

Wang Hongjian, Hao Qiyan, Yi Min, Chen Xue, Liu Guang, Liu Shihua, Zhao Xin. Radiation patterns of big antennas based on optics measurement. *Chin. J. Space Sci.*, 2013, **33**(1): 115-119

基于光学测量的大型天线测试方法研究

王宏建 郝齐焱 易敏 陈雪

刘广 刘世华 赵鑫

(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100190)

(中国科学院微波遥感技术重点实验室 北京 100190)

摘要 提出了一种基于光学照相的电磁场数值计算测试电大尺寸天线辐射特性的新方法. 根据光学照相实测大型天线的形面三维坐标计算出天线表面电流分布, 利用物理光学计算得到天线远场方向图和增益. 采用该方法得到的海洋二号校正辐射计观测天线和充气天线的辐射特性与平面近场测试结果的对比较验证了其具有足够的准确性. 该方法具有快速、灵活的特点, 可以推广到电大尺寸天线测试.

关键词 光学照相, 电大尺寸天线, 平面近场测试

中图分类号 V 44

Radiation Patterns of Big Antennas Based on Optics Measurement

WANG Hongjian HAO Qiyan YI Min CHEN Xue

LIU Guang LIU Shihua ZHAO Xin

(Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

(CAS Key Laboratory of Microwave Remote Sensing, Beijing 100190)

Abstract A new method to measure the large-aperture antenna radiation patterns was proposed. It is difficult for far-field, near-field and CATR measurement to meet the measurement requirements of electrically large antenna. Surface measurement of parabolic reflector antenna by photogrammetry at multiple points can achieve high accuracy, even electronic theodolite and laser interferometer can achieve more accuracy to meet surface measurement requirement of large-aperture terahertz antenna. This method used the data obtained by actual optical measurement to simulate the real antenna radiation by physical optics method. Because of using the real antenna measured data, this simulation method gave the actual antenna gain and radiation results. The simulation results agreed well with the antennas patterns obtained by the real near-field tests. This method was fast and much adaptable for the large-aperture antenna.

Key words Photogrammetry, Big aperture antenna, Near-field testing

0 引言

随着观测分辨率的不断提高, 现代微波遥感器天线尺寸越来越大, 对于口径在几十甚至数百个波长以上天线的需求越来越多, 例如美国奋进号航天飞机发射的充气可展开天线^[1]口径达到 14m (L 波段); 欧空局发射的普朗克、赫胥黎太赫兹探测仪^[2]口径达到数百波长, 此时, 传统的天线远场测试、紧缩场测试乃至近场测试往往不能满足测试要求. 一般远场测试需要极远的距离才能达到远场条件, 并且远场测试不满足电大尺寸天线测试必需的大静区要求; 同样, 静区的原因使得紧缩场方法也难以完成大天线辐射性能测试. 随着频率的提高, 要求主反射面口径极大, 形面精度很高, 而平面近场测试扫描架目前也只能达到几十米, 测试时间较长.

如何进行电大尺寸天线高效准确的测试是目前迫切需要解决的问题. 以往由于条件限制对大型天线辐射特性的评估往往只采用光学测量, 根据 Ruze^[3]对天线辐射特性进行大致评估或仅仅依靠设计仿真结果, 但对于遥感器天线, 这样的评估往往会引入较大误差. 与天线辐射的直接测试方法相比, 天线形面测试则有许多方法, 例如可以采用光学照相方法^[4], 更高精度的还有电子经纬仪测试^[5]甚至激光干涉测试等. 这些方法具有直接、快速的特点, 可以得出天线形面的均方根误差. 物理光学是分析口径天线的有效手段, 可以得到足够精确的天线辐射特性, 但设计时是根据理想抛物面或赋形表面的理想值来进行仿真分析的, 由于加工、装调等环节引入的误差使天线最终性能与设计值总有一定误差. 将光学测量得到的实际抛物面坐标带入物理光学仿真分析中即可得到天线的实际方向图.

1 天线的物理光学分析

物理光学可以得到相对来说较为准确的表面电流分布和磁流分布, 物理光学方法将口径分为多个网格 (见图 1), 以各个网格点源的合成计算其总辐射场. 物理光学法将馈源口径面场分布等效为口径面电流, 可以计算得到反射面的入射场. 由于边界条件限制, 切向电场为零, 意味着有反向的表面电流存在. 将馈源方向图和反射面形面数据输入, 物理光学的计算流

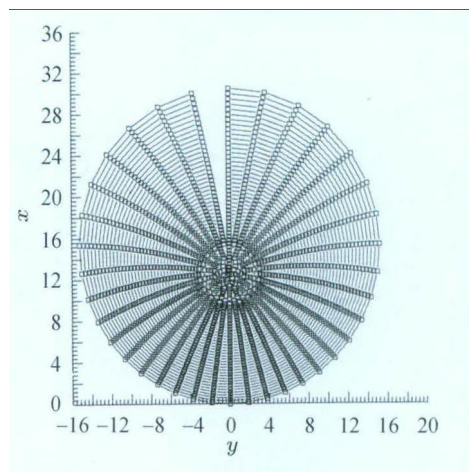


图 1 偏馈抛物面天线的网格计算剖分

Fig. 1 Mesh generation for offset parabolic reflector antenna

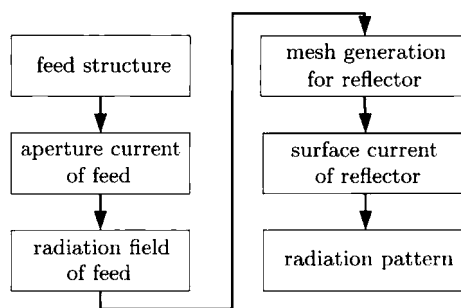


图 2 物理光学计算抛物面天线流程

Fig. 2 Procedure for analysis of parabolic reflector antenna using physical optics

程如图 2 所示.

对于全导体结构反射面, 表面电流

$$J_{po} = \begin{cases} \hat{n} \times \mathbf{H}_{total}, \\ 0. \end{cases} \quad (1)$$

电流位能

$$A = \iint \frac{J_{po} e^{-jkR}}{4\pi R} dS. \quad (2)$$

由镜像原理可知, 导体表面切向磁场是源场的两倍, 因此位能

$$A = \frac{e^{-jk l_0}}{4\pi l_0} \iint 2(\hat{n} \times \mathbf{H}_i) e^{-jk l} dS. \quad (3)$$

而辐射远场为

$$E = -\frac{j\omega\mu e^{-jk l_0}}{4\pi l_0} \iint 2(\hat{n} \times \mathbf{H}_i) e^{-jk l} dS. \quad (4)$$

由于等效面外的场完全可由等效面电流来代替, 因此通过等效面电流可以计算等效面外的场。采用等效电流和磁流的优点是采样点可以较为稀疏, 从而减少计算量。

在设计阶段往往假定反射面为理想抛物面或者赋形抛物面, 也就是说反射面坐标严格遵循设计理想值, 可以在提取理想值坐标电流分布的基础上得到远场方向图和增益等指标。

2 大型天线的光学照相测试

天线加工完成后必须进行形面测试, 其有多种途径可以实现, 例如通过电子经纬仪、三坐标系统等, 也可采用光学照相测量系统。其中, 电子经纬仪测试方法最准确, 但是其时间最长也最复杂^[5], 如图 3 所示: 照相测试方法对于数米以上的低频天线具有快速、高效、简单等优点, 测试精度完全满足要求。天线形面光学照相测试采用光学相机和 photomodel 软件来完成^[4]。激光干涉仪是高精度光学测量校正仪器, 其测量精度可达到纳米量级。

采用非接触光学测量法测量反射面时, 由于形面本身精度很高, 要求测量仪器具有高测量精度。由于照相系统中的图像是没有尺寸的, 必须根据标尺确定照相系统中的图像与实际模型的尺寸比例, 即标尺测量得到的长度与实际长度的比值。

如果抛物面较大, 仅仅一个角度测试会造成照片



图 3 电子经纬仪测试 HY-2CLA

Fig. 3 HY-2CLA surface measurement using electronic theodolite

中远端的测点角度很大, 误差也较大, 这时可采用分区测量, 用一台相机从 6 个角度拍照 (见图 4), 每个角度取 2 张照片, 最后通过图像合成得到最终的形面测试。例如, 机位 1 拍摄照片上 E 和 A 两片反射面和中间公共区域的测点, 依次类推其他 2~5 机位, 机位 6 拍摄的照片需包括标尺和中间公共点, 使标尺所在的 A 片有 3 台相机较准确地拍到, B~E 片包含于 2 个机位的 4 张照片, 这样就以 12 张照片中的中间公共点定位, 最终输出整体反射面上的所有测点。测量得到的点云图按尺寸比例缩放, 然后与设计理论抛物面进行比较, 即可得到反射面的精度 RMS。

3 基于光学测量的天线物理光学分析

采用物理光学方法计算反射面电流时, 需要定义反射面空间表面, 即网格点的坐标。这里将反射面定义为光学照相实测的反射面坐标点, 考虑到一般喇叭馈源的高辐射效率或实测馈源辐射特性, 将馈源方向图代入物理光学方法计算得到反射面天线的实际方向图。该方法的优点如下。

①快速便捷特性。光学测试后直接将坐标值代入

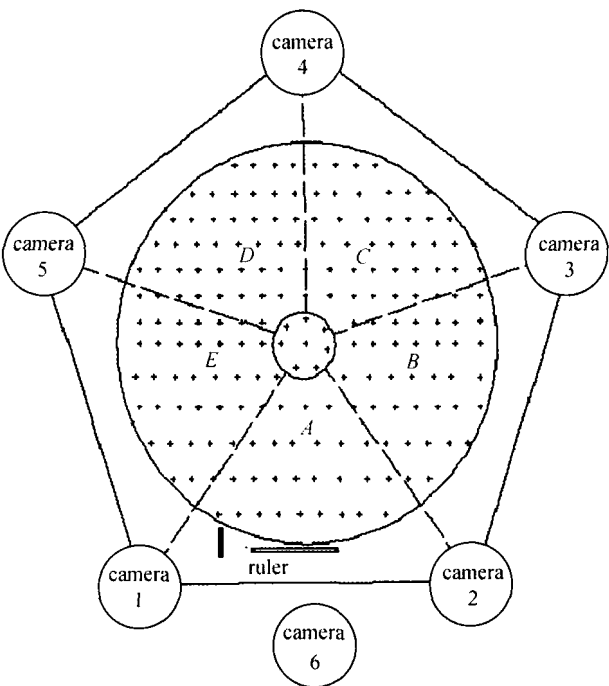


图 4 大尺寸反射面多点照相测试方法

Fig. 4 Photogrammetry of large reflector at multiple points

计算, 往往在几分钟内即可得到结果.

②适用范围广. 大型天线对测试场地要求极高, 而该方法对于数米乃至数百米以上天线测试均适用, 尤其是一些太空使用的大型柔性天线由于重力、风向等影响, 不能在地面测试, 而该方法则可给出理想的测试结果.

③灵活性强. 该方法不仅可以得到普通条件下天线的辐射性能, 还可在热变形分析的基础上得到外热流中天线的实际辐射特性, 而采用实际测试方法得到此特性往往需要极高代价.

光学测量对于微波、毫米波乃至太赫兹频率而言具有足够的精度, 尤其是激光干涉测量, 其精度可达纳米量级. 随着频率提高至太赫兹, 电磁波的光学特性更为明显, 电大尺寸天线的辐射特性可采用更高效、快速的准光学理论分析方法得到, 因此, 光学测试结合电磁场分析可以得到微波乃至太赫兹频段天线的辐射特性, 目前, 太赫兹频率天线的测量最高频率为 750 GHz, 而本方法可以拓展至太赫兹频段, 是一种有效、快速便捷的测试手段.

4 实测结果对比与讨论

海洋二号校正辐射计观测天线 (HY-2CLA) 最高频率达到 37 GHz, 采用电子经纬仪得到其均方根误差为 0.03 mm. 采用变张角圆锥波纹喇叭高效辐射馈源, 馈源方向图与实测结果十分接近, 将馈源方向图和实测反射面坐标代入物理光学计算方法中, 图 5 对采用该方法得到的 HY-2CLA 方向图与采用近场测试方法得到的实际方向图进行了比较, 可以看出,

两者十分相符, 其最大副瓣之差为 2.3 dB, 其他副瓣位置和电平值也基本保持一致. 主要是由于电子经纬仪测量精度非常高, 而 HY-2CLA 天线形面均方根误差达到 0.03 mm 量级, 馈源采用方向图对称的高效辐射圆锥波纹喇叭, 因此, 两种方法的结果相差很小.

充气可展开天线通常为体积大、质量轻、旋转困难的大天线, 对其辐射特性进行测量对于测试场的要求极高. 一般的远场和紧缩场不具备这种测试条件. 这里采用天线平面近场测试系统进行测试.

图 6 是采用光学照相结合物理光学分析方法得到的 3 m 口径充气可展开天线的方向图. 其中, 图 6(a) 为天线水平放置状态下的分析结果, 图 6(b) 为天线垂直放置状态下的分析结果. 可以看出, 天线水平放置时由于重力平均分布于整个抛物面, 其分析方向图更为对称. 天线垂直放置时由于重力影响, 抛

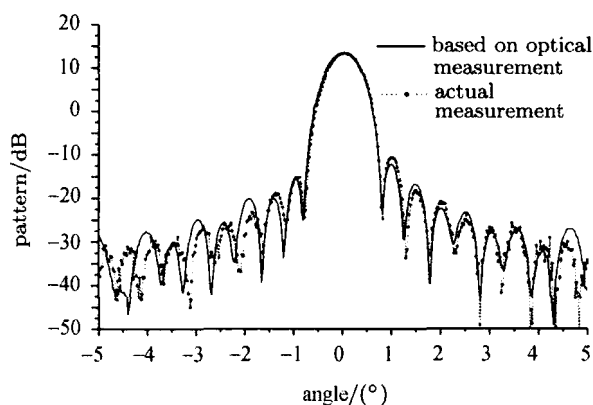


图 5 HY-2CLA 实测和基于光学测量分析方向图对比
Fig. 5 Comparison of actual measurement and using optical measurement for HY-2CLA radiation pattern

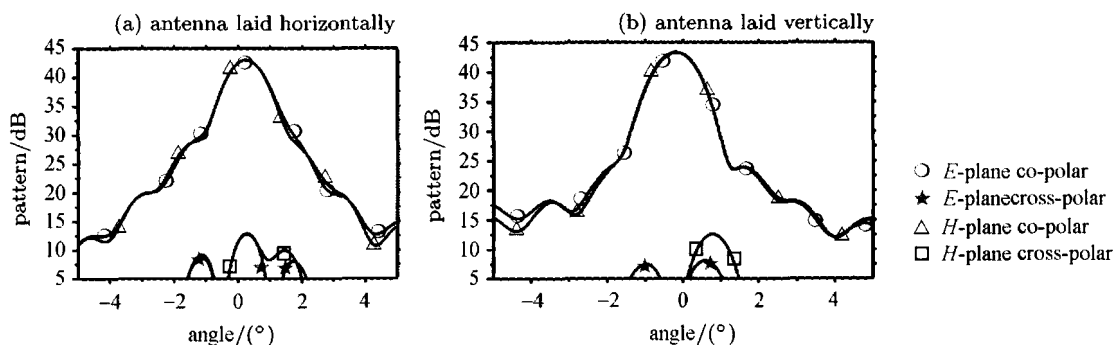


图 6 充气天线基于光学测量分析方向图
Fig. 6 Inflatable antenna pattern based on optical measurement

物面下半部分比上半部分体积更大, 其方向图也有一定倾斜。这与水平放置比垂直放置均方根误差更小的测试结果一致^[6]。

图 7 是近场测试得到的方向图, 可以看出, 图 7 与图 6(b) 有一定的差别, 主要原因, 其一, 近场测试系统行程为 3.7 m, 而天线直径加上支架实际口径达到 3.6 m, 实际扫描范围仅仅是 $\pm 8^\circ$; 其二, 由于天线结构限制, 抛物面口径距离扫描探头较远, 测试截断误差较大, 因此, 分析结果与测试结果有一定的误差。从图 7 还可以看出, 由于重力影响, 充气抛物面天线左右较为对称而上下不对称, 因此, 其 H 面方向图也不完全对称, 而 E 面则相对对称 (见图 7)。

空间环境是航天器天线的最终使用环境, 因此, 环境实验对于载荷来说至关重要。空间中外热流高低温交变、零重力、大温度梯度、真空等条件对天线性能影响很大, 因此, 测试天线在此环境下的真实性能至关重要。但由于条件限制, 很多载荷仅仅进行了环境实验前后的性能对比, 无法进行真实的实验, 国际上也仅是对小天线完成了此环境下的天线辐射测

试, 而采用光学测试结合物理光学分析的方法可以得到天线在此环境下的辐射特性。

在外热流、真空等条件下由分析软件得到天线形面的三维坐标, 将三维坐标代入物理光学分析方法可以得到在空间环境下天线的真实性能。

5 结论

提出了采用光学测试结合电磁场分析用于口径天线辐射测量的新方法。利用高精度光学测量得到口径天线准确的三维坐标, 并代入天线口面采样点网格, 利用电磁场分析方法即可得到天线的方向图和增益等辐射特性。与实际天线测量实验的对比验证了该方法的有效性和准确性, 同时该方法具有快速、灵活、普适性强等优点, 尤其是在高频率、电大尺寸、外热流特性等条件下, 该方法的优点显得更为突出。

参考文献

- [1] Huang J. The development of large flat inflatable antenna for deep-space communications [C]//AIAA Space 2004 Conference and Exposition. San Diego: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004. 2254-2267
- [2] Paguay M H, Daddato R J, Parian J A, et al. Terahertz antenna technology and verification: Herschel and Planck - A review [J]. *IEEE Trans. Micr. Theory Tech.*, 2010, **58**(7):2046-2063
- [3] Ruze J. Antenna tolerance theory - A review [J]. *IEEE Proc.*, 1966, **54**(4):633-640
- [4] Pappa R S, Giersch L R, Quagliaroli J M. Photogrammetry of a 5 m inflatable space antenna with consumer-grade digital cameras [J]. *Exp. Tech.*, 2001, **25**(4):21-29
- [5] Wang Hongjian, Liu Huguang. 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)
- [6] Wang Hongjian. The surface measurement of inflatable parabolic antenna [J]. *Remote Sens. Technol. Appl.*, 2010, **25**(2):268-271. In Chinese (王宏建. 充气天线形面测试方法研究 [J]. 遥感技术与应用, 2010, **25**(2):268-271)

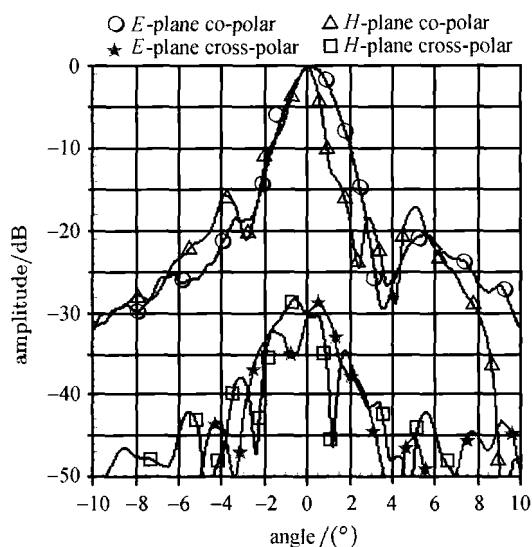


图 7 充气天线实测方向

Fig. 7 Pattern measurement results for inflatable antennas