度范围内增益变化不超过 2 dB, 真空定标过程中, 在 -10 °C、 5 °C、 20 °C 和 35 °C 这 4 个温度点进行了线性度测试, 测试结果见图 5, 可见在不同的温度点

上,接收机的非线性情况基本一致,对于在轨出现的任何温度都可选用比较好的地面定标结果进行标定,达到了设计目的。

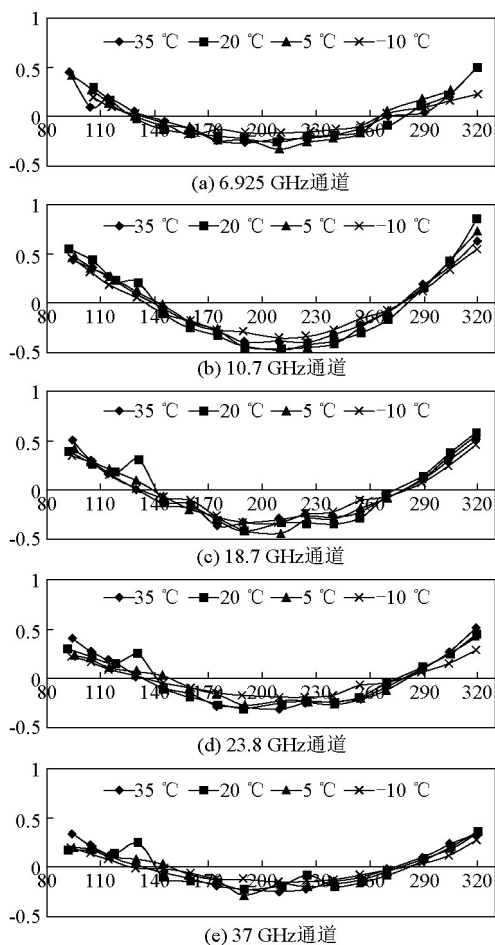


图5 接收机非线性结果

Fig.5 Nonlinearity of receiver

5 配平设计

微波辐射计在轨采取圆锥扫描的扫描方式,大部分的电子设备都安装在扫描部分,扫描部分的体积和惯量很大,微波辐射计在轨扫描时,不平衡惯性力将作用在卫星上,所产生的这些惯性力和惯性力矩的大小与方向呈周期性变化,所以这必将引起星线系统的强迫振动,另外一方面不平衡惯性力和

惯性力矩会造成平台偏离轨道,造成卫星平台姿态的不稳定^[2]。

微波辐射计平衡问题可以分为静平衡和动平衡两种。静平衡配平的目的是微波辐射计惯性力的合力为零,动平衡配平的目的是使其惯性力矩也达到平衡。当微波辐射计达到动平衡状态时,其惯性力的合力为零,并且惯性力矩的合力矩也为零。

对于微波辐射计来说其转动部分质量超过60 kg,转动惯量超过7 kg·m²,并且外形不规则,这种情况下达到平衡是非常困难的。为达到设计目的,布局阶段就对内部的仪器、结构和反射器等的质量分布进行设计,设计阶段保证其力矩残余较小,在配平阶段采用较少的配平质量即可达到平衡状态。

HY-2A卫星微波辐射计通过静平衡机和动平衡机完成了配平工作,配平首先进行静平衡配平,完成后再进行动平衡配平。其中动平衡配平时采用工件转动的方法进行,即微波辐射计自身进行扫描转动,通过动平衡机测量其残余力矩后进行补偿。值得注意的是,地面状态区别于在轨的真空状态,地面由于大气压力造成的残余误差远远大于指标的要求,因此地面进行动平衡配平时必须考虑消除大气影响。HY-2A微波辐射计经过配平之后,达到了设计目的,其中静平衡残余小于200 g·cm,动平衡残余小于2 000 g·cm²,在轨开机之后对卫星姿态几乎没有影响。

6 结语

HY-2A微波辐射计系统设计过程中最为关键的有天线、接收通道和配平等问题,HY-2A卫星发射之后,通过在轨测试表明,这些问题均得到解决,达到了设计目的。

参考文献

- [1] 乌拉比 FT, 穆尔 RK, 冯健超. 微波遥感[M]. 侯世昌等,译.北京:科学出版社,1988.
- [2] 王汉英,张再实,徐锡林. 转子平衡技术与平衡机[M]. 北京:机械工业出版社,1988.

System design of microwave radiometer of HY-2A satellite

Li Yanming, Jiang Min, Yu Rui, Chen Wenxin

(China Academy of Space Technology(Xi'an), Xi'an 710000, China)

[Abstract] HY-2A satellite is China's first ocean dynamic environment satellite. The microwave radiometer is one of the four microwave payloads of the satellite, which is mainly used for measuring parameters including sea surface temperature, wind speed, water vapor and liquid water etc. The microwave radiometer is a conical scanning radiometer, real time calibration with cold sky and warm load on board, cover frequency from 6 GHz to 37 GHz. This paper introduced the design of instrument including system design, antenna design, receiver design and balance design etc.

[Key words] microwave radiometer; system design; antenna; microwave receiver

(上接24页)

The technology of precise orbit determination for HY-2A satellite

Jiang Xingwei, Wang Xiaohui, Peng Hailong, Lin Mingsen

(National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China)

[Abstract] The HY-2A satellite, launched on October 16, 2011 is the first dynamic environments satellite in China, carrying the radar altimeter which continues the time series of centimeter lever ocean topography measurement. Orbit error is a major component in the overall error budge of all altimeter satellite missions. The HY-2A satellite carries DORIS deceiver, Dual frequency GPS receiver and Laser Retroreflector Array for Precise orbit determination (POD) to meet 10cm radial accuracy goal for the HY-2A satellite radar altimeter. First, the tracking system and method of POD for HY-2A satellite is introduced, then the solution strategy is showed, finally the results of the radial accuracy for HY-2A satellite are given in this paper.

[Key words] precise orbit determination; GPS; DORIS; SLR