

风云三号微波湿度仪天线设计与分析

王宏建, 李 靖, 刘和光, 张升伟

(中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190)

[摘要] 风云三号(FY-3)湿度仪天线接收各种目标的微波辐射能量,因此天线好坏对整个微波湿度仪系统性能及应用影响极大。FY-3湿度仪天线具有高增益、低噪声和高的波束效率,采用偏馈抛物面天线形式,天线频率分别达到150 GHz和183 GHz,是目前国内有效载荷的最高频率,其成功研制填补了我国航天微波遥感的空白,也使我国航天器天线技术进入一个新的领域,实现了一次较大的技术跨越。文章从天线的系统工作模式、组成、设计要点、关键技术及验证等方面阐述该天线子系统的技术设计与创新。

[关键词] FY-3湿度仪;偏馈抛物面天线;波纹喇叭;遥感

[中图分类号] TN823 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2009)04-0039-07

1 前言

FY-3气象卫星是我国的第二代极轨气象卫星,它是在风云一号气象卫星技术基础上的发展和提高,在功能和技术上向前跨进了一大步。卫星轨道为太阳同步轨道,高度约为836 km,轨道倾角为 98.8° ,卫星姿态为三轴稳定,微波湿度仪是其中的主要有效载荷。微波湿度仪为用微波对大气、地物和海洋目标进行遥感的设备,是一种高灵敏度低噪声的宽带微波接收机。FY-3微波湿度探测仪的关键技术主要有:高精度天线系统、毫米波前端、系统集成、定标技术以及长寿命高可靠转动机构。除了天线系统外,定标技术同天线性能密切相关,因此设计高精度天线系统对整个微波湿度探测仪来说是至关重要的。

FY-3微波湿度仪主要性能指标和国外AMSU有效载荷基本相当,代表着微波遥感的国际水平。长期以来,由于短毫米波一些关键技术始终没有得到有效解决,国内对于毫米波、短毫米波集成设备的研制一直处于较低水平,因此星载有效载荷的频率一直在毫米波以下。

FY-3微波湿度仪系统中的天线要求有两个频

段,其中一个频率150 GHz为双线极化,另一个频率183 GHz是单极化。该天线的工作频段达到了短毫米波频段,这在我国航天器天线的应用历史上还未有过,再加上双极化和高的主波束效率,使天线研制面临了巨大的技术挑战。

对应的天线在载体上的布局见图1。天线承担着地球大气遥感信息的无线传输任务。在轨飞行过程中,反射面受太阳辐射、地球反照辐射和地球红外辐射等环境外热流的加热,同时又要周期性地进入地球阴影区,加上反射面自身结构的阴影遮挡影响,空间飞行器天线要经历 $-100 \sim +80^\circ\text{C}$ 范围的温度交变环境。因此,反射面结构中存在较大的天线结构热应力(温度梯度引起),从而使反射器结构产生屈曲和变形,即反射面的热变形。热变形会使天线辐射性能变坏,因此必须把结构的变形控制在允许的范围内。考虑到微波湿度仪天线的高主波束效率和高指向精度要求,把形面均方根偏差(RMS)控制在 $\lambda/100$ 上, λ 为天线的最高工作波长。可见随着工作频率的提高对形面精度的要求也在提高。该天线工作于短毫米波段,其形面的RMS应控制在 $2\ \mu\text{m}$ 量级。这个要求比我国应用过的航天器天线精度高近3个量级。

[收稿日期] 2008-04-22;修回日期 2008-05-12

[基金项目] 科技部“八六三”基础研究和发 展计划资助项目(2006AA12Z137);中科院国防预研基金项目;国家军口“八六三”项目

[作者简介] 王宏建(1969-),男,河南孟津县人,副研究员,博士,主要进行星载天线的研制;E-mail: hjwang@nmrs.ac.cn

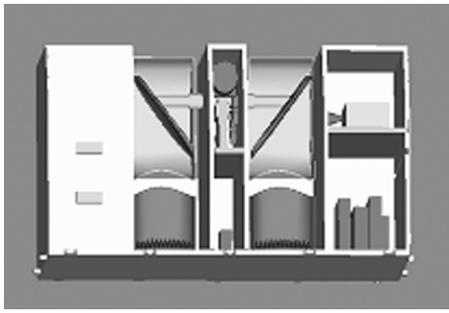


图1 天线在整个扫描系统结构示意图

Fig. 1 Profile of the antenna in the whole scanning system

一般为了得到小的 RMS, 可以将反射面天线材料改为近零胀系数的碳纤维复合材料。但该天线的结构尺寸相对较小, 强度比复合材料好很多, 同时金属材料的导热性也比复合材料好数个量级。经过机电热一体化分析与设计, 天线本体材料、背板支撑等机构采用锻铝, 加工完成后的反射面进行精密抛光、打磨并镀金。

FY-3 微波湿度仪天线设计时采用了机热电一体化设计程序, 对天线的组装及型面几何偏差进行了测量。笔者从设计与验证两个方面说明高精度航天器反射面天线系统的实现。

2 FY-3 卫星微波湿度仪天线指标

FY-3 卫星微波湿度仪天线指标为: a. 工作频率与带宽: 150.0 ± 3.0 GHz, 183.31 ± 10.0 GHz; b. 增益: > 40 dB; c. 主波束效率: $\geq 95\%$; d. 波束宽度: $\leq 1.1^\circ$ 和 1.0° ; e. 极化方式: 150 GHz, V&H 极化; 183.31 GHz, H 极化; f. 旁瓣电平: < -28 dB; g. 交叉极化电平: < -17 dB; h. 投影口径要求: $D' = 140$ mm.

在天线驱动控制单元的控制下, 扫描机构和天线完成周期性对地观测和定标。天线的优化设计是要解决的关键技术之一。为了利于旋转和减小馈源对口面的遮挡, 微波湿度仪采用偏馈抛物面天线, 偏馈角度为 90° , 用小张角波纹圆锥喇叭作为馈源的实现形式。150.0 GHz 和 183.31 GHz 接收机各有一套偏置馈源和非对称切割的抛物线反射面。

馈源相位中心置于抛物面反射线外的焦点上, 不仅避免了抛物面对馈源的反射作用, 也避免了馈源对抛物面反射线的遮挡, 降低因反射器对馈源的反射而引起的旁瓣电平的上升和天线驻波特性的恶化, 抑制旁瓣, 提高主波束效率。图 2 为卫星微波湿度仪天线系统的结构示意图。

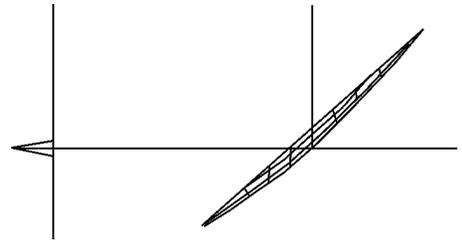


图2 微波湿度仪天线结构示意图

Fig. 2 Drawing of FY-3 MHS antenna structure

为防止卫星表面杂散电磁辐射的影响, 两副天线都设计有天线罩, 天线罩活动部分与天线反射面固定在一起旋转, 固定部分与馈源固定在一起。

圆锥喇叭具有较理想的 E 面和 H 面方向图等化对称性, 机械加工和匹配连接容易实现。波纹圆锥喇叭旁瓣电平低, 交叉极化小, 方向图具有旋转轴对称性, 因此控制反射器绕馈源喇叭的轴线旋转, 可以实现天线波束的 360° 圆周扫描。天线子系统整体结构框图见图 3。

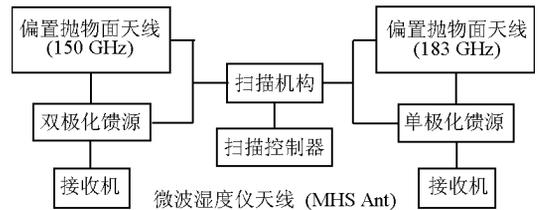


图3 FY-3 微波湿度仪天线子系统整体结构框图

Fig. 3 Chart of FY-3 MHS antenna subsystem

3 天线的电性设计

1) 馈源设计。馈源设计是扫描偏馈抛物面天线设计中最重要的一部分。其反射面边缘电平是确定抛物面天线形面边缘的重要参数, 以该照射角宽度入射的抛物面天线有最佳的口径利用效率。需解决的主要问题是波束宽度及相位中心在工作频带内变化小, 并具有圆对称的方向图特性, 使得抛物面投影口径基本成圆形, 波束宽度在沿迹和横迹方向均小于或等于 1.1° 。150.0 GHz 天线有 V 和 H 的极化, 因此要求馈源方向图的 E 和 H 面对称, 以满足天线的旋转对称特点, 并使天线可能得到较高的波束效率和较低的交叉极化电平。

圆锥喇叭的分析是在圆柱波导的分析基础上加上由于张角带来的相位因子变化。入射波是 TE 波或者 TM (横磁场) 波, HE_{11} 模式包含退化的 TE_{11} 和 TM_{11} 波, 具有对称的 E 和 H 面方向图和低的交叉极化分量 (见图 4)。

波纹喇叭的波纹可以看作是阻抗边界条件,其波纹近似于辐射状波导,在波纹里面存在 TEM 波,平行于波纹的电场为零,为了使得圆锥方向磁场为零,波纹齿深一般选择为自由空间的 1/4。

对于 TEM 波纹喇叭来说,在喇叭张开区域内轴向电场表面电阻可以近似为

$$Z_s = jZ_0 \tan k_0 d \quad (1)$$

其中 Z_0 是特性阻抗, k_0 是传播常数, 决定于边界条件和波数, d 是齿深。由于波纹表面是无耗的, 因此表面阻抗被认为只有虚部。其电抗部分为

$$X_s = Z_0 \tan k_0 d \quad (2)$$

对于一般波纹喇叭, 其内部 TM 为:

$$H'_\rho = jZ_0 \gamma \frac{\omega \epsilon n}{\rho k_{\rho nm}} J_n(k_{\rho nm} \rho) \Phi'_\varphi$$

$$H'_\varphi = -jZ_0 \gamma \frac{\omega \epsilon n}{\rho k_{\rho nm}} J'_n(k_{\rho nm} \rho) \Psi'_\varphi$$

$$E'_\varphi = -jZ_0 \gamma \frac{nk_{znm}}{\rho k_{\rho nm}} J_n(k_{\rho nm} \rho) \Phi'_\varphi$$

$$E'_\rho = -jZ_0 \gamma \frac{k_{znm}}{k_{\rho nm}} J'_n(k_{\rho nm} \rho) \Psi'_\varphi$$

$$H'_z = 0, E'_z = Z_0 \gamma J_n(k_{\rho nm} \rho) \Psi'_\varphi \quad (3)$$

同理可得内部为 TE 场的表达式。可以看出上述方程包含一阶和二阶贝塞耳函数以及其微分形式, 其中波数是混合模式方程的 m 阶根, 该方程是喇叭波纹结构的函数。在得到轴向波束的基础上, 可以得到 z 向波数:

$$k_{znm} = \sqrt{k_0^2 - k_{\rho nm}^2} \quad (4)$$

通过选择波数得到可以传播的多种模式混和模, 而其中展开函数为:

$$\Psi'_\varphi = a_\varphi \cos(n\varphi) + b_\varphi \sin(n\varphi)$$

$$\Phi'_\varphi = b_\varphi \cos(n\varphi) - a_\varphi \sin(n\varphi)$$

$$\Psi''_\varphi = -b_\varphi \cos(n\varphi) + a_\varphi \sin(n\varphi)$$

$$\Phi''_\varphi = a_\varphi \cos(n\varphi) + b_\varphi \sin(n\varphi) \quad (5)$$

而 b_φ 和 a_φ 是正弦和余弦波函数的幅度。

在此基础上得到波纹喇叭表面电流和等效磁流, 按照一般电磁场辐射问题处理可以得到辐射场:

$$E_c(r, J) = j\omega\mu(1 - \mathbf{R}\mathbf{R}) \cdot \int \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} \mathbf{J}(r') dS'$$

$$H_m(r, M) = -j\omega\epsilon(1 - \mathbf{R}\mathbf{R}) \cdot \int \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} \mathbf{M}(r') dS'$$

$$H_c(r, J) = -j\mathbf{k}\mathbf{R} \times \int \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} \mathbf{J}(r') dS'$$

$$E_m(r, M) = j\mathbf{k}\mathbf{R} \times \int \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} \mathbf{M}(r') dS' \quad (6)$$

从而得到辐射场:

$$E_\theta = E_{\theta J} + E_{\theta M} \cdot Z_0, E_\phi = E_{\phi J} + E_{\phi M} \cdot Z_0 \quad (7)$$

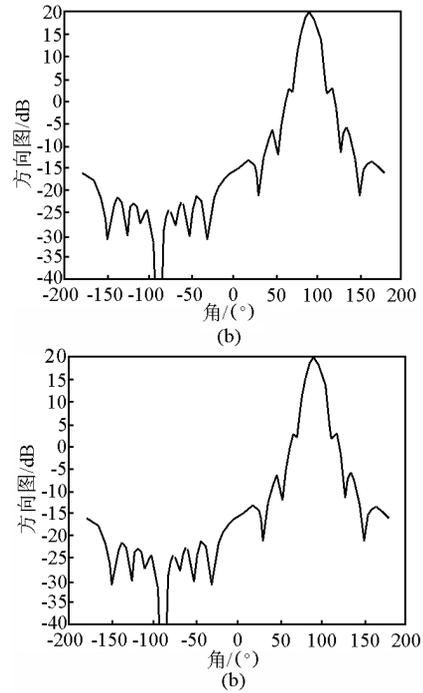


图4 圆锥波纹喇叭馈源 E 面方向图和 H 面方向图

Fig. 4 E plane pattern and H plane pattern of conical corrugated horn

2) 圆锥波纹喇叭的加工及测试。圆锥波纹喇叭的加工是非常困难且昂贵的, 对于短毫米波段, 机械加工的精度难以保证, 这里采用所谓电子成形技术, 采用青铜合金或铝合金制成和波纹喇叭内径相反的模子心轴(见图 5), 利用电子成形在上面敷上铜, 用溶剂把心轴腐蚀掉, 从而只剩下波纹喇叭。



图5 电子成形内轴结构

Fig. 5 Structure of inner electroforming device

3) 正交模耦合器的准光学设计。采用电磁场全波分析仍然可以设计一般的短毫米波器件设计, 但对精密加工要求极高, 加工精度往往不能满足, 并且插损较严重, 这里采用准光学设计。就是采用

一系列平行的金属栅线来反射平行于金属线方向极化的信号,而垂直于金属线的极化信号则可以顺利通过,如图6所示。

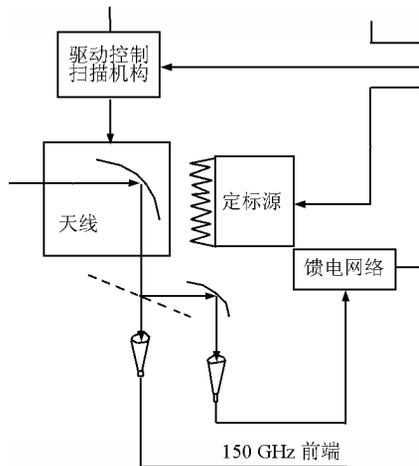


图6 准光学设计的正交耦合器

Fig. 6 OMT profile by quasi-optics

4) 偏馈天线系统的仿真处理。采用物理光学分析天线的性能指标,得到天线的电性能指标。最终抛物面设计参数:投影口径直径为140 mm;该天线主要由3部分组成:a. 偏置抛物反射面;b. 馈源;c. 极化分离器。通过选择反射面参数和多模喇叭可知,馈源的边缘电平、交叉极化满足天线的设计要求。

在反射面参数与馈源确定后,利用物理光学近似可得到反射面天线的二次辐射方向图。假设反射面上任意点 M 的坐标为 (x', y', z') 或 (r', θ', ϕ') 或,观察点 P 的坐标为 (R, Θ, Φ) 。

远区辐射场可表示为

$$E_{\theta}(\Theta, \Phi) = Bi_{\theta} I_0, E_{\phi}(\Theta, \Phi) = Bi_{\phi} I_0 \quad (8)$$

$$I_0 = \iint \frac{(I(\theta', \phi'))^{1/2}}{r'} (\hat{n} \times (r' \times \hat{e}')) \cdot e^{-jk\rho'(1-\hat{r}' \cdot \hat{r}_R)} r'^2 \sin\theta' d\theta' d\phi' \quad (9)$$

$$B = \frac{-j\omega\mu}{2\pi R} e^{-jkr} \left[\frac{\epsilon}{\mu} \frac{P}{2\pi} \right]^{1/2} \sqrt{G_{r0}} \quad (10)$$

式中 P 为发射功率, G_{r0} 为馈源主向增益。 $f_{\theta}(\theta', \phi') = (I(\theta', \phi'))^{1/2}$ 是馈源归一化辐射方向图。

计算结果表明,天线口径 $D = 140 \text{ mm}$, $f/D = 0.589$ 的偏馈抛物面天线增益完全达到了设计要求。由此最后确定了反射面天线的设计参数。

4 天线的结构分析与设计

4.1 结构设计

4.1.1 天线系统形面偏差与公差分配

FY-3 微波湿度仪工作频段达短毫米波段,对

形面公差要求很高。如何实现并保持所要求的形面精度是天线结构设计的中心问题。卫星天线除形面制造公差外,还有在轨冷热交变的变形公差和一些因素引起的结构变形等,这些因素在公差分配时都应予以考虑。反射面形面偏差引起的天线增益损失为

$$\eta_s = G/G_0 \approx 684(\bar{\epsilon}/\lambda)^2 (\text{dB}) \quad (11)$$

式中 G 为有表面误差的天线增益, G_0 为无表面误差的天线增益, $\bar{\epsilon}$ 是表面的均方根误差值。

在轨飞行时一般表面公差对副瓣的影响远比增益的变化要敏感许多。湿度仪天线的主波束效率对边瓣电平十分敏感,且表面误差还影响着波束指向,因此在卫星天线设计上把表面偏差限定在一个比较严格的要求上,故将形面均方根误差限定在 0.01λ 的量级上。

FY-3 微波湿度仪天线的反射面误差主要有3部分:一部分为形面的制造与组装公差(均方根值),称为机械偏差;另一部分为在轨冷热交变、热载荷引起的变形;还有一部分是其他因素引起的变形。由于湿度仪天线主波束效率和边瓣电平要求较高,加上150 GHz 天线为双极化工作方式,应严格控制形面精度。

4.1.2 结构设计与分析

如何提高形面精度,减少环境载荷引起的变形是结构设计的中心问题,为此在结构设计中从材料选择、结构设计到工艺实现多个环节进行控制,概括起来有以下原则:

1) 材料选择和结构设计,减少温度交变的形面变形。目前广泛采用的膨胀系数接近于零的碳纤维复合材料,不可能采用机械加工的办法来提高形面精度。并且随着频率的提高,碳纤维材料的损耗会给系统带来很大不利影响。

2) 对于较小投影口径的反射面天线(140 mm)采用热传导性好、各向同性的金属锻铝作反射面的材料。

3) 反射面镀金。镀金除了保证反射面天线的射频频特性外,还可保证反射面形面随温度变化较小。

4) 天线的结构分析表明其基频为 141.2 Hz 和 142.5 Hz。

4.2 天线的热设计与分析

4.2.1 热设计

即使采用了一系列措施,反射面天线的温度变化还应该尽可能地降低,为此除了采用表面镀金

外,在反射面外面还包裹了有温控涂层隔热、多层隔热组件和涂温控白漆的被动温控措施来确保天线的温度变化和温度梯度变化尽可能小。

4.2.2 热分析

微波湿度计天线与接收机单元是 FY-3 卫星有效载荷的重要组成部分。微波湿度计天线与接收机单元由天线及天线罩、中放盒、直流盒、测温盒、角编码器控制盒、遥测盒驱动盒、前端及电机驱动等部件,以及基板、顶板和各侧板组成。仪器安装在卫星对地面。

由于空间环境极其复杂恶劣,与星内仪器设备相比,位于星体外的微波湿度计天线与接收机单元其状况更加恶劣,不仅要直接受到太阳辐射,地球反射和地球红外辐射的影响,还要受到空间环境将近 4 K 的低温环境影响,以及进出阴影区冷热交变的影响;再加上微波湿度计天线与接收机单元构型复杂,天线及天线罩等转动部件裸露在外,必须采取热控措施;前端等设备功耗较高,仪器如何有效散热等,根据轨道、姿态、天线的安装位置和参数,利用热分析软件和外热流计算软件确定天线的温度场分布,进而得到反射面天线的热变形曲线(见图 7、图 8)。

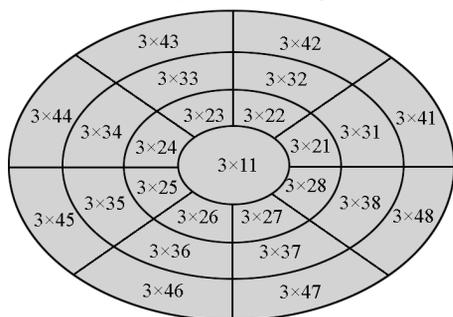


图 7 反射面热分析的单元划分

Fig. 7 Cells of reflector for thermal analysis

5 天线的电机和驱动扫描机构

微波湿度计天线的驱动机构是该子系统的核心部件之一。它要保证两个反射面天线围绕中心轴线非匀速旋转,驱动机构应用在十分复杂的微波环境中,驱动机构组成如图 9 所示,采用正弦波驱动的永磁同步电动机作为驱动元件,以功率线性放大器构成主电路,电流环响应速度快且定子电流基本上没有谐波;以高性能的 FPGA 为控制核心,控制系统用 FPGA 的硬件逻辑实现,可靠性高;以高精度位置检测元件为反馈元件,构成高精度的交流伺服系统。

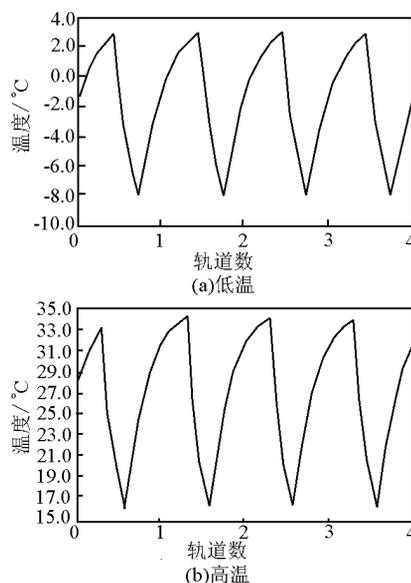


图 8 反射面温度变化

Fig. 8 Temperature variation of reflector

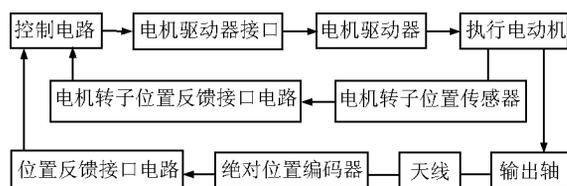


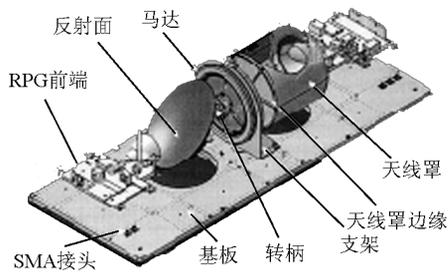
图 9 天线电机控制原理框图

Fig. 9 Chart of antenna motor controlling system

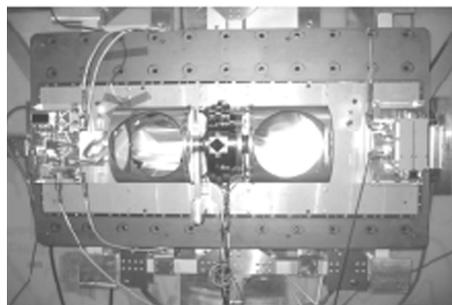
6 天线测试

精密加工后的 FY-3 微波湿度仪天线见图 10 所示。FY-3 微波湿度仪天线的测试包括天线形面测试、电性能测试、力学、热真空、温度循环、EMC 测试等,对 FY-3 天线的主要技术性能经过了严格的电性测试,结果表明,各项指标均优于规范。驱动机构及其控制在内的全系统的性能、寿命和 EMC 等经过了严格测试和鉴定,未见有任何不合格项和 EM 干扰发生。天线和机构完成并通过了各项环境鉴定和试验,保证 FY-3 微波湿度仪天线可靠在轨飞行。因篇幅所限,仅仅列出电性能测试结果。

经过完整的环境试验后,FY-3 天线主要性能测试结果见表 1 所示。因属于窄波束、高增益、低副瓣天线,一般远场不满足测试要求,因此,天线的方向图、极化和增益采用紧缩场测试方法测量,湿度仪天线的主波束效率是按定义计算得到的。天线系统的电性能测试结果如图 11 和图 12 所示,结果表明,指标均优于规范。



(a) 装配图



(b) 子系统图

图 10 天线装配图和子系统图

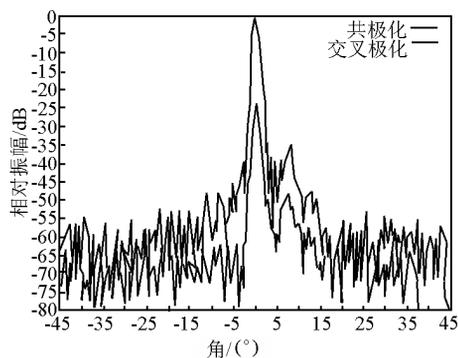
Fig. 10 Assembly of antenna subsystem and antenna subsystem under test

FY-3 微波湿度仪天线是 90° 偏馈抛物面天线, 在 800 多千米的轨道上, 温度变化非常大, 为了达到高增益低副瓣的要求, 表面精度要求很高。此外, 表面处理、加工工艺、温控措施、正交模耦合器的准光学设计与加工、馈源和反射面的系统装调技术、形面检测技术、电性能测试技术等提出了很高的要求。这些关键技术的掌握对我国毫米波、短毫米波、双极化、多频率星载天线的发展起到了极大的促进作用, 使得我国星载微波遥感的测量精度达到了 1.5 K。

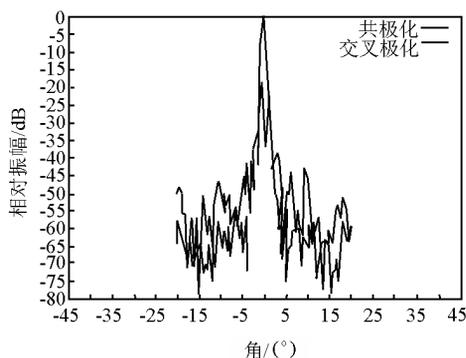
表 1 天线系统测试指标总结

Table 1 Summary of the antenna specifications

频率 / GHz	150		183	
指标对比	要求	实测	要求	实测
增益 / dB	> 37	44.3	> 37	44.5
主波束效率 / %	> 94.5	95.2	> 94.5	97.5
波束宽度 / ($^\circ$)	1.1 ± 0.1	1.11	1.0 ± 0.1	1.08
旁瓣电平 / dB	< -28	-35	< -28	-36
交叉极化电平 / dB	< -17	-18.4	< -17	-21
波束指向 / ($^\circ$)	< 0.05	0.04	< 0.05	0.02
总质量 / kg	8.82 (包含反射面、轴承、反转轴、驱动模块、前端、基板、天线罩、热控组件)			



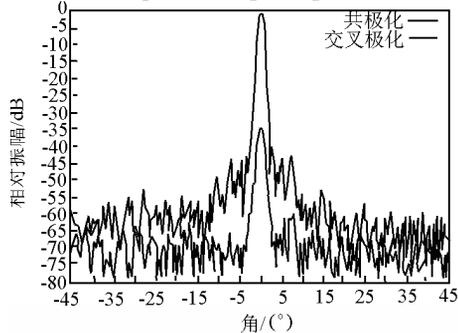
(a) E 面方向图



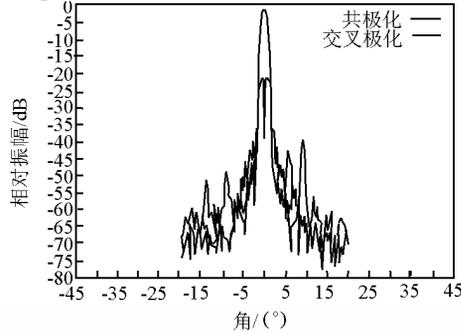
(b) H 面方向图

图 11 150 GHz 天线 E 面方向图和 H 面方向图

Fig. 11 E-plane pattern and H-plane pattern of the 150 GHz antenna



(a) E 面方向图



(b) H 面方向图

图 12 183 GHz 天线 E 面方向图和 H 面方向图

Fig. 12 E-plane pattern and H-plane pattern of the 183 GHz antenna

7 结语

FY-3 微波湿度仪是我国第一颗和国际接轨的业务化气象卫星的主载荷,并且其频率达到了 183 GHz,它成功填补了我国短毫米波航天微波遥感的空白,使我国的航天器天线延伸到了短毫米波段,为我国短毫米波及亚毫米波航天器天线的实现奠定了基础,作为微波遥感最核心子系统的天线子系统成功研制极大提高了星载高频率多极化天线的水平,这是我国星载天线的创新。

FY-3 微波湿度仪天线涉及多学科、多层次关键技术的顺利掌握为我国星载高频率天线的研制提供了宝贵的经验,意义是深远的,也使得星载高频率湿度仪测试精度达到了国际水平。

参考文献

- [1] israel G V, Mittra R. A new series representation for the radiation integral with application to reflector antennas [J]. IEEE Trans AP, 1977, AP-25(5): 631-641
- [2] Rudge A W, Adatia N A. Offset-parabolic-reflector antennas: a review [J]. Proceedings of the IEEE, 1978, 66(12): 1592-1618
- [3] Ruze J. Antenna tolerance theory [J]. IEEE Proceedings, 1966, 54(April): 633-640
- [4] Wodek Gawronski. Servo-performance parameters of the NASA deep space network antennas[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2007, 49(6): 40-46
- [5] David D, Morabito, William Imbriale, et al. Observing the moon at microwave frequencies using a large-diameter deep space network antenna [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2008, 56(3): 650-661
- [6] 王宏建. 风云三号微波湿度仪天线理论与设计[R]. 中科院空间中心微波遥感室博士后出站, 2004

Antenna design and analysis of Fengyun-3 microwave humidity sounder

Wang Hongjian, Li Jing, Liu Heguang, Zhang Shengwei

(National Microwave Remote Sensing Laboratory, CSSAR, CAS, Beijing100190, China)

[Abstract] Fengyun-3 (FY-3) microwave humidity sounder antenna has the following specialties: high gain, low noise, high beam efficiency and high frequency. This Antenna has great influence on the precision of the whole system of FY-3MHS (microwave humidity sounder), offset parabolic antennae with conical corrugated horns are selected for these antennae. The frequencies of the antenna are 150 GHz and 183 GHz respectively (up to the highest frequency of the payload for the domestic satellite), in addition, dual linear polarizations are also needed for the 150 GHz channels. Great challenges are brought about with the stringent demand for the FY-3MHS antenna. The analysis and design of this antenna need intercross knowledge of the electromagnetic theory, mechanics, manufacturing, measurements, quasi-optics, thermal and orbit etc. The successful design and assembly of FY-3MHS antennae fill up the gap of remote sensing in our country and stride a greatly leap in antenna theory.

[Key words] FY-3MHS; offset parabolic antenna; corrugated horn; remote sensing