倾斜仪在提高TM65 m射电望远镜指向精度上的应用

虞林峰^{1,2*}, 王锦清^{1,2,3}, 蒋甬斌^{1,2}, 江永琛^{1,2}, 赵融冰^{1,2}, 苟伟^{1,2}

1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030;

2. 中国科学院射电天文重点实验室, 南京 210008;

3. 上海市空间导航与定位技术重点实验室, 上海 200030

*联系人, E-mail: lfyu@shao.ac.cn

收稿日期: 2019-07-10; 接受日期: 2019-08-09; 网络出版日期: 2019-10-23

国家重点研发计划(编号: 2018YFA0404702)、国家自然科学基金(编号: 11873015)和中国科学院关键技术人才项目资助

摘要 本文主要论述了上海天文台天马65 m射电望远镜(以下简称为TM65 m)如何利用倾斜仪来提高其指向精度. 首先对倾斜仪的型号特点及其安装作了介绍, 然后通过扫描射电源法比较了白天和夜晚指向差异的情况, 通过与倾斜仪测量数据的比较分析了这一差异主要是温度梯度引起望远镜座架变形导致的, 并利用倾斜仪的数据对其进行了有效的补偿. 另外本文还介绍了用倾斜仪对TM65 m轨道不平度进行测量, 根据望远镜自身特点, 得到了“不同俯仰上的轨道不平度”, 比较了指向模型在分离轨道不平度前后的拟合精度, 讨论了轨道模型分离后对指向模型精度提升的有效性.

关键词 射电望远镜, 指向精度, 倾斜仪, 轨道不平度

PACS: 95.55.Jz, 06.30.Bp, 07.50.Qx, 07.07.Df

1 概述

大口径射电望远镜不仅让射电天文学家观测到更弱和更遥远的目标, 也在深空探测中发挥了重要的作用. 指向精度作为射电望远镜的一项重要指标, 直接关系到能否充分发挥望远镜的性能, 对于深空站的大天线来说, 更高的指向精度还意味着更高的数据率. 通常我们认为望远镜的指向精度好于1/10波束^[1]宽度

望远镜才能高效地工作, 而望远镜的波束宽度跟它的口径大小和工作频率成反比, 越来越大的口径和越来越高的工作频率对望远镜的指向精度提出了越来越高的要求, 以TM65 m为例, Ka波段32 GHz以上, 1/10波束宽度为4"左右, 这是一个很大的挑战.

在实践中我们发现, 由于受到太阳照射、风和温度等因素影响, 白天指向的随机检测误差明显大于夜晚, 因此在建立指向模型的数据采集^[2]通常都在晴朗

引用格式: 虞林峰, 王锦清, 蒋甬斌, 等. 倾斜仪在提高TM65 m射电望远镜指向精度上的应用. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49: 129502
Yu L F, Wang J Q, Jiang Y B, et al. Using inclinometer to improve the pointing accuracy of TM65 m radio telescope (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2019, 49: 129502, doi: 10.1360/SSPMA-2019-0251

的夜晚进行, 然而望远镜工作是不分昼夜的, 如何修正白天环境因素引起的指向误差就摆在了我们的面前.

对于一架射电望远镜, 从顶往下, 指向的偏差主要来源于这样几个方面: (1) 副面支撑的温度效应和风扰动导致的副面支撑伸缩、副面横偏和转角; (2) 主面变形导致上下和左右抛物面光轴的偏移; (3) 天线座架结构温度梯度导致的望远镜整体倾斜^[3]; (4) 机械轴和码盘轴安装不同心或有扭力作用; (5) 伺服控制误差; (6) 指向模型的合理性^[4].

本文将以上海天文台天马65 m射电望远镜(TM 65 m)为例, 首先介绍倾斜仪的安装, 然后就座架的温度变化导致的指向变化进行检测并尝试进行实时补偿, 最后讨论一种利用倾斜仪测量轨道不平度, 将其从指向模型中分离出来, 以提高指向模型精度的方法.

2 倾斜仪的安装

我们选用两台瑞士徕卡Nive1220双轴带有温度传感器, rs485接口, 分辨率0.2", 零点稳定度 $<0.97''/^{\circ}\text{C}$, 采样周期300 ms的倾斜仪分别安装在天马望远镜俯仰轴的两端^[5], 平行于俯仰轴的为Y方向, 垂直于俯仰轴的为X方向, 如图1, 然后调平倾斜仪, 使其初始静态读数尽量靠近零点^[6]. 并对倾斜仪进行恒温控制^[7], 以保证在测量范围内具有最好的精度. 通过串口读取两个轴向的读数以及温度, 倾斜仪的读数存在一定的噪声, 对其进行滤波处理后进行每秒1点的记录.

图 1 (网络版彩图)倾斜仪安装于俯仰轴两端

Figure 1 (Color online) Two inclinometers are installed at ends of elevation axis.

3 座架变形对指向的影响

如图1所示, 由于倾斜仪X方向与天线的俯仰方向一致, 因此倾斜仪X方向的读数可以直接反映望远镜俯仰方向上的指向偏差

$$D_{EL} = D_X. \quad (1)$$

通常认为倾斜仪Y方向的读数变化可以反映出俯仰轴的倾斜量^[8,9], 于是

$$D_{XEL} = -D_Y \sin(EL). \quad (2)$$

则望远镜方位方向上的指向偏差为

$$D_{AZ} = -D_Y \tan(EL). \quad (3)$$

3.1 白天夜晚指向差异

为了弄清楚望远镜白天和夜晚指向变化的规律, 我们找到了北极附近的一颗源2344+8226, 由于它全天可见, 且对于TM65 m方位和俯仰的跨度分别是 20° 和 15° , 如图2, 在这样的小范围内我们认为望远镜的指向偏差是相对固定的. 我们对这颗射电源进行不间断的十字扫描, 利用这颗源我们对望远镜的指向进行了30多个小时的监测, 可以发现从北京时间早上7–8点钟开始俯仰的指向出现了明显的恶化, 直到下午4–5点钟太阳下山, 才开始恢复, 如图3(a); 而方位方向的指向除了一段时间内弥散加大并没有出现整体的偏差, 如图3(b). 事实上, TM65 m在由俯仰角 88° – 10° 的旋转过程中, 俯仰轴会发生翘曲变形^[10], 倾斜仪Y方向上

图 2 (网络版彩图)2344+8226轨迹

Figure 2 (Color online) Orbit of 2344+8226.

图 3 (网络版彩图)2344+8226俯仰(a)和方位(b)方向指向偏差监测

Figure 3 (Color online) Pointing error in elevation (a) and azimuth (b) of 2344+8226.

的读数不能很好地反映俯仰轴的倾斜. 因此本文将 TM65 m 俯仰方向的指向误差作为主要研究对象.

在更大的天区范围内, 3C84和Dr21两颗射电源的轨迹十分接近, 在俯仰相同的情况下, 方位的差别在 5° 以内, 如图4, 是一组理想的比较对象. Dr21是在上午10点左右升起, 它的整个上升段在白天, 下降段又在晚上, 而3C84的上升和下降段都是在晚上. 在X波段对两颗源交替进行十字扫描, 来检测它们从升起至落下

整个弧段的指向偏差, 并分别对它们的上升段和下降段的数据进行比较, 如图5(a)和(c), 两者的上升段分别在白天和晚上, 指向的差异十分显著, 最大将近有 $30''$, 而到了晚上下降段的指向偏差就趋于一致了.

前文进行的两组比较, 天线都指向了北天区, 用同样的方法对南边天区的两颗源3C273B和2134+00进行比较, 二者的上升段均在夜晚而前者的下降段在夜晚, 然而两者无论是上升还是下降阶段,

图 4 (网络版彩图)3C84和Dr21轨迹

Figure 4 (Color online) Orbits of 3C84 and Dr21.

图 5 (网络版彩图)(a), (b), 3C84和Dr21上升段指向和倾斜仪差异; (c), (d), 3C84和Dr21下降段指向和倾斜仪差异

Figure 5 (Color online) (a), (b), Difference of pointing error and inclinometer data between 3C84 and Dr21 during their rising period; (c), (d) difference of pointing error and inclinometer data between 3C84 and Dr21 during their falling period.

指向的差异并不明显, 如图6(a)和(c). 这主要是因为南天观测时, 太阳光照主要位于天线反射面, 而并非座架, 因此温度效应不明显, 这是与上述3C84和Dr21北天源分布的最大差异.

3.2 倾斜仪数据的比较

为了分析望远镜座架变形倾斜和指向的关系, 在进行3.1节所述的三项实验时, 我们在扫描射电源监测

指向的同时也对倾斜仪的数据进行了记录, 在获得数据后, 与解算得到的指向偏差进行比较, 图7所示是进行第一项实验时对应时间段的倾斜仪数据, 由于在进行不间断的十字扫描, 望远镜需要频繁地摆动, 因此倾斜仪的数据弥散稍大, 但是整体的走势和指向偏差是一致的. 对于第二个实验, 同样, 将3C84和Dr21的上升段和下降段分别和倾斜仪数据作比较, 得到了图5(a)–(d), 两者同样保持着高度的一致性. 而3C273B

图 6 (网络版彩图)(a), (b), 3C273B和2134+00上升段指向和倾斜仪差异; (c), (d), 3C273B和2134+00下降段指向和倾斜仪差异

Figure 6 (Color online) (a), (b), Difference of pointing error and inclinometer data between 3C273B and 2134+00 during their rising period; (c), (d), difference of pointing error and inclinometer data between 3C273B and 2134+00 during their falling period.

图 7 (网络版彩图) 2344+8226 指向偏差与对应倾斜仪数据

Figure 7 (Color online) Pointing error of 2344+8226 and data of the inclinometer.

和 2134+00 这两颗南边天区的源, 情况有些不一样, 白天和夜晚倾斜仪的数据同样没有显著的差异, 如图 6(a)–(d), 这主要是因为对于南天的源, 望远镜一直指向南边, 太阳照射主要集中在面板和副面及其撑腿上, A 字梁的温度效应弱化. 而前两项实验中的三颗源则在北天区, 情况刚好相反, A 字梁和天线背架位于太阳的直射位置.

考虑到倾斜仪的温度效应, 不同季节以及白天和晚上的温差较大, 我们对倾斜仪进行了恒温处理. 然后重新对 3C84 和 Dr21 进行了对比测试, 并且尝试用指向偏差减去对应时刻的倾斜仪的读数, 剩余的量便是轨道的基础不平度和小部分指向检测误差. 从图 8 和 9

可以看到, 通过倾斜仪补偿后得到的轨道不平度趋势完全一致, 说明在动态观测过程中, 白天望远镜座架热变形导致的指向偏差得到了倾斜仪有效的补偿. 因此我们认为在北边天区, 白天和晚上的指向差异主要来自于温度变化对于望远镜座架产生的整体倾斜, 使用倾斜仪的数据可以对其进行很好的补偿. 而对于南边天区, 情况则要复杂一些, 由于阳光基本上都直射在主反射面、副面及其撑腿上, 座架的形变相对较小, 指向差异主要来源于主面变形和副面撑腿变形导致的副面位置偏移这两部分的叠加, 这需要用到副面位置传感器 (Position Sensitive Device, PSD) 来检测然后分离^[11], 这里不作展开.

图 8 (网络版彩图) 3C84 和 Dr21 白天晚上指向偏差和倾斜仪读数

Figure 8 (Color online) Pointing error and inclinometer data of 3C84 and Dr21 respectively in day and night.

图 9 (网络版彩图) 倾斜仪补偿后两者偏差一致

Figure 9 (Color online) The errors come to be consistent after compensated with the data of inclinometer.

4 轨道基础不平度的测量

天马望远镜轨道直径42 m, 前后轮距离30.5 m, 假设轨道面有最大不平点0.5 mm, 则会引起座架倾斜约 0.001° (3.6"). 由于其轨道本身并不能保证理想平整, 倾斜仪的读数必须扣除掉基础的轨道不平度才能用于指向偏差的补偿. 在天气平稳的夜晚, 保持望远镜俯仰朝天固定, 方位以 $0.1^\circ/\text{s}$ 的速度从 0° 到 360° 转一圈, 同时以每秒1点的速度记录倾斜仪读数和对应的方位角度^[12], 对此数据进行8项 $\sin(AZ)$ 函数的拟合, 如式(4), 其中 $x=AZ(i)$, 得到表1所列各项参数, 残差为0.6"

(RMS), 如图10, 如此可以得到TM65 m轨道的基础模型.

$$f(x) = a_1 \cdot \sin(b_1 \cdot x + c_1) + a_2 \cdot \sin(b_2 \cdot x + c_2) + a_3 \cdot \sin(b_3 \cdot x + c_3) + a_4 \cdot \sin(b_4 \cdot x + c_4) + a_5 \cdot \sin(b_5 \cdot x + c_5) + a_6 \cdot \sin(b_6 \cdot x + c_6) + a_7 \cdot \sin(b_7 \cdot x + c_7) + a_8 \cdot \sin(b_8 \cdot x + c_8). \quad (4)$$

5 不同俯仰上的轨道模型

上文提到, TM65 m在不同的俯仰上, 由于上部结

图 10 (网络版彩图) 对倾斜仪测得的望远镜轨道基础数据进行拟合

Figure 10 (Color online) Fitting the data of track unevenness measured by inclinometers.

表 1 轨道模型各参数值

Table 1 Parameters of the model of track

参数	值	参数	值	参数	值
a_1	39.68	b_1	0.1208	c_1	2.584
a_2	15.81	b_2	0.5164	c_2	4.276
a_3	1.286	b_3	2.382	c_3	1.318
a_4	1.761	b_4	2.829	c_4	-1.882
a_5	0.7861	b_5	9.997	c_5	-2.617
a_6	0.5186	b_6	6.858	c_6	1.35
a_7	0.5802	b_7	4.969	c_7	0.9364
a_8	0.5914	b_8	8.694	c_8	4.018

构重力的作用, 俯仰轴会发生翘曲变形, 整个座架也有一定程度的倾斜. 采用上一节的方法, 在不同的俯仰角上, 方位旋转一周测得的倾斜仪数据如图11, 在不同俯仰上, 倾斜仪的读数存在着差异, 这部分差异无论是在实时补偿热变形还是分离轨道模型进行全天区拟合时都必须予以扣除. 尽管这部分差异并不是轨道本身造成的, 为了方便起见, 我们还是把这些曲线叫作不同俯仰上的轨道模型. 在天线指向某颗目标时, 软件运用查表的方法来进行扣除.

6 分离轨道模型前后指向模型比较

TM65 m当前采用的指向模型是如式(5)和(6)所示19项参数模型, 其中 $p1-p8$ 为传统的指向模型, $p9-p19$ 均为机动、临时的参数, 具体可以参考《VLBI终端FS手册》. 我们注意到模型中本身可以拟合掉一些低频次的轨道波动, 而从上一节我们测得的轨道基础模型

图 11 (网络版彩图)不同俯仰上的轨道模型

Figure 11 (Color online) The track model of different elevations.

看, 轨道不仅有一个缓慢变化的过程, 其中还包含有许多小幅度的抖动, 指向模型是不容易将其拟合掉的. 为此, 我们尝试了将轨道模型从指向模型中分离出来, 在天气晴朗的夜晚, 进行全天区的数据收集, 对同一个射电源分别进行一次分离轨道模型和不分离轨道模型的扫描, 得到全天区数据后对分离的和未分离的数据分别进行解算和模型拟合, 来比较这一对数据的模型拟合误差. 我们总共收集了4对这样的数据, 这四对数据最后模型拟合误差的统计如表2.

$$\begin{aligned} \Delta AZ = & p1 + \tan(EL) \cdot \cos(AZ) \cdot p3 \\ & + \tan(EL) \cdot \sin(AZ) \cdot p4 + \tan(EL) \cdot p5 \\ & - 1 / \cos(EL) \cdot p6 + AZ \cdot p11 + \cos(AZ) \cdot p12 \\ & + \sin(AZ) \cdot p13 + \cos(2 \cdot AZ) \cdot p16 \\ & + \sin(2 \cdot AZ) \cdot p17, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \Delta EL = & p2 - \sin(AZ) \cdot p3 + \cos(AZ) \cdot p4 \\ & + \cos(EL) \cdot p7 + 1 / \tan(EL) \cdot p8 \\ & + EL \cdot p9 + \sin(EL) \cdot p10 + \cos(2 \cdot AZ) \cdot p14 \\ & + \sin(2 \cdot AZ) \cdot p15 + \cos(8 \cdot EL) \cdot p18 \\ & + \sin(8 \cdot EL) \cdot p19. \end{aligned} \quad (6)$$

可以看到, 4组数据在分离轨道不平度模型后全天区的指向模型都有一定的提高, 这一结果与之前的分析是符合的.

7 总结

应用倾斜仪在TM65 m上进行的一系列实验表明, 倾斜仪数据能够较好地反映出望远镜由于各种因素导致的座架变形, 利用倾斜仪读数实时地补偿因为座架变形引起的指向偏差, 对于白天指向出现恶化这一情况提供了一个有效的解决方案; 而利用倾斜仪测量望

表 2 分离轨道模型前后指向模型残差

Table 2 Residual of pointing model before and after separate the track model

组别	分离轨道模型前后, 指向模型拟合残差(")	
	不分离	分离后
第一组	6.36	5.71
第二组	4.23	3.90
第三组	4.28	3.80
第四组	6.35	6.01

远镜的轨道不平度, 然后将轨道模型从指向模型中分离出来的方法, 对于提高指向模型的拟合精度也有一定的帮助, 对于追求更进一步的指向精度是一种值得尝试的手段.

参考文献

- 1 Levy R. Structural Engineering of Microwave Antennas. New York: IEEE Press, 1996
- 2 Yu L F, Wang J Q, Zhao R B, et al. The establishment of pointing model for the TM65 m radio telescope (in Chinese). *Chin Astron Astrophys*, 2015, 56: 165–177 [虞林峰, 王锦清, 赵融冰, 等. TM65 m射电望远镜指向模型的建立. *天文学报*, 2015, 56: 165–177]
- 3 Constantikes K. Thermally-neutral Traditional Pointing Model Sand Thermal Corrections to Pointing and Focus. Technical Report, NRAO, PTCS Project Note 25. 2003
- 4 Wang J Q, Yu L F, Zhao R B, et al. High precision pointing error detection method for large radio telescope (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2017, 47: 129504 [王锦清, 虞林峰, 赵融冰, 等. 大型射电望远镜高精度指向检测方法. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2017, 47: 129504]
- 5 Pisanu T, Buffa F, Morsiani M, et al. Thermal behavior of the Medicina 32-meter radio telescope. In: *Proceedings of the Conference on Modern Technologies in Space- and Ground-Based Telescopes and Instrumentation*. San Diego, 2010
- 6 Fu L, Ling Q B, Zhao R B, et al. Settlements of foundation and track of TM65 m and its effect on antenna pointing (in Chinese). *Infrared Laser Eng*, 2016, 45: 183–189 [付丽, 凌权宝, 赵融冰, 等. TM65 m天线基础和轨道沉降及对天线指向的影响. *红外与激光工程*, 2016, 45: 183–189]
- 7 Sun J X, Zuo Y X, Yang J, et al. Thermal deformation of the Delingha 13.7 m telescope (in Chinese). *Acta Astron Sin*, 2014, 3: 246–255 [孙继先, 左营喜, 杨戟, 等. 德令哈13.7 m望远镜热变形研究. *天文学报*, 2014, 3: 246–255]
- 8 Pisanua T, Buffaa F. The SRT inclinometer for monitoring the rail and the thermal gradient effects on the alidade structure. *Proc SPIE*, 2014, 9145: 91454R
- 9 Gawronski W, Baher F, Gama E. Track level compensation look-up table improves antenna pointing precision. *Proc SPIE*, 2006, 6273: 627316
- 10 Fu L, Dong J, Ling Q B, et al. Effect of gravity deformation of Tianma telescope structure on the surface and pointing accuracy (in Chinese). *Chin J Radio Sci*, 2017, 32: 314–322 [付丽, 董健, 凌权宝, 等. 天马望远镜结构重力变形对面形和指向精度影响. *电波科学学报*, 2017, 32: 314–322]
- 11 Pisanu T, Buffa F, Concu R, et al. A PSD to map the shift and tilt of the SRT secondary mirror. *Proc SPIE*, 2014, 9145: 91454U
- 12 Jiang Z Y, Kong D Q, Zhang H B, et al. A method to calibrate pointing errors of a radio telescope including roughness of the telescope rail track (in Chinese). *Astron Res Tech*, 2015, 12: 417–423 [姜正阳, 孔德庆, 张洪波, 等. 考虑轨道不平度的射电望远镜指向修正方法. *天文研究与技术*, 2015, 12: 417–423]

Using inclinometer to improve the pointing accuracy of TM65 m radio telescope

YU LinFeng^{1,2*}, WANG JinQing^{1,2,3}, JIANG YongBin^{1,2}, JIANG YongChen^{1,2},
ZHAO RongBing^{1,2} & GOU Wei^{1,2}

¹ Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;

² Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

³ Shanghai Key Laboratory of Space Navigation and Positioning Technology, Shanghai 200030, China

This paper mainly discusses how the inclinometer be used on the Tianma 65-meter radio telescope of Shanghai Astronomical Observatory (TM65 m) to help to improve the pointing accuracy. Firstly, the model and installation of the inclinometer are described. Then, the difference of pointing errors between day and night is introduced, after be compared with the data of the inclinometer, the tilt of the mount caused by the thermal gradient is considered as the source. After that, the data is tried to be used to compensate the difference. Moreover, the unevenness of the track is measured by the inclinometer, according to the characteristics of TM65 m, “the track unevenness of different elevation” is acquired, the data are separated from the pointing model. The improvement of accuracy of pointing model is described.

radio telescope, pointing accuracy, inclinometer, track unevenness

PACS: 95.55.Jz, 06.30.Bp, 07.50.Qx, 07.07.Df

doi: [10.1360/SSPMA-2019-0251](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2019-0251)