

文章编号 0494-0911(2003)06-0016-04

中图分类号 P24

文献标识码 B

# 天线反射面精度测量技术述评

李宗春, 李广云, 吴晓平

(信息工程大学 测绘学院, 河南 郑州 450052)

## Review of Accuracy Measuring Technology of Antenna's Surface

LI Zong-chun, LI Guang-yun, WU Xiao-ping

**摘要** 首先介绍国内外天线制造业的先进水平, 提出研究天线反射面精度测量新技术的必要性和紧迫性。在此基础上回顾天线测量技术的发展历程, 传统的测量方法, 工业测量系统的方法, 以及射电全息测量方法; 展望天线反射面测量技术如激光雷达测量技术及数据处理理论与方法的发展。

**关键词** 天线测量 表面精度 工业测量系统 射电全息术 激光雷达

### 一、天线制造业的发展

通信、雷达、遥感、广播、电视、导航等无线电设备, 都是依靠无线电波来工作的, 都需要有无线电波的辐射和接收。我们把辐射或接收无线电波的装置称为天线。天线的形式很多, 按天线的分析方法一般可分为“线天线”和“面天线”, 本文所讨论的天线是面天线, 以下简称天线。

首先了解一下国内外天线制造业的先进水平。美国国立射电天文台(NARO)于1999年建成了世界上最大的整体式反射面天线(由2004片铝板拼接而成, 天线全重6800t)Green Bank Telescope, 口径面积为100m×110m(截割自Φ208m/F60m的抛物面), 表面精度为±0.46mm; 美国麻省理工学院与墨西哥合建的世界上最精密的大型毫米波射电望远镜(LMT)采用了Φ50m的卡塞格伦式反射面天线<sup>[1]</sup>, 表面精度达±0.069mm; 美国康奈尔大学国家天文和电离层研究中心(NAIC)研制的世界上最大的射电望远镜Arecibo, 主反射面为球形, 口径305m(由38788片铝板拼接而成, 天线全重900t), 占地18英亩(1英亩=4047m<sup>2</sup>), 表面精度优于±2mm; 日本东京天文台安装的Φ45m天线, 工作波长为2mm, 表面精度要求为±0.12mm。由此可见, 国际天线业的需求很广, 发展也非常快。

到目前为止国内已建成的最大天线是由39所为上海天文台制造的Φ25m的卡塞格伦式射电望远镜, 最短工作波长26mm, 表面精度要求±0.8mm左右; 紫金山天文台与美国合作研制的Φ13.7m天线, 最短工作波长2.6mm, 表面精度要求±0.13mm。

左右57所研制的13m×25m天线, 表面精度优于±1mm; 54所制造出用于对流层散射通信的20m大口径“广告牌”天线, 表面精度优于±2mm; 54所在建的某大型天线, 口径18m×36m, 表面精度要求±0.7mm以内。

类似的天线还有很多, 不再列举。上述天线的共同特点是表面精度高、面积大、结构复杂、对测量的要求很高。这些大型天线和特种天线的设计制造, 已经不是常规测试手段所能保障和解决的。天线的测试手段正在经历着巨大的变化, 必须采用精密工程测量学及计量学中的新技术和新手段来解决上述大型和超大型天线的安装制造问题。

### 二、国内外天线测量技术回顾

天线的表面精度是衡量评价天线质量的重要指标, 它不仅直接影响天线的口面效率, 从而决定该天线可工作的最短波长, 还影响天线方向图的主瓣宽度和旁瓣结构。通过对天线面进行测量, 确定其表面精度, 由表面精度可以推算出它对天线电性能的影响。反射面的表面精度要求与工作频率有关系, 工作频率越高, 对表面精度的要求就越严。一般要求<sup>[2]</sup>表面精度是天线工作波长的1/16~1/32, 而测量精度要达到表面精度的1/3~1/5, 因此对测量所提出的要求是比较苛刻的。

纵观天线表面精度测量方法的发展历程, 大致可以分成3种方法。

#### 1. 传统的测量方法

传统的测量方法主要有机械、光学和电等方法。机械测量法是用机械的方法对反射面进行检

测,不仅过去是主要方法,现在也仍在使用。主要有样板法和车床法两种。样板法利用了旋转天线如旋转抛物面成型的原理,对中、小型天线的安装检测比较有效,但只适合于天线朝天状态下的测量,测量精度为 $\pm(0.1\sim0.2)\text{ mm}$ ;车床实际上是一台精度比较低的三坐标测量机,该法只适合测量小型天线(直径不大于4 m),测量精度可达 $\pm(0.02\sim0.1)\text{ mm}$ 。

光学测量法主要有经纬仪钢带尺法、双五棱镜法和五棱镜带尺法等。经纬仪钢带尺法是一种广泛应用的方法,测量精度在 $\pm 0.2\text{ mm}$ 以内;双五棱镜法可以测量抛物面在不同仰角时的表面精度,测量精度为 $\pm(0.15\sim0.66)\text{ mm}$ ;其他还有五棱镜带尺法、钢丝测距法、激光测距法、微波测距法和小车测量法等。

上述提及的测量方法属于比较经典、传统的方法,为早期的国内外天线行业所普遍采用。传统方法的主要特点:量程比较小、精度比较低、测量速度慢、自动化程度低、劳动强度大、对天线的姿态有限制等。

## 2. 工业测量系统的方法

从20世纪80年代开始,精密工程测量的方法和手段在天线测量中的应用主要表现为工业测量系统<sup>[1,2]</sup>的应用。工业测量系统与三坐标测量机的测量方法相比较有更大的灵活性,也称为非正交坐标测量系统。按其使用传感器的类型可分为经纬仪测量系统、全站仪测量系统、摄影测量系统、激光跟踪测量系统等几种测量系统。

### (1) 经纬仪测量系统

经纬仪测量系统以两台以上的高精度电子经纬仪为传感器,结合其他附件和系统软件,以角度前方交会的测量原理对被测物(天线)实现无接触测量,测量速度快,测量范围在几米到几十米,测量精度为 $\pm(0.05\sim0.2)\text{ mm}$ 。由于该系统有着突出的优点,因此在天线制造业中得到了广泛的应用。信息工程大学测绘学院用该系统对54所6.2 m试验天线进行了安装测量<sup>[3]</sup>,测量精度为 $\pm 0.15\text{ mm}$ ,天线表面精度为 $\pm 0.7\text{ mm}$ ;对天线模胎和面板进行了检测<sup>[4]</sup>,测量精度为 $\pm(0.02\sim0.05)\text{ mm}$ ;对Φ15 m天线进行自重变形观测<sup>[5]</sup>,测量精度为 $\pm 0.6\text{ mm}$ ;对Φ25 m修正型卡塞格伦天线进行自重变形观测<sup>[6]</sup>,测量精度为 $\pm 0.5\text{ mm}$ ;最近对18 m×36 m大型天线进行了安装,天线的表面精度为 $\pm 0.45\text{ mm}$ 。

### (2) 全站仪测量系统

全站仪测量系统以一台高精度全站仪为传感器,配以反射片等距离测量标志,以极坐标的测量原

理对被测物(天线)实施测量,测量范围从几米到200 m之间,测量精度为 $\pm(0.2\sim0.5)\text{ mm}$ 。单台全站仪测量系统相对于经纬仪测量系统而言,成本低,操作方便,测量坐标系的建立快,维持时间长。单台全站仪测量系统应用于高精度的安装检测工作中,必须采用特殊的作业手段和数据处理方法<sup>[7]</sup>才能达到亚毫米的精度。提高坐标测量精度的最主要途径是提高距离测量精度,而测距的剩余加、乘常数是测距误差最大的影响因素,因此必须消除或减弱这两项的影响。实测结果表明,在大尺寸范围内可基本达到和经纬仪坐标测量系统相媲美的程度。美国Arecibo望远镜首次安装测量采用全站仪进行控制测量,控制网的精度为1 mm;美国EMS公司成功地将该系统用于Φ15 m卡式毫米波射电望远镜、10 m×7 m紧缩场天线以及Φ26 m厘米波跟踪雷达天线的安装测量和变形测量<sup>[8]</sup>;NARO的Green Bank Telescope,用全站仪结合经纬仪进行安装测量,得到的表面精度为 $\pm 1.1\text{ mm}$ ;美国国家导弹防御系统中的GBR-P雷达,口径14 m,采用TDM5005全站仪进行安装测量及重力变形观测,测量精度 $\pm 0.5\text{ mm}$ 。

### (3) 摄影测量系统

摄影测量系统以单台或多台高精度量测相机为传感器,以交会的测量原理进行快速无接触测量,测量范围大,速度快,特别适合于动态测量场合。美国Arecibo望远镜的升级<sup>[9]</sup>(工作频率由600 MHz提高到10 GHz),全站仪的精度已经不能满足要求,为此专门采用了摄影测量的方法对其进行测量,坐标分量的测量精度为0.25 mm,最后得到调整后的表面精度优于 $\pm 2\text{ mm}$ ;信息工程大学测绘学院对Φ15 m天线进行了变形测量的试验<sup>[10]</sup>,测量精度为 $\pm(0.2\sim0.5)\text{ mm}$ 。

### (4) 激光跟踪测量系统

激光跟踪测量系统以单台激光跟踪仪为传感器,以极坐标的测量原理进行快速跟踪测量,坐标重复测量精度达到 $5\times 10^{-6}$ 。只要将反射装置(猫眼反射器、角隅反射器和工具球反射器)在被测物的表面移动,就可实现该表面的快速数字化,尤其适合于天线模胎及单块面板的测量及质量评定。用激光跟踪仪指导天线的安装与检测也有报道,不再赘述。

工业测量系统与传统方法相比突出的特点是:量程大、精度高、测量速度快、自动化程度高、劳动强度小以及对天线的姿态无特殊要求等。由于具有上述的优点,使该系统在现代面天线的安装、检测中有成功的应用,上述事例仅是窥其一斑。

### 3. 射电全息术的方法

20世纪80年代开始,一批大中型毫米波、亚毫米波射电望远镜相继问世,这些望远镜的天线口径与表面精度之比已达 $10^5$ 以上,而上述测量方法的精度已基本达到极限。因此,测量天线表面精度的射电全息术得到越来越多的应用。

射电全息术是利用天线的远场复方向图与天线口面上的场分布间的傅里叶变换关系,由远场方向图的测量来反推天线口面上的场分布(振幅和相位分布),并由天线口面上场的相位分布,用光线追溯得到天线表面相对于理想抛物面偏差的信息。目前射电全息术大致分为两类:一类是测量远场方向图的幅度并直接测量远场方向图的相位,这需要在被测天线附近设置另一具天线来提供参考相位,并须要具有相位稳定的双通道接收机。另一类是无相位测量方法,即采用某种相位恢复算法,由天线的聚焦和偏焦方向图的幅度来获得天线口面上场的振幅和相位分布。由于避开了直接测量远场方向图的相位,因而设备相对简单,对一架工作中的望远镜几乎无需增添额外的设备,但此方法对用来测量天线方向图的信号源要求有较高的信噪比。

紫金山天文台首次射电全息测量试验结果显示<sup>[11]</sup>在22GHz频段,使用强水脉泽源Orion,对紫金山天文台的Φ13.7m毫米波望远镜进行了实测,由天线口面上的相位误差分布推得天线表面相对于理想抛物面偏差的均方根值为0.248mm,测试精度约为±0.16mm,检测结果与经典的经纬仪带尺法测量所得的结果基本相符。

国际上应用射电全息术成功的例子更多,如美国的GBT天线,通过射电全息术的测量,将表面精度从±1.1mm(由经纬仪和全站仪配合调整而成的表面精度)提高到±0.46mm。

该法的特点是:量程无限制、精度高、实时测量、自动化程度高、对天线的姿态无特殊要求。由于具有这些特点,该法的应用前景将是非常广阔的。

## 三、天线测量技术的发展

### 1. 数据采集手段的发展

数据采集手段的发展主要以激光雷达<sup>[12]</sup>(Light Detection and Range, Lidar)测量系统为代表,该法仍属于工业测量系统的范畴。随着红宝石激光器的出现,诞生了以测距为主要功能的激光雷达,但早期的产品实用化程度甚低,直到二极管激光泵浦的全固态激光系统技术的发展和成熟,才较好地解决了长期困扰激光雷达实用化的问题,1996年

微脉冲激光雷达实现了商品化,在低功率下可以测量较远的距离和较高的分辨率,开辟了激光雷达新的应用天地。激光雷达距离测量主要有两种方式:非相干式和相干式,相干式的测量精度更高,但仪器的设计更为复杂。

美国MetricVision和法国Mensi公司都有商业化的产品,以MetricVision与Leica公司新近推出的LR200为例,其全称为调频相干激光雷达,波长1550nm。测量可直接在自然或人工表面上进行,无需合作目标和照准标志,真正实现了无需合作目标的非接触测量;测量速度快,每秒可测1000点左右;测量精度高,坐标测量精度为 $10 \times 10^{-6}$ (10m距离上的精度为±0.1mm,2σ);测量范围大,最大测量范围可达60m;并且带有强大的系统软件,功能丰富,实现了测量和数据处理的可视化,测量结果可直接交由CAD分析软件处理,可以轻松实现被测物的3维重构。LR200拥有如此多的优点,预计将会在天线测量中得到广泛的应用。

### 2. 数据处理方法的发展

数据处理及可视化方法的研究是天线测量技术的核心问题之一。为提高数据处理的速度、可靠性和科学性,对各种新老方法进行研究和比较,是非常重要的理论工作。对应于不同数学模型的天线,研究其表面精度或调整量计算方法,找出比较合理、高效的计算方法;对海量测量点(例如由激光跟踪仪和激光雷达所测)如何实现即时处理、处理结果可视化及反向工程建模等问题,随着新仪器的应用将成为非常紧迫的技术问题;天线变形观测值的数据处理及变形值的预报也是研究比较少的问题,需要进一步的探讨。随着天线测量实践的发展,对数据处理的要求也会更加复杂和多变,如何将数据处理的结果更好、更直接为设计和安装检测服务,还需要通过工程实践来积累经验。

## 四、结束语

综合上述介绍可以看出,测量系统与天线制造业的结合体现在多个方面,简而言之主要是满足3个需求:一是检测与设计验证的需求;二是实际安装的需求;三是变形观测的需求。从这一角度看,国外的天线测量水平总体高于国内,表现为方法多样、理论严密、装备先进、经验丰富。这一方面预示着我们精密工程测量专业有着很大的发展空间,另一方面也说明精密工程测量和天线测量相结合还有一个不断探索前进的过程,将精密工程测量的基本理论和方法与大型天线的工程实际紧密结合,创造出我们

自己独特的方法 ,是我们的当务之急。

### 参考文献 :

- [1] 李广云 . 工业测量系统进展 [M]. 北京 : 解放军出版社 , 2000.
- [2] 李广云 , 倪 涵 , 徐忠阳 . 工业测量系统 [M]. 北京 : 解放军出版社 , 1994.
- [3] 李广云 等 . 工业测量系统在多波束天线安装检测中的应用 [J]. 解放军测绘学院学报 , 1998 , 15(3): 173-177.
- [4] 李宗春 , 李广云 , 卢志辉 . 余割波束天线检测方法的研究 [J]. 电波科学学报 , 2001 , 16(3): 363-366.
- [5] 付子傲 . 电子经纬仪用于抛物面天线检测 [D]. 郑州 : 解放军测绘学院 , 1989.
- [6] 徐忠阳 . 小型非接触式测量系统及其在天线自重变形测量中的应用 [D]. 郑州 : 解放军测绘学院 , 1990.
- [7] 李广云 , 李宗春 . TC2002 极坐标测量系统在大型天线检测中的应用 [J]. 测绘工程 , 1999 , 8(4): 35-39.

( 上接第 10 页 )

3. 提倡大地测量成果有条件的共享。
4. 积极将最先进的大地测量成果推广应用。
5. 努力提高我国自主版权的大地测量科研成果和生产软件的水平 , 提高大地测量数据采集、数据处理、数据解释和数据应用的水平 , 努力提高大地测量在地球科学中的地位 , 扩大大地测量的影响。
6. 建立中国大地测量服务机构。
7. 加强与国际大地测量组织的合作与交流 , 积极参加国际大地测量各学科组织 , 积极参加国际大地测量观测计划和服务组织。一方面充分利用国际大地测量协会的全球观测和研究成果以及国际大地测量各服务机构的共享成果为我国国防和国民经济建设服务 , 提高我国大地测量水平 ; 另一方面也让世人了解中国大地测量的成就 , 提升我国大地测量工作者在国际大地测量界的知名度。

我国是大地测量大国 , 但中国大地测量工作者在国际舞台上不够活跃 , 声音太弱 , 影响太小 , 与中国的政治影响和大国地位极不相称。首先 , 众多的国际合作计划和服务计划的总部几乎都设在美国和欧洲 , 只有第一委员会第二分会下的 APSC( 亚太地球动力学计划 ) 设在中国。其次 , 中国学者在国际大地测量界所取得的有重要影响的科研成果不多 , 尤

- [8] BRENNER M J. Measurements of Structural Deformations of Large Reflector Antennas [A]. Antenna Measurements and Techniques Association Symposium [C]. 1995. 55-59.
- [9] GOLDSMITH P. Resetting the Arecibo Primary Reflector Surface [J]. The Arecibo Observatory Newsletter , 2001 ,(32): 1-4.
- [10] 邵锡惠 . 军事工程摄影测量 [M]. 北京 : 解放军出版社 , 1991.
- [11] 韩 润 等 . 紫金山天文台 13.7 米射电望远镜天线表面精度的首次射电全息测量 [J]. 天文学报 , 1994 , 35(2): 209-214.
- [12] 戴永江 . 激光雷达原理 [M]. 北京 : 国防工业出版社 , 2002.
- [13] 章文勋 . 世纪之交的天线技术 [J]. 电波科学学报 , 2000 , 15(1): 97-100.
- [14] 魏文元 等 . 天线原理 [M]. 北京 : 国防工业出版社 , 1985.

其是原发性的科研成果、模型及方法不多 , 甚至具有独立版权的计算软件也不多见 ; 再次 , 中国大地测量工作者不善于与国际交流 , 现有的交流只停留在为先进国家的大地测量学者和组织提供观测数据或实验数据 , 如此造成了我国学者在国际舞台上的影响力较小 ; 当然 , 我国大地测量学者的外语水平普遍不高 , 也是影响我国大地测量工作者进行国际学术交流的重要因素。

8. 建议中国大地测量工作者在加强国际交流和国际合作的同时 , 要破除迷信 , 解放思想、增强自信 , 对西方名流学者的理论和方法不要一味盲从 , 要敢于提出自己的新理论、新方法 , 建立自己的新软件 , 在国际舞台上要敢于发表自己的独立见解 , 敢于与国际学者进行争论 ; 中国大地测量工作者在发表论文时 , 要尽量引用我国大地测量刊物的论文 , 要积极宣传中国学者的理论和方法。

9. 根据国际大地测量协会新的机构调整 , 以及我国大地测量发展与需求的实际情况 , 建议我国测绘学会在充分考虑中国特色的前提下 , 尽量与国际大地测量协会接轨 , 这样既满足国际交流的需要 , 也符合我国大地测量自身发展的需要。

参考文献 ( 略 )

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…

---



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

---

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>

---



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com))，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>