半光程差在紧缩场天线型面精度测量中的应用

栾京东　李晓星　周国锋　赵金泽　胡　浩　周　超
（北京航空航天大学机械工程及自动化学院，北京 100191）

摘要：通过讨论实际型面与理论型面误差之间的关系，得出基于半光程差与法向误差之间的关系式，将激光跟踪仪采集的法向误差转换成反映电气性能的半光程差，并将其应用到某紧缩场反射面天线的型面检测中。

关键词：紧缩场；半光程差；法向误差；激光跟踪仪

Application of Semi-optical Path Difference for Antenna Surface Accuracy Measurement in a Compact Range

Luan Jingdong　Li Xiaoxing　Zhou Guofeng　Zhao Jinze　Hu Hao　Zhou Chao
（School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191）

Abstract：This paper discussed the relationship of error between the actual surface and the theoretical surface. A formula based on semi-optical path difference and normal error was obtained. The data of normal error from laser tracker were changed to semi-optical path difference reflecting the electrical performance. And it was applied to reflector antenna surface detection for a compact range.

Key words：compact antenna test range；semi-optical path difference；normal error；laser tracker

1　引言

紧缩场能在较小的暗室里模拟远场的电磁环境，利用常规的远场测试设备和方法，对雷达散射截面和天线方向图测量等进行各种天线测量和研究，具有精度高、干扰小、测试方便、保密性好等优点[1]。紧缩场天线电检测中对于低频段测试频率取决于反射面的尺寸和边缘锯齿的长度，而高频段测试频率主要取决于反射面的型面精度[2]。随着低可侦测性技术的快速发展，世界各国相继建立超宽与超高频的大型紧缩场，其要求整个反射面的型面精度达微米级别。传统天线反射面的检测设备如经纬仪、全站仪和三坐标测量机等，因为精度低、测量范围小或工作效率低而无法应用。基于激光跟踪仪的测量系统解决了大型紧缩场安装与检测的测量技术问题，但是衡量天线电气性能的是半光程差，而实际上仪器测得是法向误差，因此有必要弄清楚它们之间的关系。

2　半光程差

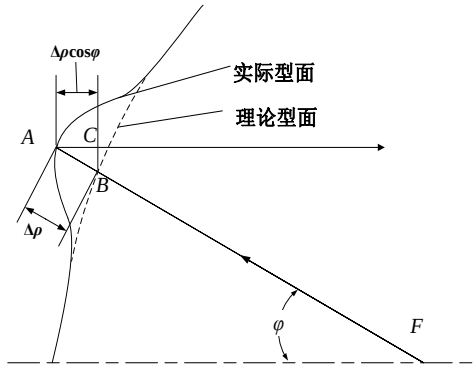

图 1　天线反射面的半光程差示意图

反射面各点的表面误差不同，导致口面电磁场上各点的相位也不相同，从而影响紧缩场天线的电性能，例如天线的增益降低，电测时辐射方向图改变，旁瓣电平增高等[3]。如图 1 所示，实际型面相对理论

作者简介：栾京东（1984-），博士，航空宇航制造工程专业；研究方向：大型紧缩场天线装配测量技术研究。
收稿日期：2013-10-10

型面有一凹下部分，对于理论型面点，从 A 点反射的射线光程比从其它点反射的射线光程长[4]：

$$\Delta L = AB + BC = \Delta\rho + \Delta\rho\cos\varphi \tag{1}$$

而由此引起的最大相位偏差为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}\cdot\Delta\rho\cdot(1+\cos\varphi) \tag{2}$$

在图 1 中，从 F 点射向 B 点的电磁波就会比其它点多传播一段路程，即所谓的光程差，记为 2δ。半光程差 δ 是光程差的一半，即：

$$d = \Delta L \tag{3}$$

3 半光程差与法向误差的关系

目前，紧缩场天线测量多数采用激光跟踪仪或经纬仪，使用的测量软件大多为 SA 或 A-xyz，这些软件基于正交坐标系，实际测得是法向误差。天线电性能主要受曲面上各点半光程差的影响，半光程差越大，对天线电性能影响越坏，对于电检测来说，更关心的是衡量天线电性能的半光程差，因此弄清他们之间的关系十分必要。

图 2 说明了各项误差的关系。$\Delta\rho$ 为径向误差，Δn 为法向误差，ΔZ 为轴向误差，F 为焦点。从图中可以得到如下关系：

$$\Delta\rho = \Delta Z \tag{4}$$

$$\Delta n = \Delta Z\cos\frac{\psi}{2} = \Delta\rho\cos\frac{\psi}{2} \tag{5}$$

$$\frac{\delta}{2} = \Delta\rho\cos^2\frac{\psi}{2} = \Delta\rho\cos\frac{\psi}{2} = \Delta Z\cos^2\frac{\psi}{2} \tag{6}$$

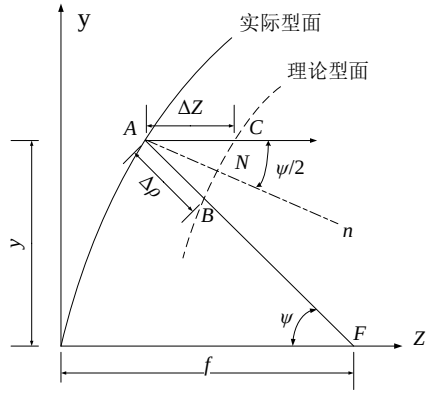

图 2 法向误差、轴向误差与径向误差的关系示意图

所以半光程差等于法向误差的轴向分量。根据抛物线的几何关系可以得出：

$$\cos\frac{\psi}{2} = \frac{2f}{\sqrt{4f^2+y^2}} \tag{7}$$

于是半光程差与法向误差的关系为：

$$\frac{\delta}{2} = \frac{2f\cdot\Delta n}{\sqrt{4f^2+y^2}} = \frac{\Delta n}{\sqrt{1+(y/2f)^2}} = \frac{\Delta n}{\sqrt{1+(r/2f)^2}} \tag{8}$$

因为反射面个别点的半光程差对于整个天线的电性能不起决定性的影响，而起决定作用的是整个反射面各点半光程差的均方根值，所以衡量天线反射面精度的应该是天线表面点的半光程差的均方根值。采集实际测量结果的反射面各点的法向误差，就可计算出半光程差的均方根值，具体计算过程采用考虑照射加权的半光程差计算公式如下[5]：

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum\Delta n_i^2\cos^2\frac{\psi_i}{2}\Delta A_i q_i}{A}} \tag{9}$$

式中：i 表示型面采集点，该点所属的口面面积为 ΔA_i，该点的照射强度为 q_i（$q_i<1$）；A 为口面总面积。

4 工程实际应用

北京航空航天大学已为航空、航天、兵器、电子和海军等多家单位研制了紧缩场 RCS 测量系统，在多种型号研制中发挥着重要作用。本项目是北航为中电集团某研究所建立的微波暗室测量系统，其中紧缩场天线反射面面板采用金属蜂窝夹层工艺制造，结构重量轻[6]。为保证整体型面精度，面板采取分块加工，分块面板通过调整机构与背架连接。采用激光跟踪仪对面板进行安装定位，通过六自由度调整机构面板精确调整到最优位置。面板分成九块，在口面的投影图见图 3。

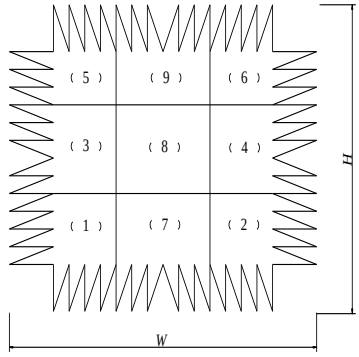

图 3 紧缩场面板分块图

抛物面反射面焦距为 F=8300.0mm；反射面宽度为 W=7500.0mm；反射面高度 H=6200.0mm；紧缩场馈源应提供在反射面实体内均匀照射，而在边缘区域尽可能减小照射功率，以获得最佳锥削口径分布，因此照射系数采用面板中心 0.9，边缘 0.6～0.7。

反射面数据采集采用莱卡公司最新的激光跟踪仪 AT901-B，使用的测量软件为 SA，扫描间距为 60mm，采集数据并处理结果如图 4 所示，其型面精度为 38.6μm，测得各点法向误差数据如表 1 所示。将表 1 中共 2901 个点的法向误差数值代入式（9），计算得出反映电气性能的半光程差为 33.05μm。

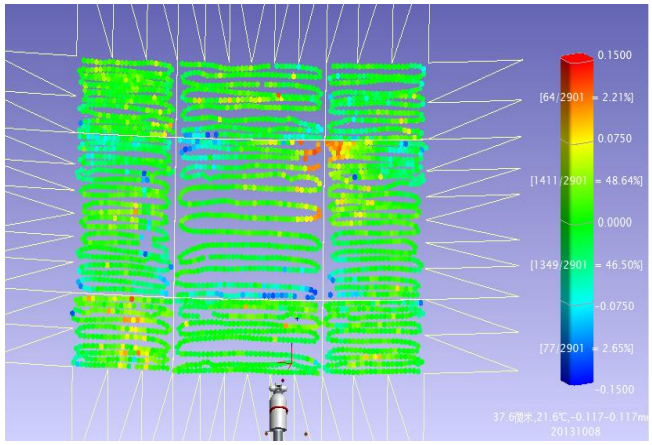

图 4　SA 处理的误差矢量图

表 1　测量软件 SA 采集的数据　　mm

	理论点			实测点			Δ			
面板	*x*	*y*	*z*	*x*	*y*	*z*	*dx*	*dy*	*dz*	*n*
9:S1	−970.148	5564.918	961.011	−970.15	5564.924	960.9918	−0.0011	0.0064	−0.0192	−0.0203
9:S2	−910.438	5559.869	955.937	−910.437	5559.865	955.9466	0.0005	−0.0032	0.0096	0.0101
…										
9:S294	967.2456	4754.772	709.0459	967.2483	4754.785	708.9995	0.0027	0.0133	−0.0464	−0.0484
8:S1	−979.759	4697.157	693.3871	−979.763	4697.176	693.3184	−0.0041	0.0194	−0.0687	−0.0715
…										
1:S227	−1119.43	2033.864	162.3355	−1119.43	2033.862	162.3509	0.001	−0.0019	0.0153	0.0155

5　结束语

本文推导出的公式得出反映电气性能的半光程差为 33.05μm，而激光跟踪仪采集并处理的法向误差为 38.6μm，由于两者已经存在直角三角形关系且前者略小于后者，因此两者平方差的方根极有可能是测量误差，有待后续的研究验证。

参考文献

1　王兆峻，陈五一. 大型紧缩场反射面板的变形分析与控制[J]. 航空学报，2004，25(4)：416～419

2　张晓平. 紧缩场超高频（UHF）天线测试方法的研究[J]. 航天器工程，2008，17(2)：63～68

3　李宗春，李广云. 天线几何量测量理论及其应用[M]. 北京：测绘出版社，2009

4　周国锋，李晓星. 基于半光程差的天线反射面型面精度检测[J]. 北京航空航天大学学报，2010，37(6)：723～727

5　叶尚辉等. 天线结构设计[M]. 西安:西北电讯工程学院出版社，1986

6　周贤宾，陈连峰，李东升. 反射器夹层面板精密成型原理[J]. 北京航空航天大学学报，2004，30(4)：296～300