0254-6124/2012/32(6)-893–04 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Wang Hongjian, Zhang Dehai, Liu Heguang, Chen Xue, Yi Min, Liu Guang. Research of the satellite antenna alignment testing. *Chin. J. Space Sci.*, 2012, **32**(6): 893-896

星载可展开天线波束指向测试方法研究*

王宏建 张德海 刘和光 陈 雪 易 敏 刘 广

(中国科学院空间科学与应用研究中心 中国科学院微波遥感技术重点实验室 北京 100190)

摘 要 综合天线方向图测量和光学测量方法研究了天线远场测量和近场测量光学测试系统, 进而利用光学仪器测试了星载天线波束指向的两种测试方法. 望远镜结合天线远场测试系统能较准确地测试出天线波束指向. 同时, 提出了采用准直仪及波罗棱镜在天线平面近场测试系统测试波束指向的方法. 海洋二号卫星载荷校正辐射计观测天线波束指向的测试表明, 该方法是有效和准确的, 其可以推广至一般高增益天线测试.

关键词 机械轴, 电轴, 光学测试, 方向图

中图法分类号 V 44

Research of the Satellite Antenna Alignment Testing

WANG Hongjian ZHANG Dehai LIU Heguang

CHEN Xue YI Min LIU Guang

(*CAS Key Laboratory of Microwave Remote Sensing, Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

Abstract The synthesis of the antenna pattern measurement and optics measurement is outlined to test the antenna beam alignment. This paper will discuss the application of alignment techniques and tools in the far-field and near-field test facility. Boresight of the antenna was measured by the standard alignment telescope together with the far field pattern test, while the new method to measure the antenna's beam alignment based on the planar near field method was also proposed. This method used the auto-collimator and porroprism with the antenna near-field planar scan test system. The boresight of Haiyang-2 satellite calibration radiometer antenna measurement results verified the validity and accuracy of this method. Both of these two methods can also be applied to the common high gain antenna measurement.

Key words Mechanical axis, Electrical axis, Optical measurement, Pattern

0 引言

卫星平台上通常安放有多个载荷, 而载荷需要进行严格的空间布局和视场分配, 因此, 必须明确各个载荷相对于安装平台的机械安装位置和指向. 机械轴对于卫星载荷和平台安装至关重要, 只有当载荷的

* 国家高技术研究发展计划项目 (2011AA812417B) 和中国科学院空间科学与应用研究中心前研创新项目 (O72118AA8S) 共同资助

2011-07-26 收到原稿, 2011-11-02 收到修定稿

E-mail: wanghongjian@mirslab.cn

机械轴与卫星平台轴之间的夹角足够精确, 才能保证平台和各个载荷正常工作. 此外, 在轨时卫星往往需要整体调整姿态, 各个载荷之间的机械轴指向也就随之变化. 天线的机械轴由天线的形面、形状、安装支架等共同确定 [1−2]. 对于微波载荷来说, 需要天线指向确定目标, 例如地球某一特定区域或者特定空间指向, 即电轴指向, 电轴由馈源以及反射面装配关系和方向图指向确定 [2]. 各个载荷安装完成后需要在整星平台进行联调和测试, 虽然卫星载荷安装时可以采用大型暗室标校电轴, 但是整星情况下进行电轴测试十分困难, 而如果微波载荷本身有足够准确的波束指向, 通过对载荷机械轴的标校就可以确定载荷天线电轴指向相对于整星的方向.

机械轴测试方法比较成熟, 可以通过电子经纬仪及光学望远镜 [1−3] 等确定, 且精度很高, 但电轴测试则较为复杂. 由于微波频率远比可见光频率低, 辐射方向图受绕射、周围电磁环境影响较大, 其电轴指向需要通过测出电平最大值来确定, 这种方法给出的指向往往精度不够.

以往测试星载天线电轴与机械轴夹角时往往简单地把测试转台平面等效为天线安装面, 缺乏有效的光学测试仪器来测试彼此之间的安装角度, 精度难以保证, 况且当安装面和机械轴指向不一致时这种方法是不可行的.

目前微波载荷频率已经达到毫米波和亚毫米波甚至太赫兹频段, 对电轴指向精度提出极高的要求, 迫切需要精确测试电轴与机械轴指向夹角的方法.

本文就天线方向图远场测试和近场测试的两种环境提出了电轴与机械轴指向的测试方法, 对其测试误差进行分析, 并采用天线远场测试条件测试了海洋二号卫星校正辐射计天线电轴与机械轴的夹角.

1 反射面机械轴测试

反射面天线机械轴主要由反射面形状、形面精度以及安装支架等共同确定 [4−5]. 卫星平台载荷的对应关系如图 1 所示. 对于正馈抛物面天线, 在精度要求不高时往往会将天线安装法兰面法向作为天线机械轴, 但这样会带来很大误差. 反射面天线由于形面加工水平限制, 尤其是对于星载大口径复合材料抛物面天线而言, 其加工工艺十分复杂, 往往采用铝蜂窝夹芯结构来降低天线重量, 加工完成后反射面与理想抛物面有较大差别, 需要在反射面上粘贴感光靶点, 再通过两台电子经纬仪测试各个靶点的坐标 [1], 由坐标变换和形面拟合得到真实的反射面形状 [6−7], 拟合得到的抛物面焦距与理想抛物面会有一定差别, 而机械轴指向与理想抛物面轴向也不会完全重合. 当反射面天线偏馈以及采用毫米波以上频率时必须采用拟合出的实际抛物面形状才能得到天线的准确机械轴. 可展开结构天线 [1] 的机械轴测试则更为复杂, 需要在天线安装支架及抛物面上各安装一个立方镜来标校反射面和支架的展开对应关系.

2 反射面天线的电轴测试

单纯的方向图测试比较简单, 有远场、近场、紧缩场测试等方法. 但测试电轴指向时需较高精度角度分辨率的转台, 测试电轴相对于转台俯仰面和方位面的指向角度. 一般精度要求条件下测试出来的电轴指向仅仅是电轴相对于转台的指向. 虽然电轴指向定义为天线辐射最大电平方向, 但是由于射频信号的稳定性、转台角分辨率等因素限制, 直接测试最大电平有很大的随机误差. 因此, 一般采用电平最大值附近相同电平值多次平均的办法来消除随机误差.

3 电轴与机械轴夹角测试

3.1 天线机械轴测试

3.1.1 天线机械轴与天线基准镜的校准

星载可展开天线采用电子经纬仪的光学方法进行测量校准. 坐标原点位于天线抛物反射面的焦点,

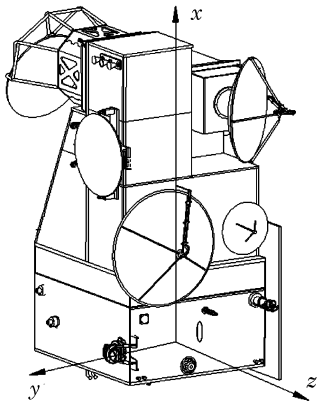

图 1 卫星平台各载荷的对应关系

Fig. 1 Payloads on the HY-2 satellite

在天线测试坐标系中可以测量出天线基准镜与天线机械轴之间的三维数据. 经过数据处理, 可以得到天线基准镜坐标系三轴在天线测试坐标系中的方向余弦, 即基准镜三轴余弦夹角关系. 然后对测试数据进行坐标变换和拟合, 得到实际抛物面方程、焦距和实际天线的机械轴, 将机械轴标校到位于天线支架的立方镜上.

坐标系 $(x_{\rm c}, y_{\rm c}, z_{\rm c})$ 定义为天线的测试坐标系, 该坐标系与总体接口数据单定义的天线坐标系 (x, y, z) 是旋转和平移的关系, 在天线未安装到安装基板之前, 以天线边缘参考基准镜作为参考坐标系 $(x_{\rm b}, y_{\rm b}, z_{\rm b})$, 用电子经纬仪测量系统可以测得天线基准镜三轴相对于参考坐标系的方向角度关系. 天线边缘参考基准镜坐标系三轴定义分别为 $+z_{\rm b}$ 轴所垂直的面为参考基准镜面对卫星舱板的面, $+x_{\rm b}$ 轴所垂直的面为参考基准镜的外侧面, $+y_{\rm b}$ 轴满足坐标系右手定则.

可以得出天线基准镜三轴在测试坐标系 $(x_{\rm c}, y_{\rm c}, z_{\rm c})$ 中的方向余弦关系式:

$$\begin{aligned}
\boldsymbol{e}_{x_j} &= \cos(\alpha x_j)\boldsymbol{i} + \cos(\beta x_j)\boldsymbol{j} + \cos(\gamma x_j)\boldsymbol{k},\\
\boldsymbol{e}_{y_j} &= \cos(\alpha y_j)\boldsymbol{i} + \cos(\beta y_j)\boldsymbol{j} + \cos(\gamma y_j)\boldsymbol{k},\\
\boldsymbol{e}_{z_j} &= \cos(\alpha z_j\boldsymbol{i} + \cos(\beta z_j)\boldsymbol{j} + \cos(\gamma z_j)\boldsymbol{k}. \qquad (1)
\end{aligned}$$

3.1.2 天线机械轴与光学望远镜的平行校准

将光学望远镜和被测天线安装支架简单固定, 将望远镜轴线调整至与天线机械轴平行校准 (见图 2), 并在保持平行的状态下将望远镜和被测天线严格固定. 测量光学望远镜轴线中心点到天线口径面水平距离和垂直距离. 在发射天线旁边放置一靶标 (见图 3), 测量出发射天线与靶标之间的准确距离以及发射天线与待测天线的距离.

3.2 电轴和机械轴远场测试

采用电平最大值附近取相同电平多次平均的办法确定天线电轴指向并记录转台读数, 当转动天线转台找到该点时, 保持天线转台不动, 用光学望远镜观测发射塔靶标, 这时望远镜光轴线在发射源区对应的点在固定靶标点的右下方 (见图 3), 由此可以得到天线电轴在天线俯仰平面的夹角 θ_x 和在天线水平平面的夹角 θ_y.

电轴扫描先水平面后俯仰面时, 则电轴单位矢量的方向余弦为

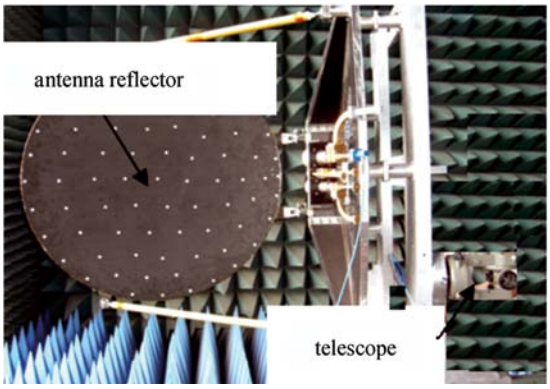

图 2 远场测试海洋二号天线波束指向

Fig. 2 HY-2 antenna beam alignment measurement using far field method



图 3 远场测试的发射天线及旁边的靶标

Fig. 3 Source antenna and target for the far field test

$$\begin{aligned}
\boldsymbol{e} = &\sin(\theta_x)\boldsymbol{i} + \sin(\theta_y)\cos(\theta_x)\boldsymbol{j} + \cos(\theta_x)\cos(\theta_y)\boldsymbol{k} = \\
&\cos(\alpha_e)\boldsymbol{i} + \cos(\beta_e)\boldsymbol{j} + \cos(\gamma_e)\boldsymbol{k}. \qquad (2)
\end{aligned}$$

电轴扫描先俯仰面后水平面时, 则电轴单位矢量的方向余弦为

$$\begin{aligned}
\boldsymbol{e} = &\sin(\theta_x)\cos(\theta_y)\boldsymbol{i} + \sin(\theta_y)\boldsymbol{j} + \cos(\theta_x)\cos(\theta_y)\boldsymbol{k} = \\
&\cos(\alpha e)\boldsymbol{i} + \cos(\beta e)\boldsymbol{j} + \cos(\gamma e)\boldsymbol{k}. \qquad (3)
\end{aligned}$$

将式 (3) 与式 (1) 或式 (2) 与式 (1) 进行点乘, 即可得到如下天线电轴在天线基准镜坐标系中的方向余弦关系:

$$\begin{aligned}
\boldsymbol{e}\cdot\boldsymbol{e}_{x_j} &= \cos(\alpha e_{x_j}),\\
\boldsymbol{e}\cdot\boldsymbol{e}_{y_j} &= \cos(\beta e_{y_j}),\\
\boldsymbol{e}\cdot\boldsymbol{e}_{z_j} &= \cos(\gamma e_{z_j}). \qquad (4)
\end{aligned}$$

在此基础上可以得到电轴与机械轴之间的夹角.

3.3 电轴和机械轴近场测试

采用近场测试天线电轴的方法与远场测试有很大不同, 首先在近场测试扫描区域没有明确的方向图波束及对应的最大辐射电平, 电轴指向必须经由傅里叶变换后得到, 且必须进行近场全部扫描后才能确定; 其次电平最大值指向需要与扫描面垂直, 需要两个电子经纬仪, 一个观测扫描平面, 另一个观测天线面; 近场扫描区域的杂散波对波束有较大影响. 此外, 近场测试时待测天线往往位于扫描区域中间, 因此电子经纬仪测试时因距离较远会带来测试的困难.

由于近场测试时被测天线与扫描架距离很近, 不能利用望远镜测试, 为此首先采用本文 3.1.1 中的方法测试出天线的机械轴, 波罗棱镜反射光的原理示意如图 4(a) 所示. 将波罗棱镜反射轴调整至与天线机械轴平行并准确固定波罗棱镜, 如图 4(b) 所示, 测量出波罗棱镜反射轴线和天线机械轴的距离和坐标.

将被测天线、支架和波罗棱镜一起安装在转台上, 在扫描架探头同一水平面上放置准直仪, 将待测天线调整至准直仪轴线和波罗棱镜反射轴平行, 这时天线机械轴与探头扫描面垂直.

采用平面近场扫描方法进行天线测试, 经过近远场变换得到天线方向图, 读出天线增益最大点指向, 该指向和机械轴的夹角就是需要的波束指向角.

4 海洋二号校正辐射计可展开天线波束指向的远场测试

海洋二号校正辐射计可展开天线工作频率属于毫米波段 (37 GHz), 波束指向测试要求很高, 这里采用远场测试方法.

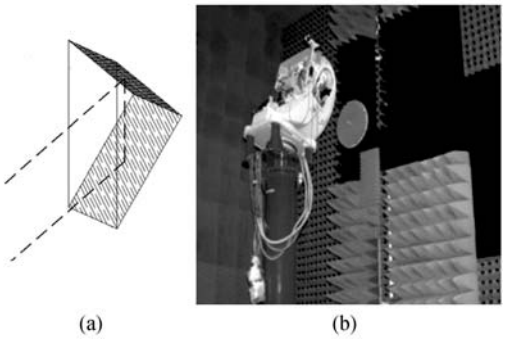

图 4 波束指向的近场测试

Fig. 4 HY-2 antenna beam alignment measurement using near field method

采用本文 3.1 和 3.2 节所述方法进行天线机械轴、电轴测试 (见图 2), 测试出天线反射面形面按最小二乘拟合计算的均方根误差为 0.044 mm, 反射面焦距和设计焦距的误差为 0.72 mm, 反射面轴线和安装底板平面法线夹角 89.9493° (设计值 90°), 均达到了很高的精度. 电轴与机械轴夹角为 0.039°, 完全满足设计要求.

5 结论

针对星载微波天线准确波束测试需求, 研究了远场和近场测试结合光学测试的两种方法. 利用天线远场方向图测试方法和光学测量方法测量了海洋二号校正辐射计毫米波可展开天线的电轴与机械轴夹角, 多次测试结果显示测试精度满足毫米波天线高精度波束指向要求. 该方法不仅仅对星载天线, 对其他天线来说也完全可以采用该方法准确测试波束指向.

致谢 中航工业计量所马晓苏团队, 中国空间技术研究院叶云裳、满剑锋, 中国兵器工业集团公司王勤科对本文研究给予了帮助.

参考文献

[1] Wang Hongjian, Liu Heguang. Antenna subsystem of Haiyang-2 microwave calibration radiometer [J]. *Chin. J. Radio Sci.*, 2009, **24**(6):1168-1171. In Chinese (王宏建, 刘和光. 海洋二号微波定标辐射计天线子系统 [J]. 电波科学学报, 2009, **24**(6):1168-1171)

[2] Hagenbeek M, Boomstra R A. Antenna Alignment in a Near Field Facility [R]. NSI report, 2000

[3] Gabellini P, D'Agristina L, Dicecca L, *et al*. The electrical design and verification of the Alphasat TDP#5 antenna farm [C]//32nd ESA Antenna Workshop on Antennas for Space Applications. Noordwijk, Netherlands: European Space Agency, 2010

[4] Chujo W, Ito T, Hori Y, *et al*. Surface accuracy measurement of a deployable mesh reflector by planar near-field scanning [J]. *IEEE Trans. Antennas Propogat.*, 1988, **36**(6):879-883

[5] Häkli J, Koskinen T, Lnqvist A, *et al*. Testing of a 1.5-m reflector antenna at 322 GHz in a CATR based on a hologram [J]. *IEEE Trans. Anten. Propagat.*, 2005, **53**(10):142-3150

[6] Tauber J A, Norgaard-Nielsen H U, Ade P A R, *et al*. Planck pre-launch status: The optical system [J]. *Astron. Astrophys.*, 2010, **520**, A2, 1-12

[7] Ruze J. Antenna tolerance theory—A review [J]. *Proc. IEEE*, 1966, **54**(4):633-642