

一种高频电大尺寸天线测试的新方法

王宏建¹, 刘 广^{1,2}, 薛 飞², 陈 雪¹, 易 敏¹, 赵 鑫¹

(1. 中国科学院微波遥感重点实验室, 北京 100190; 2. 中国科学院大学研究生院, 北京 100190)

摘 要: 文章提出一种简单可行的高频电大尺寸天线辐射测量新方法. 该方法基于天线形面光学精密测量, 将形面分为多个区域, 每个区域带入实际光学测试采样点数据, 采用电磁场数值计算得到天线的辐射方向图. 光学测试系统提供了足够高的测试精度可以满足微波、毫米波甚至太赫兹等频段天线的测试要求. 该方法还可以解决超大型可展开天线测试以及模拟星载环境实验条件下天线辐射测试难题.

关键词: 电大尺寸; 光学测试; 天线方向图; 太赫兹

中图分类号: TN821 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2014)07-1365-04

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.07.018

A Simple and Effective Method for the High Frequency Large Antenna Patterns Measurement

WANG Hong-jian¹, LIU Guang^{1,2}, XUE Fei², CHEN Xue¹, YI Min¹, ZHAO Xin¹

(1. CAS Key Laboratory of Microwave Remote Sensing, National Space Science Center, P. O. box 8701, Beijing 100190, China;

2. Graduate School, University of CAS, Beijing 100190, China)

Abstract: A simple but feasible method for the large and high frequency antenna patterns measurement is proposed in this paper. The computational electromagnetics method physical optics(PO) analysis based on targets data obtained by optical tests and finite element methods(FEM) is used to simulate the far field patterns and gains of the antenna. Because the optical testing systems have the accuracy well above the need for the microwave and terahertz(THz). Therefore the measurement data outline the real surface instead of ideal curve of the antenna. The PO simulations of currents integration of the real surface fitted by the sample spots represent the actual antenna radiation pattern. This method can also be used to evaluate the antenna radiation under special condition such as high and low temperature vacuum chamber test, THz antenna radiation test, deployable and inflatable antenna test(that are easily affected by gravity, wind and other environment etc.). The good agreement of the antenna patterns between direct test and simulations verifies the effectiveness and accuracy of this method.

Key words: electrical large antenna; optical testing; antenna patterns; terahertz

1 引言

天线方向图的测试有近场测试、远场测试以及模拟远场的紧缩场测试等方法^[1-3]. 但是电大尺寸天线方向图测试是极其困难的. 随着观测分辨率的不断提高, 现代微波遥感对天线尺寸需求越来越大, 口径在几十、甚至数百个波长以上的天线需求越来越多, 例如美国奋进号航天飞机发射的充气可展开天线^[4]口径达到 14 米(L 波段); 欧空局发射的普朗克、赫胥黎太赫兹探测仪^[5]口径达到数百个波长, 这样的天线如采用远场测试或紧缩场测试, 对测试距离和静区都提出了极高的要求; 而数十米长天线对平面近场测量对扫描架要求极高, 成本极高, 且测试时间很长. 此外特殊用途使用天线

(航天器天线)在研制阶段往往需要模拟宇宙空间的环境试验, 而天线在模拟环境条件下(一般金属冷热真空罐)辐射性能测试至今没有得到很好的解决^[6].

由于诸多条件限制, 对电大尺寸天线, 往往采用光学测量系统对天线形面测试, 根据 Ruze 公式^[7]简单预估一下天线增益等辐射参量来判断天线性能. 该方法是相对间接的方法, 但不能准确量化天线的实际辐射性能.

文章基于天线形面的光学测试, 提出将实测数据带入电磁场数值分析计算电大尺寸天线方向图的方法. 计算结果包含了加工、装调等环节引入误差的真实天线, 可以得出实际天线的方向图等辐射特性.

2 天线形面的光学测试

天线形面测试有很多方法,按照测试精度的提高,有光学照相合成方法、三坐标测量、电子经纬仪测量、激光干涉仪测量等方法^[8].三坐标测试是自动化程度最高的测试方法,但受制于测试行程限制;电子经纬仪测量精度很高,达到微米以下精度,但测试时间很长;激光干涉仪测试通过测得激光干涉条纹来测试形面精度,精度可以满足可见光测试.光学照相是相对高效的测试方法,由多台相机分区同时测试天线形面,经过坐标变换软件得到形面均方根误差.后两者都属于非接触测量,测试精度很高,可以满足微波、毫米波、太赫兹频段天线的测试需求.

光学照相测试方法,测试前需要对测试系统相机进行标校.将校准的标尺和待测天线并排放置,根据标尺确定照相中的图像和实际模型的尺寸比例(图1所示).如果抛物面较大可以分区测量,用多台相机从六个角度拍照,因为仅仅一个角度测试会造成照片中远端的测点角度太大,误差也较大,最后通过相片合成得到“点云图”(见图2所示),经过 photomodeler 软件变换成形面均方根误差.

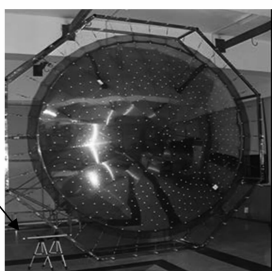


图1 大型充气可展开天线

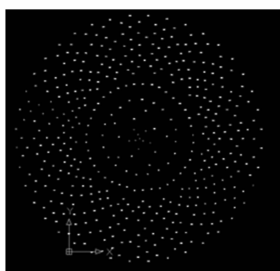


图2 充气天线的形面云图

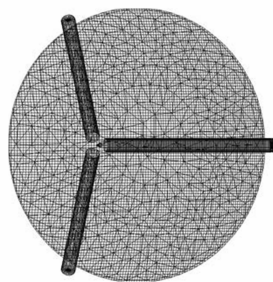


图3 反射面天线网格部分

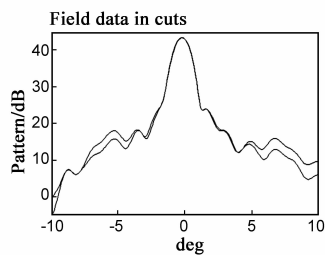


图4 充气天线基于光学照相计算的方向图@5.9GHz

3 物理光学计算天线辐射方向图

抛物面天线辐射方向图取决于馈源、抛物面的装对应关系,在馈源一定的情况下,抛物面各个点相对于馈源的空间位置决定了整个天线的辐射方向图^[9].

物理光学是计算抛物面天线高效准确的计算方法.物理光学方法把天线口径分为多个网格(见图3所

示),整个天线辐射场就是无数个网格点上场叠加形成的,因此只要准确计算出各个网格点处的场,并且网格点足够多,就能准确得到天线远场方向图.

对于全导体结构反射面,表面电流

$$J_{po} = \begin{cases} n \times H_{total} \\ 0 \end{cases} \quad (1)$$

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

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

而辐射远场为:

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

在初始设计阶段,天线形面采用理想抛物面(或者其他曲面)分布,计算出的天线方向图是不存在加工误差、装配误差等的理想值,但由于工艺、装配等限制实际天线都非理想曲面,口径面和理想曲面有误差.

该方法将实测多个采样点三维坐标带替理想采样点,由于光学测量获取了天线反射面各点相对于馈源的真实空间位置关系,本方法计算得到的是有形面误差的情况下反射面各个点截获馈源辐射的能量,各个点场矢量合成就是真实天线的辐射特性.

4 物理光学计算天线高低温状况下实际方向图

为验证该方法的有效性和准确性,首先由光学测量获得天线坐标,采用本方法计算其辐射方向图,再和天线实测方向图对比验证.

4.1 大型充气可展开天线

图1所示充气可展开天线首先采用光学照相法获得其形面云图(图2所示),采样点有257个,天线垂直测试均方根误差0.98mm,水平放置时为0.95mm.基于物理光学计算的天线方向图(垂直放置)如图4所示,采用天线平面近场测试系统(NSI 12×12)得到的实测方向图如图5所示.

可以看出两者方向图基本图形很相似,无论副瓣位置和电平值基本一致,但也有些区别,主要原因在于NSI 12×12平面近场测试系统扫描架行程为3.7m,而充气天线加上框架直径为3.4m,因此测试截断误差电平较高,近场测试的精度受到影响.

4.2 风云三号气象卫星湿度计太赫兹天线

风云三号(FY3)湿度计频率为150GHz和183GHz,属于太赫兹频率的低频段90度偏馈反射面天线,采用

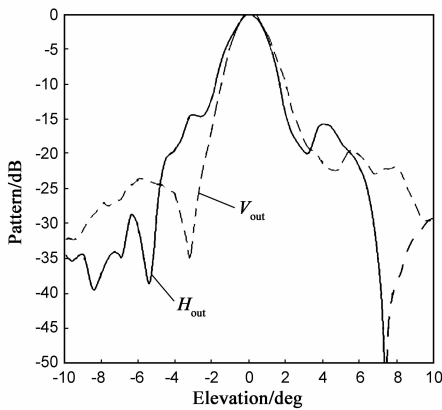


图5 充气天线近场测量得到的方向图@5.9GHz

三座标系统对其进行了形面测试,天线形面均方根误差为 $15\mu\text{m}$,基于实测采样点坐标的天线计算方向图如图 6 所示,采用紧缩场测试结果(德国 ASTRIUM 公司)见图 7 所示,可以看出两者符合很好,天线的交叉极化和副瓣电平等参量显示了高度的一致性。

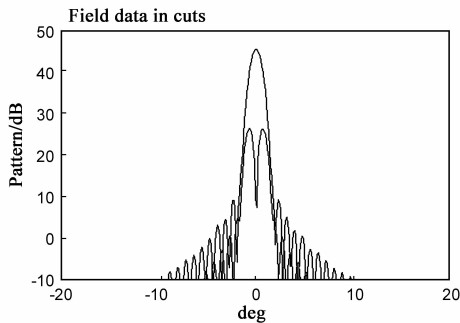


图6 FY3天线基于三座标测试的计算方向图

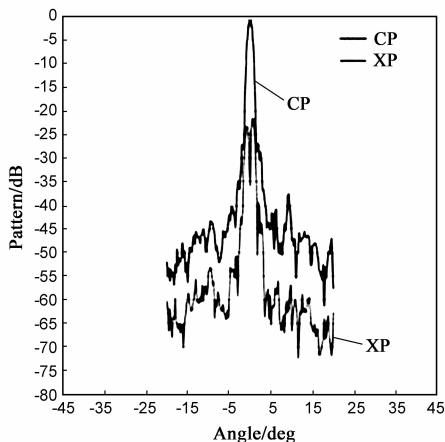


图7 FY3天线紧缩场测试方向图

4.3 海洋二号(HY2)动力卫星校正辐射计观测天线

HY2 校正辐射计观测天线是可展开天线,采用电子经纬仪对其形面进行测试,实测结果显示其形面精度(均方根误差)是 0.035mm .基于形面测试数据的计算

方向图和实测方向图如图 8 所示,可以看到两者结果基本一致。

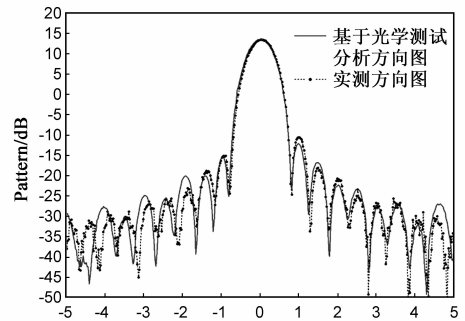


图8 HY2天线基于电子经纬测试的计算方向图和实测方向图

在宇宙空间天线性能对于整个遥感器至关重要,发射前需要进行热分析和热设计,然后进行冷热真空试验来模拟真实环境,航天器天线的机电热一体化设计首先用 NEVDA 软件来模拟外热流,其输出文件作为 SINDA 软件的输入文件来计算天线形面的温度分布,最后采用基于有限元的 NASTRAN 软件来计算外热流等条件下天线的形面坐标.根据形面三维坐标可以得到天线在宇宙空间的辐射方向图。

5 结论

文章提出了基于光学测试实测数据计算天线方向图来代替实测天线方向图的新方法.采用本方法分析计算了多个天线的方向图,和天线实测方向图的比较验证了计算的准确性.该方法的优点在于:(1)快速便捷特性;光学测试后直接将坐标带入计算,往往在几秒内即可得到辐射特性;(2)准确性;由于光学测量系统提供了足够高的形面测试精度,基于本方法的实测结果可以反映真实天线的特性;(3)普适性强;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,尤其是太空使用的大型柔性天线由于重力、风向等根本不能在地面测试,而该方法则可以给出理想的测试结果;此外还可以在热变形分析基础上得到在外热流中天线的实际辐射特性,解决了空间环境下天线辐射特性无法测量的难题.目前随着天线频率的不断提高和尺寸不断增大,对测试系统提出了极高要求,目前最高频率的天线测试系统也不过 650GHz ,因此本方法对于高频率电大尺寸天线测试是目前相对可行和经济的方法。

参考文献

- [1] 全绍辉,何国瑜,等.平面波谱理论在紧缩场干扰源分析中的应用[J].电子学报,2002,30(12):1794-1796.
QUANShao-hui, HE Guo-yu, et al. CATR extraneous source analysis using plane wave spectrum approach[J]. Acta Elec-

- tronica Sinica, 2002, 30(12): 1794 – 1796. (in Chinese)
- [2] Wataru Chujo, et al. Surface accuracy measurement of a deployable mesh reflector -by planar near-field scanning [J]. IEEE Trans on Antenna and propagation, 1988, 36(6): 879 – 883.
- [3] Janne Häkli, et al. Testing of a 1.5-m reflector antenna at 322 GHz in a CATR based on a hologram[J]. IEEE Trans on Antenna and Propagation, 2005, 53(10): 3142 – 3150.
- [4] WangHongjian, et al. Inflatable antenna for space-borne microwave remote sensing[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2012, 54(5): 58 – 70.
- [5] Luis F Rolo, et al. Terahertz antenna technology and verification: Herschel and Planck-a review[J]. IEEE Trans on MTT, 2010, 58(7): 2046 – 2063
- [6] Brian Catanzaro Herschel Space Telescope: Optical Test and Model Correlation. Aerospace conference [R]. San Diego, USA, 2009. 1 – 14.
- [7] J Ruze. Antenna tolerance theory --a review[J]. Proceedings of the IEEE, 1966, 54(4): 633 – 642.
- [8] Ravi Subrahmanyam. Photogrammetric measurement of the gravity deformation in Cassegrain antenna[J]. IEEE Trans on Antenna and propagation, 2005, 53(8): 2590 – 2596.
- [9] C J Sletten. Reflector and Lens Antenna[M]. Artech House, 1988.

作者简介

王宏建 中科院空间中心研究员, 长期从事计算电磁学、航天器天线理论设计和测试研究.

E-mail: Wanghongjian@mirslab.cn