

大口径望远镜反射面日照温度场效应 实验研究

付 丽¹, 王锦清¹, 徐 平²

(1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030; 2. 欧美大地有限公司, 上海 200135)

摘 要: 针对大口径射电望远镜主反射面在日照作用下产生温度梯度及形变问题, 建立了完整的温度测量及精度评估的系统。在特定的测量条件下, 利用红外热像仪测量了望远镜主反射面的温度, 获得了不同时刻的温度分布情况, 并得到最大温差为 7.8°C 。采用全息法分析主反射面的精度变化情况, 得到由于温度变化导致的最大误差为 0.33 mm 。结果表明: 温度对望远镜主反射面的精度影响较大, 需采取合适的测试系统实时监测温度, 并调整主反射面板以提高精度。

关 键 词: 射电望远镜; 日照温度场; 精度; 红外热像仪; 全息法

中图分类号: P111.44, P207

1 引 言

温度是影响大口径射电望远镜主反射面精度的重要因素之一^[1], 目前国内还没有办法很好地解决温度对主反射面的影响问题, 对于高频率的观测任务, 可采用天线罩^[2]或者在夜间观测^[3]的办法来避免日照对望远镜反射面精度的影响。美国的 GBT (Green Bank Telescope)^[4]、德国的 LMT (Large Millimeter Telescope)^[5] 及意大利的 SRT (Sardinia Radio Telescope)^[6] 采用或准备采用温度测量设备实时测量结构的温度变化情况。温度测试设备可以采用温度传感器和红外热像仪等。对于大口径的射电望远镜温度传感器需要布设大量的线路。相比之下, 红外热像仪能够有效、快速地对温度分布不均匀的大面积目标的表面温度场进行测量, 更适用于对大口径望远镜主反射面的测量。

日照会引起环境温度不断升高, 同时太阳从升起到降落的过程中会使望远镜主反射面上出现阴阳面, 上述 2 个因素会导致望远镜结构发生形变, 从而影响主反射面的精度。目前, 评估望远镜反射面精度的方法主要有摄影测量法^[7,8] 和全息法^[9,10] 等。对于大口径的望远镜, 摄影测量法需要布设轨道和粘贴标靶, 既耗时又麻烦, 而且该套设备价格昂贵; 而全息法只需要一个参考天线和一个射电源即可对反射面的精度进行测量, 所以优选此方法。

本文以上海佘山 25 m 射电望远镜为研究对象, 利用红外热像仪测量主反射面的温度, 采用全息法评估主反射面的精度, 目的是建立一套完整的适用于大口径射电望远镜结构的温度测量及精度评估系统, 该系统的测量结果将为提高望远镜的精度提供依据。

2 测量原理及步骤

2.1 红外热像仪

随着科学技术的不断发展, 红外热像仪已在军事、建筑及材料缺陷检测等方面得到了广泛应用。红外热像仪的组成如图 1 所示, 其工作原理以红外物理学为基础, 即任何温度高于绝对零度的物体均会向外界辐射能量。红外热像仪正是利用物体的这种辐射能量进行工作的系统。它首先运用光学系统将物体发出的红外辐射能收集起来, 经光机扫描后聚集于红外探测器上, 产生与物体温度有关的电子视频信号, 经放大处理后送显示器显示, 便能获得物体的红外热分布图像^[1]。

红外热像仪的工作流程如图 2 所示。在选择典型的测量点后, 结合热像仪的性能指标, 充分考虑距离系数, 确定热像仪的固定位置, 然后根据当时的环境温度对热像仪进行设定, 同时设定被测物体表面发射率所需的基础参数, 接下来便可使用红外热像仪对物体表面进行水平拍摄, 由此即可得到一个完整有效的红外热像图片, 最后使用红外热像仪的计算机图像处理与分析系统软件对红外热像图像进行数据处理。

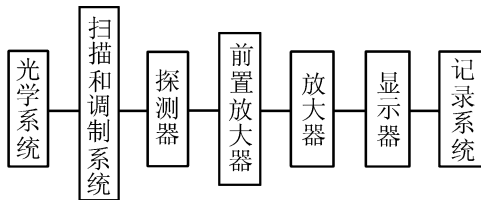


图 1 红外热像仪的组成

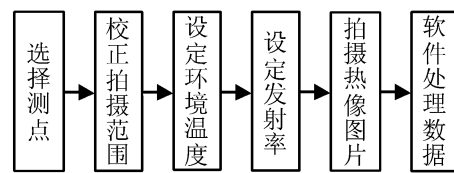


图 2 红外热像仪工作流程

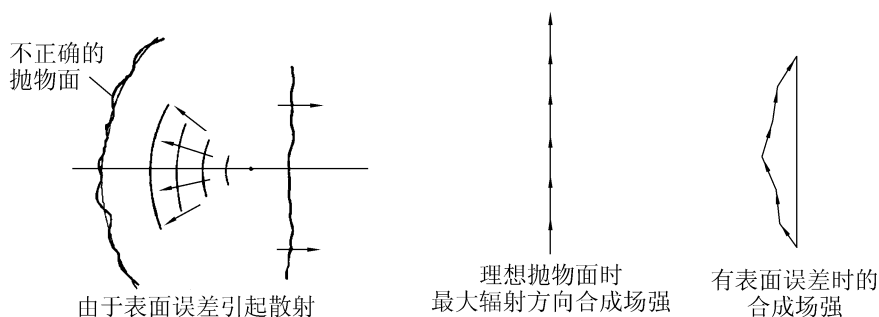
2.2 全息法

全息法是检测抛物面天线面形的重要方法, 该方法测量天线面表面精度的基本原理是: 通过测量复数平面内天线辐射的振幅和相位, 得到天线口径场的振幅和相位分布, 从而了解天线表面面形偏离抛物面的情况。其所依据的几何事实 (如图 3 所示) 是: 如果天线面是理想抛物面, 在焦点上的发射源发出的信号经过抛物面反射, 在口径平面上的波前相位值应该处处相等, 然而在现实情况下, 天线面不会是理想的抛物面, 所以在口径平面上的相位也必然不相等, 其变化情况包含了天线面与理想抛物面偏离的信息。在信号源波长已知的情况下, 通过检测相位差的变化, 从理论上就可以确定天线面与理想抛物面之间的微小差别。

利用全息法测量反射面精度时, 将参考天线对准信号源, 被测天线围绕信号源的方向以不同的方式对信号源进行网格扫描。随着扫描角度的变化, 被测天线输出的信号相位与固定的参考天线输出的相位就会产生差异, 在数据处理时要对这一相位差异进行补偿, 然后才能获得真实的相位和振幅。

3 25 m 望远镜日照温度场效应实验及结果

本实验以上海佘山 25 m 射电望远镜为研究对象, 该望远镜采用 2.45, 2.8, 3.6, 6, 13, 18, 21, 92 cm 8 个工作频段, 主反射面精度要求 $RMS \leq 0.8 \text{ mm}$, 而日照温度场是影响反射面精

图3 反射面误差引起增益损失^[12]

度的重要因素之一,因此本实验目的是分析主反射面的温度分布情况,同时分析温度变化导致主反射面的精度变化情况。

3.1 主反射面温度测量

在2010年8月13日,以上海佘山25 m射电望远镜(图4)为实验对象,以红外热像仪(图5)为测试设备,测量主反射面的温度。实验当天气温 $31\sim 39^{\circ}\text{C}$,西南风3~4级。



图4 25 m射电望远镜



图5 红外热像仪

测量目标为25 m口径的抛物面天线,面板材料为铝,并涂有乳胶漆,天线的方位角为 58° ,俯仰角为 10° 。为保证水平拍摄到整体抛物面,将热像仪固定在50 m以外的平台上,根据天线终端处理机上显示的当时的环境温度对热像仪进行设定,同时设定反射面表面发射率所需的基础参数,接下来使用红外热像仪对主反射面进行水平拍摄,最后使用图像处理软件对红外热像图像进行数据处理。

经数据处理后得到不同时刻主反射面的温度分布情况,图6和图7分别为6:50和14:00时主反射面的温度分布云图,图8为当天各时刻的温度情况。由图可知:在早上7:00左右,天线主反射面没有被太阳照射,温度分布较均匀,最大温差为 1°C ;在8:00时,太阳已经开始照到主反射面,阴阳面最大温差在 5°C ;在10:00时,随着太阳的逐渐上升及环境温度的逐渐升高,主反射面的整体温度都有所升高,最大温差为 6.9°C ;在中午12:00时,主反射面的整体温度继续上升,最大温差为 7.5°C ;在14:00时,主反射面上的个别点温度达到了最高值 48.6°C ,最大温差为 7.8°C ;在16:00时,随着环境温度的下降及太阳的逐渐下降,主反射面

的整体温度有所回落, 最大温差为 5.5°C 。太阳辐射与太阳方位角和高度角有关, 方位角决定了阳光的入射方向, 高度角与地面的太阳光强弱密切相关, 这就是导致早晚与中午的温度分布有很大差异的原因。由此可得: 在整个白天的温度测量中, 早上反射面温度分布均匀, 整体温度相对最低, 适宜观测; 在下午 14:00 时, 主反射面的整体温度最高, 温差最大, 应尽量避免在此时进行高频率的观测任务, 或者采取措施实时调整主反射面的精度。

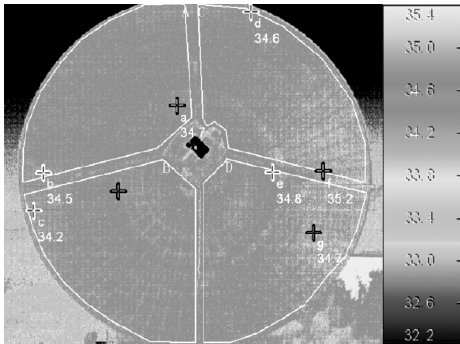


图 6 6:50 时反射面温度分布

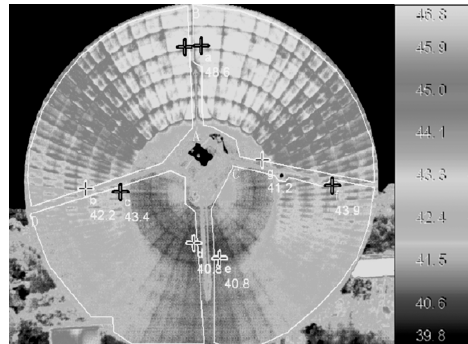


图 7 14:00 时反射面温度分布

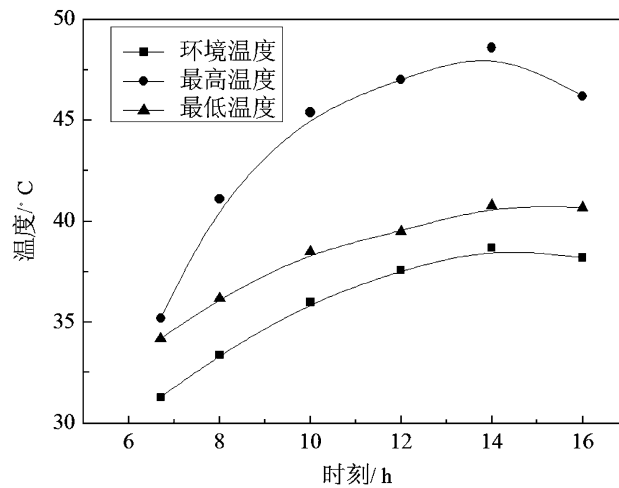


图 8 当天各时刻的温度

3.2 主反射面精度评估

在测量上海佘山 25 m 射电望远镜主反射面温度的当天, 利用全息法分析了从中午到晚上的温度变化引起主反射面精度的变化情况。测量过程中使用的主要设备有: 被测天线、参考天线、2 部卫星接收机、两通道相关机、1 台通用计算机。各部分在测量过程中的作用及连接如图 9 所示。

测量温差引起的反射面精度变化的主要思路是: 在中午时, 将 1.5 m 的参考天线对准卫星, 然后被测天线以十字扫描法寻找卫星, 以五点扫描法确认指向卫星的正确性, 以蝶形扫描法对信号源进行网格扫描, 最后对输出的信号进行数据处理, 得到温度和重力等因素引起

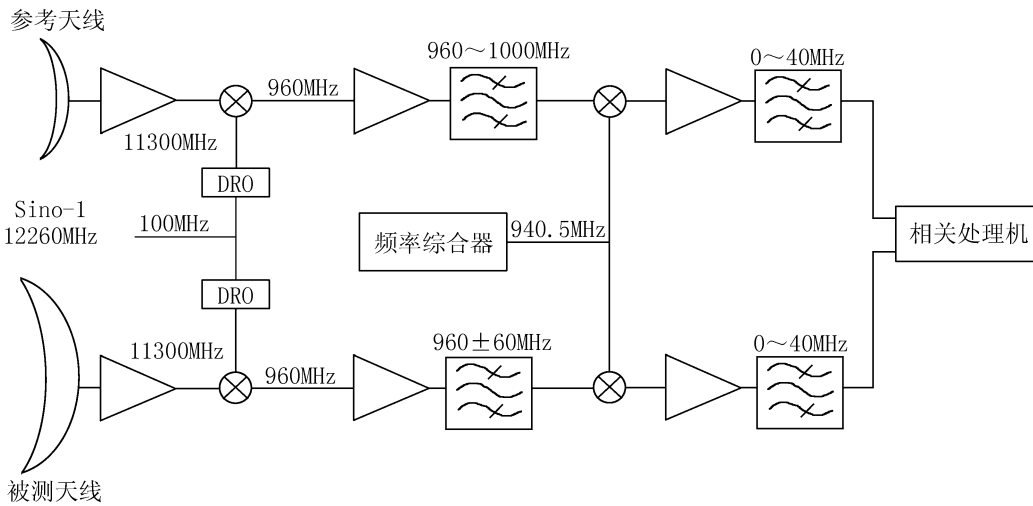


图9 全息法测量框图 [9]

的主反射面的形变情况；在晚上，重复上述工作，得到此时的温度和重力等因素引起的主反射面形变。将中午和晚上得到的形变量做差，便获得由于温度变化引起的主反射面形变 (图 10)，然后利用概率与数理统计的方法计算出形变导致的主反射面精度变化 (图 11)。

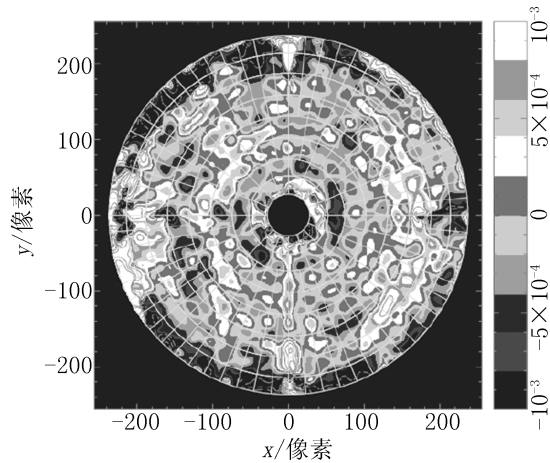


图10 温差引起的反射面形变

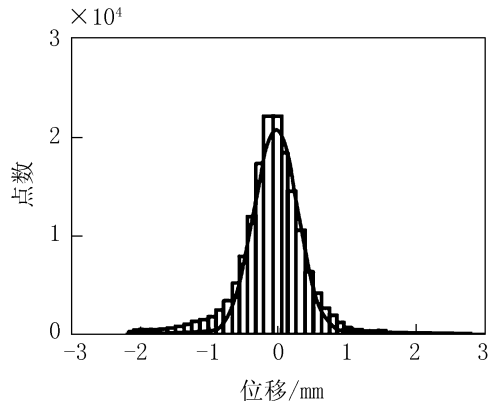


图11 形变导致的反射面精度变化

日照使得望远镜主反射面产生非均匀的温度场，在不同时刻主反射面的这种非均匀温度分布会有所差别，即存在温差，温差会导致主反射面的应力及应变发生变化，从而引起主反射面形变。温差与应变的关系可表述为

$$\epsilon = \alpha \Delta T \quad (1)$$

式中， ϵ 为应变， α 为面板材料的热膨胀系数， ΔT 为不同时刻面板的温差。

从图 10 的反射面形变图 (反射面最外环由于噪声的影响，不具有参考价值) 中可以看出：反射面的大部分位置形变均匀，只有在右下角处形变较大，分析主要原因是中午太阳照射在

此位置,而在晚上反射面无太阳照射,因此此处温差偏大导致形变也相对较大。经统计(共 174 076 个点)获得,由于温差导致的主反射面的精度变化为 0.33 mm,说明温度是影响反射面精度的一个重要因素。

需要说明的是:测量主反射面温度时,为保证水平拍摄到整体主反射面,天线的方位角为 58° ,俯仰角为 10° ;而在测量主反射面的精度时,天线需要跟踪卫星信号,方位角为 200° ,俯仰角为 50° 。因此,测得的温度分布与反射面精度不存在直接的对应关系,但是二者在各自方面均能够说明一定的问题。

进一步的工作是安装测量网定位辅助装置,保证望远镜旋转到任意位置红外热像仪均能水平拍摄主反射面,建立温度测量与精度评估的直接关系,提供日照作用下天线主反射面的温度分布及由此导致的主反射面精度变化的实验数据,为大口径望远镜主反射面的精度控制提供依据。另外,天线背架的温度分布不均匀性是引起反射面面形误差的重要因素之一,在后续的工作中需仔细分析。

4 结 论

(1) 对于大口径射电望远镜,可以利用红外热像仪和温度传感器分别测量主反射面和背架及座架上局部点的温度,采用全息法评估主反射面的精度,测量结果结合有限元分析,为主反射面板的调节提供依据,实现温度的实时监测和面板的实时调整。

(2) 在特定的测量条件下,利用红外热像仪测得:在早上 7:00 左右,反射面温度分布均匀,局部点温度与环境温度接近,适合观测;日照产生的阴阳面导致望远镜主反射面的最大温差发生在 14:00,最大温差为 7.8°C ,应尽量避免在此时观测或者进行实时调整。

(3) 在特定的测量条件下,从太阳升起到降落过程中,日照导致望远镜主反射面精度的最大变化量为 0.33 mm,由此说明温度是影响反射面精度的重要因素之一,应采取措施进行调节。

参考文献:

- [1] Kaercher H J, Baars J W. Proc SPIE, 2000, 4015: 155
- [2] Doyle K B. Proc SPIE, 2009, 7427: 12
- [3] Morris D, Bremer M, Butin G et al. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2009, 3(1): 99
- [4] Nikolic B, Prestage R M, Balsler D S et al. Astronomy & Astrophysics, 2007, 465: 685
- [5] Kaercher H J. Proc SPIE, 2004, 5382: 233
- [6] Grueff G, Alvito G, Ambrosini et al. Mem S A It Suppl, 2004, 5: 351
- [7] 范钦红, 范生宏, 左营喜等. 天文学报, 2010, 51(2): 210
- [8] Richard S P, Louis R G, Jessica M Q. Experimental Techniques, 2001, 25(4): 550
- [9] 王锦清, 余宏. 中国科学院上海天文台年刊, 2007, 28: 109
- [10] Yu H. Microwave and Technology Letters, 2007, 49(2): 467
- [11] Hassani V. Ashrae Transactions, 1994, 100(2): 1238
- [12] 朱钟淦, 叶尚辉. 天线结构设计, 北京: 国防工业出版社, 1980: 203

Experimental Study on the Effect of Temperature Field under Sunshine on the Reflector of Large Telescope

FU Li¹, WANG Jin-qing¹, XU Ping²

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030; 2. Earth Technologies Limited, Shanghai 200135)

Abstract: For issues of temperature gradient and deformation of the primary reflector of large radio telescope under sunshine, a complete test system consisting of temperature measurement and surface accuracy estimation is established. Employing thermal infrared imager under the specific test condition, the temperature distribution of primary reflector at different time is obtained as well as the largest temperature difference of 7.8°C. The surface accuracy of primary reflector is estimated by holography with largest error of 0.33 mm, which is caused by temperature variation. It is shown that the temperature greatly affects surface accuracy of primary reflector. As a result, we can monitor the real-time temperature of primary reflector and adjust the panel to improve surface accuracy utilizing the reasonable test system.

Key words: radio telescope; temperature field under sunshine; surface accuracy; thermal infrared imager; holography