



大型射电望远镜高精度指向偏差检测方法

王锦清^{1,2,3*}, 虞林峰^{1,2}, 赵融冰^{1,2}, KESTEVEN Michael¹, 付丽^{1,2}, 蒋甬斌^{1,2}, 苟伟^{1,2}, 郭文^{1,2}, 江永琛^{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: jqwang@shao.ac.cn

收稿日期: 2017-03-20; 接受日期: 2017-05-08; 网络出版日期: 2017-10-20
大型射电望远镜重力模型构建关键技术研究基金(编号: U1531135)资助项目

摘要 本文首先论述了影响大型射电望远镜高精度指向偏差的主要因素, 然后以天马65 m射电望远镜(TM65 m)为实测对象, 介绍了从天线副面开始到轨道之间, 分离检测各项指向偏差的方法, 包括: 评估整体天线指向偏差的半功率点检测法; 检测副面支撑位置变化导致指向偏差的方法; 检测天线座架因温度变化导致指向偏差的方法; 检测机械轴和码盘轴之间不同步导致指向偏差的方法; 基于轨道不平度数据进行高精度指向建模的方法. 文中给出了几种方法实测过程和结果, 并对结果进行了分析和讨论.

关键词 天线指向, 延时, 回隙, 温度, 倾斜仪

PACS: 06.30.Bp, 07.87.+v, 07.05.Fb, 07.57.Hm, 07.50.Qx

对于精密的大口径射电望远镜而言, 指向精度是十分重要的, 当指向偏差为波束宽度的1/10时, 导致的天线效率损失为2.7%; 当指向偏差为波束宽度的1/5时, 天线效率损失为10.5%, 因此普遍要求天线的指向偏差好于1/10波束宽度. 以天马65 m望远镜为例, Ka波段32 GHz以上, 将有很大的挑战性, 因为1/10波束宽度约为4", 伺服控制误差、温度、联轴节、风等因素带来的影响很容易突破这个误差范围, 必须考虑多种检测手段来研究这些问题.

要准确检测、补偿一架望远镜的各项指向误差是比较困难的, 65 m上总体的指向分配误差如表1, 备

注栏里给出了数据的来源、检测或补偿的方法.

在表1中, 结构误差、环境误差和伺服误差合成了指向误差, 深入研究表1中较大的系统性指向偏差, 主要来源于以下6个方面: (1) 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) 背架温度变形导致抛物面光轴的偏移; (3) 天线座架结构温度梯度导致的望远镜整体倾斜^[1]; (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) 重力模型拟合时, 指向模型不够合理. 采用射电法可以通盘评估上述6个问题导致的综合指向误差, 采用工业法可以分离测量各个方面导致的误差. 对于上述几个方

引用格式: 王锦清, 虞林峰, 赵融冰, 等. 大型射电望远镜高精度指向偏差检测方法. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47: 129504
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, doi: [10.1360/SSPMA2017-00077](https://doi.org/10.1360/SSPMA2017-00077)

表 1 指向误差分配表
Table 1 Pointing error budget

误差来源		修正前 (")	修正后 (")	备注	
结构误差	轨道不水平	6	0.5	倾斜仪	
	方位俯仰不垂直	1	0.5	仿真设计	
	俯仰码盘连接轴不同步	2	0.5	仿真设计	
	俯仰码盘连接轴不同步	5	1.0	-	
	俯仰重力变形	22	1.2	射电扫描、模型	
	座架温度效应	20	1	倾斜仪	
	背架温度效应	6	0.5	仿真设计	
	副面撑腿温度效应	15	0.5	PSD	
环境误差	阵风导致结构	4 m/s	1	1	
		10 m/s	5	5	仿真设计、
	阵风导致伺服扰动	4 m/s	1.2	1.2	半功率点法
		10 m/s	5.5	5.5	
	码盘精度和零位	1	1	仿真设计	
伺服驱动和控制	齿隙	10	0.5	电消除修正	
	动态滞后	6	0.6	前馈补偿	
	静摩擦	2	0.4	仿真设计	
指向误差	风速4 m/s	-	2.98	-	
	风速10 m/s	-	5.70	-	

面,除了问题(1)兼具缓变和瞬变因素外其余方面基本都为缓变因素.对于缓变因素导致的综合指向误差,射电法可以采用十字扫描法、5点法或圆形扫描法进行准实时检测而后补偿.对于瞬变因素如风扰动导致的综合指向偏差,可以采用半功率点法^[2]或圆形扫描法^[3]进行总体检测评估.采用工业测量法对上述这几个问题进行分离测量,其中,问题(1)可以通过在副面安装位置传感器(Position Sensitive Device, PSD)来检测^[4],对于缓慢的温度效应可以作一定的补偿,而瞬变的风扰动由于天线响应的滞后性,PSD目前只能做监视,实时补偿效果较差;对于问题(2)中的主面重力变形带来的指向偏差可以通过仿真建模,然后通过开启和关闭主动面进行实测指向验证;问题(3)可以通过倾斜仪^[5]和温度传感器检测^[6],在确定温度梯度导致的指向偏差情况下可以实时修正,也可以对温度数据进行建模补偿.问题(4)通常被忽略,一般认为机械轴和码盘轴是完全同心安装的,并且认为码盘的负载很小,普遍认为机械轴和码盘轴是完全同步的,没有扭力作用或延时效应,然而实际情况并非如此简单,两者的传

递有时会有异步现象.问题(6)中模型的合理性同样很重要,一般可以通过结合倾斜仪的方法,建立初步模型,然后增加高次项以使拟合残差收敛到最小^[7,8].问题(5)伺服控制误差^[9]将在后续论文中进行深入论述,本文首先分析了射电法检测指向的原理,然后就上述几个问题展开仿真和实测研究.

1 射电法检测指向偏差

1.1 射电扫描法检测指向偏差

对射电源进行一维功率扫描得到的高斯曲线可以表示为^[10]

$$f(x) = S \exp \left[-4 \ln(2) \left(\frac{x - X}{\theta_x} \right)^2 \right],$$

其中 S 为峰值时对应的源流量; X 为偏差中心位置; θ_x 为半波束宽度.

解算偏差中心 X 时,自身的测量误差表示为

$$\sigma_x = \frac{h\theta_x}{\sqrt{2\pi\ln(2)}} \left(\frac{\sigma}{S} \right)^2,$$

其中 σ_x 为测量误差; h 为天线扫描速率.

以65 m为例, X波段系统噪声温度~35 K, 波束宽度150", 带宽20 MHz, 1 s积分进行观测测量, 则最小可检测源流量约0.02 Jy, h 扫描速率6"/s, 采用1Jy的源, 由此计算该误差约为 $\sigma_x = 0.2''$.

此外, 在实际工作中, 由于大气起伏和地球自转的缘故, 在扫描周期内, 功率噪底不一定会平滑, 因此需要考虑在高斯公式中加入一次-三次的多项式, 以获得更为完美的功率拟合效果.

可以采用卫星或强射电源扫描法, 通常分别让天线对射电信号进行方位和俯仰扫描, 同时检测天线接收到的功率信号, 根据信号最大值、星体的理论位置以及天线的实际位置值可以准确解出单次扫描数据对应的指向偏差. 这个方法的应用已经十分普遍, 然而, 这个方法本身有些注意点. 在检测过程中我们需要同时记录功率数据和方位、俯仰码盘数据, 由于功率积分的缘故, 瞬时读取的功率数据是当前时刻之前的, 而码盘数据是瞬时读到的, 因此两者必然有一定的时间差, 即不同步性. 这个问题可以通过如下手段进行缓和或消除. 例如, 可以通过提高数据采集频率, 当记录频率达到10次/秒, 这个问题可以得到很大的缓解, 但是此时单次功率积分时间必须减少到100 ms, 检测灵敏度比1 s积分下降约3倍; 其次可以通过软件的方法对功率数据进行时间移位, 即前移半个积分周期; 再次可以通过放慢天线扫描的速率, 就是通过牺牲检测效率来提高准确度; 还有一种方法就是在数据处理时考虑这个延时差异, 进行适当补偿, 经验性的补偿值通常是一半的积分周期, 如此可以使两个单向扫描获得的指向偏差一致. 当然, 如果十分确定没有其他误差的情况下, 对正反向扫描数据进行平均处理, 理论上是可以消除功率延时导致的指向差异. 然而事实情况往往还掺和其他方面误差, 如存在俯仰轴和码盘轴有回隙、滞后的情况, 这种平均法并不能从根本上解决系统误差问题. 本文后面提出采用同步卫星, 设置多种速率双向扫描的手段, 然后进行最小二乘拟合, 可以同时获得功率数据延时和轴连接回隙的方法.

在指向偏差限制到一个波束以内的时候, 圆扫描可以有效监测指向偏差^[11], 与上述十字扫描法相比, 该

扫描方法的最大优势是节省时间, 提高效率. 因为天线指向沿着半功率圆扫一圈, 就可以知道方位和俯仰的指向偏差, 该圆的半径约是半功率波束宽度, 圆形扫描除了可以采用方位、俯仰指令进行扫描, 还可以采用副面扫描, 这可以避免方位俯仰扫描启停时的惯性震动. 当然圆形扫描的缺点是对伺服控制的要求明显高于十字扫描, 因为要控制好方位、俯仰速度和加速度才能出现平稳的圆形扫描动作. 此外当波束形状是椭圆形的时候, 采用圆形扫描得到的功率曲线呈现出较复杂的形式, 需要增加拟合参数和合理性判据.

1.2 天线跟踪误差射电法测量

天线跟踪误差定义为理论位置和实际指向位置的差异. 采用天线波束半功率点跟踪可以有效检测整个天线系统的指向跟踪偏差^[12], 假定天线的方向图和射电源卷积完之后天线的功率形状是一个高斯曲线, 那么天线在一个方向上的天线温度可以由下式得到.

$$T = T_{\text{src}} \exp\left(-4\ln 2 \left(\frac{x}{\theta}\right)^2\right), \quad (1)$$

其中 T_{src} 是这颗源的天线温度的最高值, x 是在天空中的位置, θ 是半功率波束宽度. 该高斯波半功率点上的斜率为对 $x = \frac{\theta}{2}$ 处 T 求导.

$$\begin{aligned} M &= \left[\frac{\partial T}{\partial x} \right]_{x=\frac{\theta}{2}} = -4\ln 2 \left(\frac{T_{\text{src}}}{\theta} \right) \exp(-\ln 2) \\ &= -1.39 \left(\frac{T_{\text{src}}}{\theta} \right), \end{aligned} \quad (2)$$

可见一旦源的流量和观测频率确定, M 也就确定不变. 在观测时, 跟上源时的功率记作 T_0 , 在10倍半功率波束宽度位置时取到的数据记作 T_{sky} , $N(t)$ 是天线半功率跟踪 t 时信号功率, 而对应的指向跟踪误差为 $P(t)$, 那么

$$T_{\text{src}} = T_0 - T_{\text{sky}}, \quad (3)$$

$$P(t) = \frac{1}{M} \left(N(t) - \frac{T_{\text{src}}}{2} - T_{\text{sky}} \right). \quad (4)$$

在采用这个方法的时候, 大气的起伏是一个十分重要的因素. 因此在单波束测量时建议跟踪时间较短, 在具备双波束时, 采用另外一个波束检测背景, 然后与跟踪波束信号作差, 以消除大气导致的功率起伏.

2 工业方法检测指向偏差

2.1 副面支撑的温度效应和风扰动

采用PSD法检测副面支撑偏移导致的指向偏差, 需要十分注意的方面是PSD坐标和副面坐标之间的关系, 以及副面偏移和指向偏差之间严格关系的建立. 本文提出的方法是: 把PSD激光器直接安装于副面边沿, 光斑位置检测设备安装在刚度非常大的馈源舱, 通过控制副面在X和Y方向严格的步进带动光斑的移动, 由此构建副面坐标和光斑坐标的关系, 在多个俯仰上建立矩阵关系, 并对任意俯仰角的矩阵参数进行内插处理, 对于副面在X和Y向偏移导致的指向偏差可以通过实测和仿真获得^[13], 最终实现从PSD光斑位置乘上一个参数矩阵即可得到方位和俯仰指向偏差. 如式(5)矩阵变换基本考虑到了光斑和副面平移间的所有关系, 其中缩放因子用于PSD光斑位移单位与副面位移单位间的转换; 旋转因子主要用于安装过程中光斑摄影相机拍摄角度与副面移动方向的不平行; 错切因子主要考虑激光器安装平面与光斑移动所在平面的不平行性(在理想情况下k为零); 平移因子用于副面位置与光斑位置零点对齐.

$$\begin{pmatrix} X_{sub} \\ Y_{sub} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha & 1 \\ 1 & \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & k \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_{PSD} \\ Y_{PSD} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} X_{offset} \\ Y_{offset} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

式(5)给出了在一个俯仰角上校准矩阵参数的提取过程, 其中右侧第一个矩阵为缩放因子, 第二个子阵为旋转因子, 第四个为错切因子, 第五个为平移因子. 校准时, 副面分别作X和Y向步进得到坐标 (X_{sub}, Y_{sub}) , 见图1, 与此同时得到光斑坐标 (X_{psd}, Y_{psd}) , 见图1, 两者一一对应, 最后通过最小二乘拟合得到矩阵参数 $(\alpha, \beta, \theta, k, X_{offset}, Y_{offset})$.

2.2 码盘轴和机械轴联接异常导致的指向偏差

这里首先需要区分两个问题, 首先是码盘轴和机械轴不同心会导致系统性指向偏差, 该偏差具有可重复性; 其次机械轴和码盘轴连接不同步(或滞后性)导致指向偏差. 对于前一个问题, 根本的解决方法是事先标定差值, 采用软件方法进行补偿; 而对于后一个问题, 情况往往比较复杂, 需要仔细定量检测连接轴

的抗扭能力, 以及双向传动时, 滞后导致的回隙差异.

2.2.1 码盘偏心安装

对于码盘半径 r , 偏心距 a , 如图2所示, 机械轴转角 θ 和码盘读数 β 的关系式如下:

$$\beta = \theta + \arcsin\left(\frac{a}{r} \sin\theta\right). \quad (6)$$

如果是一个读数传感器, 这是个系统偏差量, 将包含在指向模型的谐波分量中, 但是当码盘采用两个读数传感器交替工作时, 问题将显现出来, 因为建立

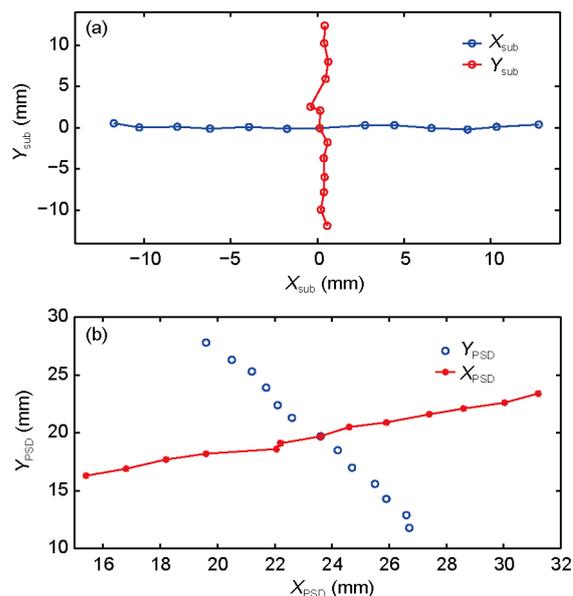


图1 (网络版彩图) (a) 矩阵转换后对应的光斑位置; (b) PSD 输出坐标

Figure 1 (Color online) (a) Position of the light spot after matrix convert; (b) raw position output by PSD.

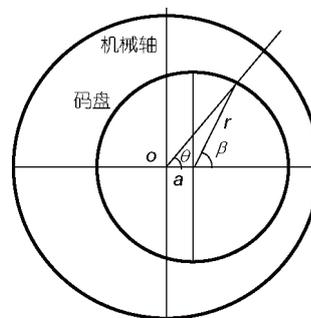


图2 机械轴和码盘不同心导致的转角差异
Figure 2 The angle caused by nonconcentricity of mechanical and encoder axes.

指向模型时采用的是一个读数传感器. 这个时候就要把两个读数传感器的系统差异测量(或仿真)出来, 在读数传感器交替时补偿上这个差异量. 当一个码盘有两个读数传感器, 并且两个读数传感器数据可能在异常情况下要替换的时候, 连接轴的同心度偏差就变得很重要.

以65 m实际尺寸仿真, 码盘直径 $D=300$ mm; 码盘轴和机械轴不同心 $r=6$ μm ; 两个读数传感器的跨度为 120° . 两个读数传感器输出的偏差如图3; 两个读数传感器输出的差异如图4. 对65 m进行实测, 获得方位和俯仰两个读数传感器的差异曲线见图5和6. 从图5可以看到, 这个差异最大时约有 $20''$, 并且随方位变化, 这个与图4几乎相当, 因此可以估计两轴的偏心距约为 6 μm . 另外, 从图5和6中可以看到, 码盘读数异常点, 这主要原因是码盘所处环境的湿度太大, 导致表面结露, 以及读数传感器的洁净度不够.

2.2.2 工业测量法检测机械轴和码盘轴不同步

机械轴和码盘轴的不同步表现为正反向指向检测的不一致性. 问题主要是由于机械轴和码盘轴连接

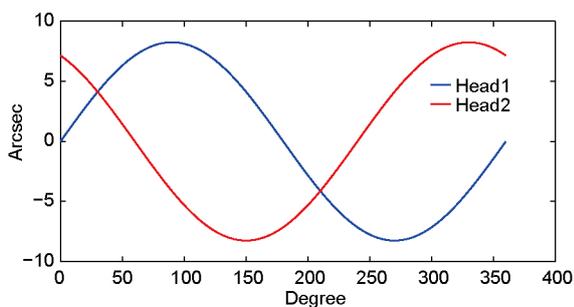


图3 (网络版彩图)两个读数传感器分别输出的指向偏差
Figure 3 (Color online) Pointing error from 2 sensors.

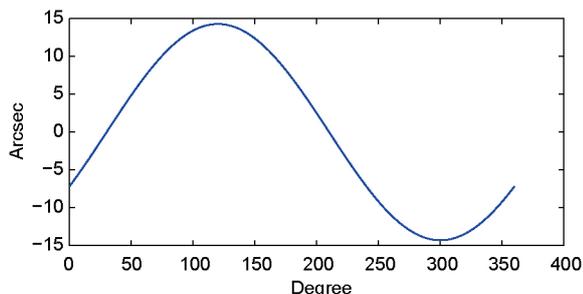


图4 (网络版彩图)两个读数传感器输出的差异
Figure 4 (Color online) The output difference of the 2 sensors.

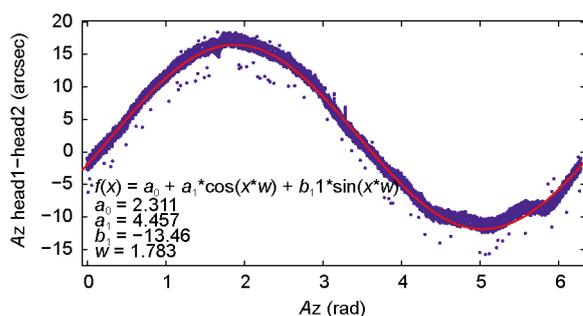


图5 (网络版彩图)方位码盘两个读数传感器差异实测和补偿曲线

Figure 5 (Color online) The output difference of the 2 azimuth sensors and compensation curve.

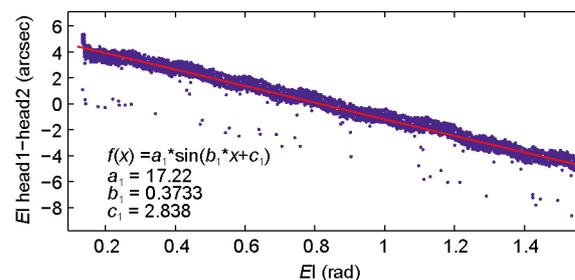


图6 (网络版彩图)俯仰码盘两个读数传感器差异实测和补偿曲线

Figure 6 (Color online) The output difference of the 2 elevation sensors and compensation trace.

处抗扭力不够或有应力存在, 导致两轴转动不完全同步, 我们暂且定义俯仰轴和码盘轴的不同步量叫作“回隙”. 通过对国内多台20 m以上口径射电望远镜的测量, 我们发现, 机械轴和码盘轴的不同步导致的指向偏差具有普遍性, 在高精度指向要求时必须重点检测.

在TM65 m上直接测量俯仰轴角秒量级的转角是十分困难的, 我们认为俯仰轴和俯仰齿轮的连接是良好的刚性连接, 利用俯仰齿轮的半径(14 m), 把单位角秒量级的转角量转换为位移量(0.068 mm), 使得测量具有可行性, 可以采用千分表在俯仰大齿轮上直接测试, 见图7, 测试时控制天线俯仰依次从下往上和从上往下停止于同一俯仰位置, 即码盘读数完全一样, 记下千分表的读数, 以千分表的读数是否一样判断俯仰机械轴和码盘轴是否有间隙存在, 通过单位角度产生的千分表读数变化, 可以准确定量给出回隙的大小. 以中间位置 49.95° 为例, 表2给出了多次测量结果, 每次测量时, 依次控制俯仰从 49.87° 转到 49.95° , 然后再



图 7 (网络版彩图)利用千分表检测俯仰回隙
Figure 7 (Color online) Elevation backlash measurement by micrometer.

控制天线到 50.03° , 最后让天线转到 49.95° , 记录下俯仰在 49.87° 和 49.95° , 50.03° 和 49.95° 时的千分表读数如表3, 可以看到, 在同样 49.95° 时, 前后两次千分表读数有 0.4 mm 左右的明显差异, 并由比例因子($0.16^\circ/38.52\text{ mm}$)知道, 0.4 mm 对应约 $5.6''$ 的回隙. 在多个俯仰上进行如上测试, 表3记录了俯仰 29.92° , 49.95° 和 70.87° 上的读数差异情况, 多次测量的回隙一致性好. 另外, 我们对方位进行了同样的多次测试, 见图8, 方位的回隙只有约 $1''$, 见图8和表4.

2.2.3 射电法检测机械轴和码盘轴不同步

射电法检测回隙和延时, 我们采用同步卫星信号,

表 2 俯仰回隙检测记录表
Table 2 Backlash measurement recorder

<i>N</i>	<i>El</i> = 49.87° 读数 (mm)	<i>El</i> = 49.95° 读数 (mm)	<i>El</i> = 49.95° 读数 (mm)	<i>El</i> = 50.03° 读数 (mm)	回隙 ($''$)
1	-19.444	0.108	-0.342	19.125	6.720
2	-19.338	-0.026	-0.433	19.185	6.086
3	-19.425	0.04	-0.279	19.167	4.761
4	-19.387	0.03	-0.345	19.148	5.605
5	-19.378	0.088	-0.331	19.129	6.268
6	-19.36	-0.001	-0.374	19.109	5.585

表 3 多个俯仰回隙检测
Table 3 Backlash measurement on different elevations

<i>El</i>	量程 (mm)	回隙 (mm)	回隙 ($''$)
29.92	37.271	0.369	5.703
49.95	38.569	0.450	6.720
70.87	33.139	0.309	4.699

表 4 方位回隙检测记录表
Table 4 Azimuth backlash measurement

<i>N</i>	<i>Az</i> = 301.00° 读数 (mm)	<i>Az</i> = 300.95° 读数 (mm)	<i>Az</i> = 300.95° 读数 (mm)	<i>Az</i> = 300.90° 读数 (mm)	回隙 ($''$)
1	-19.498	-0.047	-0.18	19.283	-1.235
2	-19.499	-0.054	-0.184	19.318	-1.206
3	-19.51	-0.078	-0.184	19.264	-0.984
4	-19.511	-0.078	-0.206	19.29	-1.188
5	-19.502	-0.069	-0.203	19.272	-1.244
6	-19.537	-0.079	-0.199	19.264	-1.113
7	-19.532	-0.077	-0.221	19.271	-1.336
8	-19.496	-0.087	-0.195	19.264	-1.003
9	-19.496	-0.092	-0.193	19.262	-0.938



图8 (网络版彩图)千分表检测方位回隙
Figure 8 (Color online) Azimuth backlash measurement by micrometer.

以不同的扫描速率进行正反向指向误差检测扫描, 并把正向和反向指向差异与扫描速率构成函数关系. 这里说明两个偏差: 功率延时偏差和回隙偏差, 前者主要缘于读取码盘和功率的不同步性导致(扫描越快, 正反向差异越大), 引起的指向偏差随着扫描速率的改变呈线性规律, 并且通过正反向扫描解算平均可以抵消掉, 而后者无法抵消, 必须通过测量分离两者. 如果俯仰轴和码盘轴有回隙, 这里假设是固定值, 而延时导致正向扫描(e+)与反向扫描(e-)差异与扫描速率之间有线性变换的规律, 为此构建扫描速率(x)与正反向扫描指向差异(y)的函数 $y=ax+b$, 其中a为2倍延时(单位: s), b为回隙(单位: ″), 以此分离出延时和回隙. 实测结果见图9, 采用线性拟合得到的方位函数关系为 $y=0.372x+2.62$, 方位功率数据和码盘值读取延时差异为 $0.372/2=0.186$ s, 回隙 2.62 ″. 俯仰函数关系为 $y=0.347x+7.07$, 俯仰功率数据和码盘值读取延时差异为 $0.347/2=0.172$ s, 回隙 7.07 ″. 可见方位和俯仰的延时差异是相当的, 但是回隙差异很大, 俯仰是方位的2.7倍. 采用射电法测试与上述采用千分表直接测试的差异是, 射电法测得的结果包含了副面、主面、座架、码盘轴连接、伺服控制和环境等因素, 全部的误差贡献, 而千分表分离测量了码盘轴连接的误差.

在TM65 m上通过上述两种方法的测试, 我们确定俯仰机械轴和码盘轴的连接存在不同步性, 由此导致在检测指向偏差时采用正向和反向扫描存在系统差异. 我们对连接轴的抗扭能力进行了实测, 并更换了连接轴, 使其抗扭能力提升了5倍, 千分表实测表明, 俯仰回隙基本达到 2 ″左右, 与换轴前 $5-6$ ″相比明显改善. 然后在Ku波段进行了全天区指向检测, 实测结果表明, 换轴后俯仰的指向模型的误差由之前的 7.86 ″

(RMS)提升到了 3.54 ″ (RMS), 拟合残差随俯仰的分布情况见图10和11.

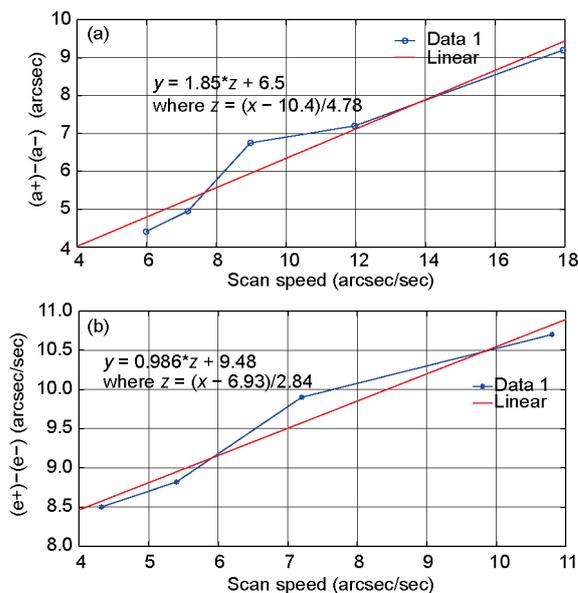


图9 (网络版彩图) (a) 方位正反向指向差异和扫描速度关系; (b) 俯仰正反向指向差异和扫描速度关系(蓝色: 实测点; 红色: 线性拟合)
Figure 9 (Color online) (a) Azimuth pointing difference vs. scan speed; (b) elevation positive and negative pointing difference vs. scan speed (blue: measured; red: linear fitting).

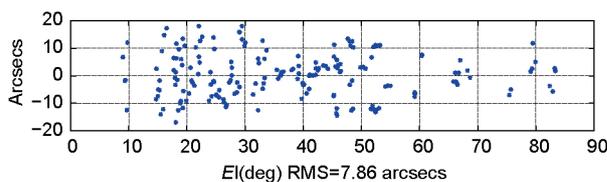


图10 (网络版彩图)连接轴更换前俯仰方向指向拟合误差
Figure 10 (Color online) Pointing error fitting before conjunction axis change.

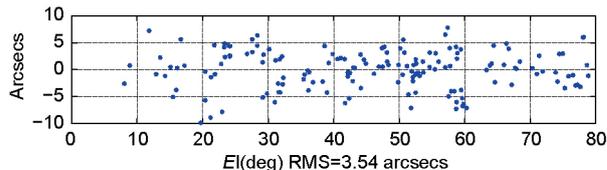


图11 (网络版彩图)连接轴更换后俯仰方向指向拟合误差
Figure 11 (Color online) Pointing error fitting after conjunction axis change.

2.3 座架温度导致的俯仰指向偏差

温度对射电望远镜的影响是一个复杂的问题, 整体温度的差异、不同的温度梯度, 以及天线不同部位的温差, 导致的指向偏差是不同的, 而且他们往往是综合作用的. 比如, 天线的座架、副面支撑和背架在温度效应都会引起偏移或变形, 他们都会导致指向的偏转, 但是权重因素有所差异. 本文采用安装于天线座架平台的倾斜仪, 对温度梯度导致座架的倾斜量作主导项测量分离, 并与射电法测得的指向偏差进行对比, 得出在白天时间, 座架的温度效应是导致指向偏差的一项主导因素.

采用射电法检测座架温度梯度导致的俯仰指向偏差, 我们对北极附近射电源J2344+8226进行连续32 h的十字扫描指向检测, 该源的方位轨迹跨度约 20° , 俯仰跨度约 15° , 轨迹见图12, 在此小范围内指向模型的差异较小, 可以最大程度分辨温度导致的指向偏差. 我们同时记录安装于俯仰轴一侧的倾斜仪读数, 两种数据曲线见图13, 可以看到, 两种数据具有强相关性, 在25 h至27 h指向有突变现象, 此时对应的北京时为上午9时–11时, 恰好是天线座架温度变化最剧烈的时间段, 图14为座架上14个不同位置温度仪收集的温度随时间的变化情况, 与图13相比, 同样表现出强相关性. 由此可以知道, 13° 左右的环境温度变化导致的指向偏移可以达到约 $20''$, 这个在65 m上、X以上波段是无法容忍的, 因此可以采用倾斜仪数据进行补偿, 也可以通过对温度数据进行建模以补偿温度效应导致的指向偏差. 同样我们注意到, 在35 h至45 h倾斜仪的数据和指向检测的合拍性不好, 这主要是由于测量过程中温度同样会导致背架变形和副面支撑的伸缩, 由此导致副面的偏移, 以及主面的光轴变化, 这同样会引起指向的偏转, 这两个因素在图中并没有准确分离, 这是导致座架倾斜仪数据和指向有差异的主要因素.

2.4 指向建模方法

当前对于指向建模的方法论述已经十分丰富, 但是对于如何更合理地建模以及如何兼顾主副面随动情况下, 把指向误差控制得最小, 则讨论甚少. 通常情况下, 先对分布于天空各点的射电源进行单点偏差检测, 然后对全天区数据进行最小二乘法模型拟合, 以获得合理的模型参数, 根据模型的拟合残差在方位和俯

仰上的分布规律, 确定是否增加模型高次项. 通过实践, 我们提出采用倾斜仪测得的轨道不平度实测数据为基础, 然后在此基础上进行射电法测量和模型构建, 并进行模型项数的扩展和迭代, 可以获得良好的结果. 图15给出了65 m天线指向天顶时, 倾斜仪实测得到轨

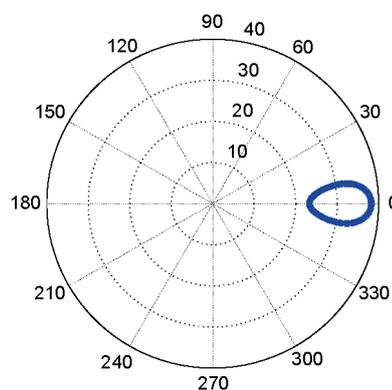


图12 (网络版彩图)射电源J2344+8226轨迹
Figure 12 (Color online) Azimuth and elevation trace for source J2344+8226.

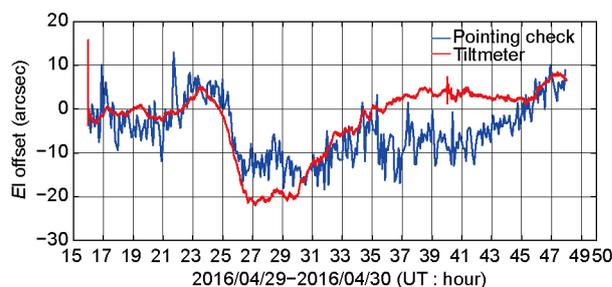


图13 (网络版彩图)十字扫描指向检测和倾斜仪读数对比
Figure 13 (Color online) Pointing error from cross scan vs. tiltmeter.

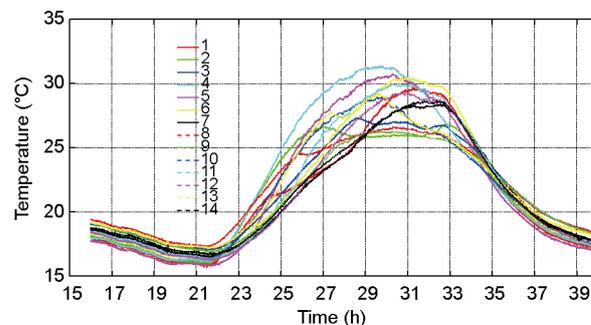


图14 (网络版彩图)座架温度仪读数
Figure 14 (Color online) The temperatures for the antenna frame.

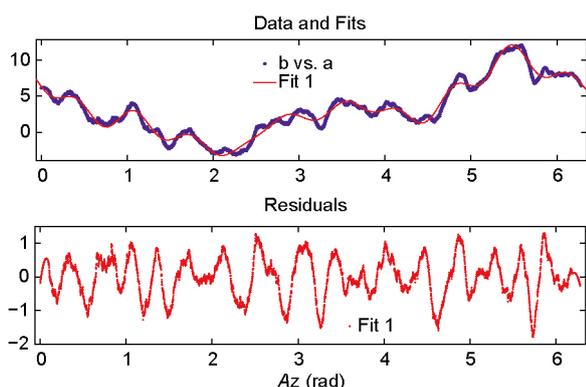


图 15 (网络版彩图)轨道不平度和模型残差
Figure 15 (Color online) Track unevenness and model's residual error.

道不平度情况, 我们采用方位和俯仰的三角多项式对此进行了拟合, 获得了较小的残差, 约 $0.5''$ (RMS).

对于主动面工作情况, 必须在已有的指向和副面模型基础上, 对特定主面模型下的副面聚焦和指向模型进行迭代修正, 如图 16 所示, 一个主面模型的建立必须有指向修正函数和聚焦修正函数与其对应, 分别是 $f(EI)$, $g(EI)$ 以及 $h(EI)$.

3 总结

本文针对天马 65 m 射电望远镜高精度指向检测问题展开研究, 介绍了采用射电法和工业法检测指向

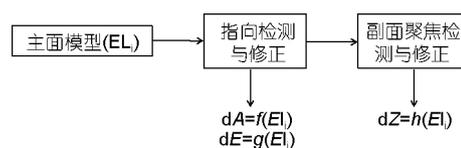


图 16 主面模型开启时指向修正框图
Figure 16 Pointing error correction for active surface enabled.

偏差的若干具体手段. 论文先论述了射电望远镜系统指向偏差的检测方法, 包括扫描法和半功率点跟踪法, 然后以天线背架为界线, 对其上的副面和支撑导致的指向偏差采用 PSD 法进行了分离测量. 对于背架之下, 天线整体座架则采用倾斜仪法进行分离测量; 此外, 对于码盘和机械轴回隙检测则分别采用了千分表方法进行分离测量, 同时进行射电法符合验证. 就当前论及的方法, 只有主面背架的温度效应导致的指向偏差无法直接测量, 其余机械方面导致的指向偏差都已经能被直接测量. 实测结果表明, 温度对大型射电望远镜的指向影响显著, 论文给出了定量检测该值的方法并与射电法进行对比验证, 提出采用倾斜仪补偿的设想. 此外, 论文提出了采用轨道不平度数据为基础进行建模的方法, 以及主动面启动情况下指向的修正方法. 这些方法通过在天马 65 m 上应用, 验证了方法的有效性, 可以分离测量相关机械部分导致的指向偏差, 补偿后能够有效提高指向精度.

参考文献

- Constantikes K. Thermally-neutral traditional pointing models and thermal corrections to pointing and focus. NRAO, PTCS project note 25, 2003
- Richard M. Prestage, tracking performance of the GBT. NRAO, PTCS project note 71.1, 2011
- Condon J J. Circular pointing scans. NRAO, PTCS project note 74.0, 2012
- Tonino P, Franco B, Raimondo C, et al. A PSD to map the shift and tilt of the SRT secondary mirror. Proc SPIE, 2014, doi: 10.1117/12.2055849
- Gawronski W, Baher F, Quintero O. Azimuth-track level compensation to reduce blind-pointing errors of the Deep Space Network antennas. *IEEE Anten Propag Mag*, 2000, 42: 28–38
- 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. 13.7 m 望远镜热变形研究. 天文学报, 2014, 3: 246–255]
- Meeks M L, Ball J A, Hull A B. The pointing calibration of the Haystack antenna. *IEEE Trans Anten Propag*, 1968, 16: 746–751
- Riggs R. Antenna pointing systematic error model derivation. TDA Prog Rep, 1986: 36–46
- Gawronski W, Souccar K. Control systems of the large millimeter telescope. *IEEE Anten Propag Mag*, 2005, 47: 41–49
- Richard M. Prestige, PTCS project note 10.2, quick astronomical corrections for GBT pointing and focus tracking. NRAO, 2003
- Condon J J. PTCS project note 74, circular pointing scans. NRAO, 2012
- Condon J J. PTCS project note 71.1, tracking performance of the GBT. NRAO, 2011
- Wang J Q, Yu L F, Zhao R B, et al. Sub-reflector model depending on elevations and performance evaluation for TM65 m radio telescope (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2014, 44: 1232–1240 [王锦清, 虞林峰, 赵融冰, 等. TM65 m 射电望远镜副面随动模型及性能评估, 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2014, 44: 1232–1240]

High precision pointing error detection method for large radio telescope

WANG JinQing^{1,2,3*}, YU LinFeng^{1,2}, ZHAO RongBing^{1,2}, KESTEVEN Michael¹,
FU Li^{1,2}, JIANG YongBin^{1,2}, GOU Wei^{1,2}, GUO Wen^{1,2} & JIANG YongChen^{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

In the paper, the main factors influencing pointing precision of large radio telescopes are discussed. Then the TianMa radio telescope (TM65 m) is selected for demonstration. The methods of detecting and separating the pointing errors which produce in all the segments from the subreflector to the track rail of the telescope are introduced. They includes: (1) half power point tracking to evaluate the overall antenna pointing error; (2) detecting the pointing error due to position changing of the subreflector support; (3) detecting the deviation of the antenna mount due to temperature changing; (4) detecting the asynchronization of the mechanical axis and the encode axis; (5) high precision pointing modeling based on the unevenness of track rail. A few measurement methods and their respective results are discussed.

pointing, delay, backlash, temperature, tiltermeter

PACS: 06.30.Bp, 07.87.+v, 07.05.Fb, 07.57.Hm, 07.50.Qx

doi: [10.1360/SSPMA2017-00077](https://doi.org/10.1360/SSPMA2017-00077)