

PSD法测量大型射电望远镜副面位姿*

江永琛^{1†} 王锦清^{1,2} 苟 伟¹ 虞林峰¹ 蒋甬斌¹

(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 210033)

摘要 指向精度是大型射电望远镜天线具有挑战性的关键技术指标. 在望远镜运行中, 方位俯仰角的变化、重力以及日照等对副面撑杆的综合影响会引起望远镜的副面位姿改变而引起指向误差的增加和天线效率的降低. 基于天马65 m射电望远镜, 使用位置传感器装置(PSD)法构建了副面位置偏移量测定系统, 可以实时采集副面的3维位移数据, 构建重力模型, 将测试结果与射电法构建的现有副面模型进行对比, 有较好的一致性. 此外, 该系统可以分析日照(引起撑腿局部温度效应)引起的副面位移情况, 也可以监视风载和瞬时启停对副面位姿的影响.

关键词 望远镜, 指向, 重力, 日照

中图分类号: P161; **文献标识码:** A

1 引言

在射电观测中, 辐射方向图的主瓣宽度约为 $1.22\lambda/D$ (λ 和 D 分别是观测波段的波长和望远镜的口径), 这个值决定了射电观测的分辨率大小^[1], 即使用较大的望远镜口径和较短的工作波长可以获得较高的分辨率. 我国目前已有北京密云50 m射电望远镜, 昆明凤凰山40 m射电望远镜, 乌鲁木齐南山25 m射电望远镜, 上海佘山25 m射电望远镜以及于2012年落成的上海天马65 m射电望远镜(TM65 m)这几座大型射电望远镜.

TM65 m是目前国内口径最大、精度最高的大型全方位可转动的射电望远镜, 覆盖L、S、C、X、Ku、K、Ka和Q 8个工作波段, 几乎覆盖50 GHz以下70%的频率范围. TM65 m在国内首次采用了副面6连杆系统^[2], 可以程控实时调整副反射面的3维位置, 副反射面由4根撑腿与主反射面相连.

射电天文观测要求指向误差小于天线半功率波束宽度(HPBW)的10%, 此范围内的误差引起的信号损失约为3%^[3]. 研究发现, 通过模型法分析指向误差, 其中对规律变化误差, 可以通过观测建立起指向系统误差的模型进行修正, 比如重力对天线主副反射面和撑腿的作用, 一旦建立了重力模型后就几乎是静态不变的. 但是由于风载^[4]和温度引

2019-04-19收到原稿, 2019-07-16收到修改稿

*国家自然科学基金项目(11603061、11873015), 国家重点研发计划(2018YFA0404702), 中国科学院关键技术人才项目资助

[†]yongchen@shao.ac.cn

起的指向误差是随机动态不可确定的,这也是限制大型射电望远镜天线指向精度的重要原因.目前, TM65 m建立了副面随动模型校准副面位置偏移^[5]以及指向模型^[6-7]校准天线指向.

本文提出位置传感器装置(PSD)法测试副面3维位姿,副面3维位姿的坐标定义如图1所示,天线水平放置时, x 为俯仰轴, y 与俯仰齿轮面平行(为重力方向), z 为焦距对外方向, α 、 β 分别是绕 x 轴和 y 轴的转角,均符合右手法则,在天线观测过程中,随着俯仰(EL)角度的变化,副面 z 向和 y 向相对主面的位姿变化情况较大.在副面上安装激光位置传感器,通过定标获取2维光斑数据与 TM65 m副面2维位移的矩阵关系,利用长距离激光测距装置给出了 TM65 m转动时副面 z 向位移变化的初步数据结果.将 PSD 法和射电法两种方法构建的模型进行对比,在 y 向和 z 向有很好的一致性.通过 PSD 法可以在望远镜跟踪的同时获取天线副面位姿情况,并且可以定量分析温度和风载因素等对望远镜副面的影响.

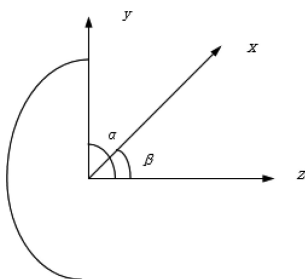


图 1 副面坐标定义

Fig. 1 Definition of sub-reflector's coordinate

与现有的射电法构建副面重力模型相比较, PSD 法显示出明显的优势,具体如下: PSD 法可以在观测过程中实时监测副面位姿变化情况,而射电法需要停止观测挑选合适的射电源来进行扫描检测,且受射电源的可视时间和可视俯仰范围限制;在望远镜建设初期,整个信号传输链路没有搭建好的情况下,可以使用 PSD 法快速构建副面受重力影响的全俯仰3维模型;引起指向偏差的因素众多,有主反射面、副反射面和望远镜座架等多个因素, PSD 法单独分析副面位姿变化,可以分离出副面支撑因素导致的指向偏差.

2 副面位置激光测定系统的搭建

TM65 m采用卡塞格林式天线结构,主反射面为口径65 m的抛物面,共1008块面板14环,由1114个促动器来实现主动面调整使其保持最佳抛物面状态.副反射面为口径6.5 m的修正双曲面,共25块面板3环,采用6连杆可调技术实现副面面型的校正.本文介绍的 PSD 法测量 TM65 m的副面位姿变化,其测量系统主要包括一个激光器,一个工业级相机以及一个长距离激光测距设备及相关数据采集软件.选用光束发散角小于0.2 mrad的激光器,其出瞳孔径9 mm,功率1 mw,工作距离50 m,采用光学镀膜玻璃透镜技术发出一个点状光斑,使用寿命大于10000 h.

将激光器安装在副反射面边沿处,垂直打光到馈源仓顶端,距离约14 m.在馈源仓顶处安装一个工业级相机对从副面射下来的光斑位置进行快速抓取和采集,并通过网络

实时传送2维数据至观测室终端的计算机. 使用长距离激光测距设备对副面到馈源仓顶处的垂直距离进行实时采集. 理论安装图如图2所示.

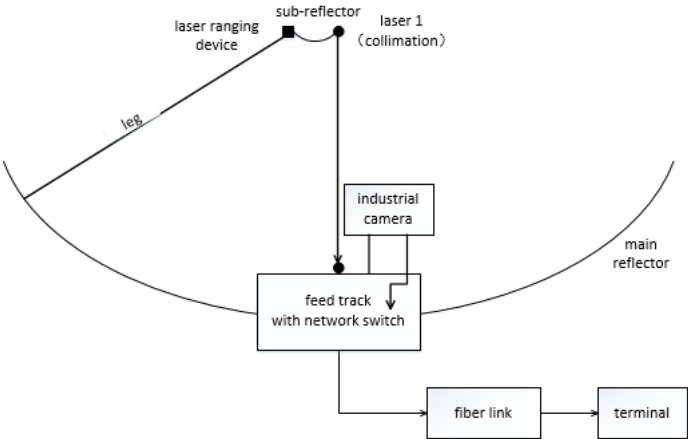


图 2 PSD法测量望远镜副面位姿理论安装图

Fig. 2 Theoretical installation diagram of the PSD method for measuring the position of telescope's sub-reflector

TM65 m主副反射面及馈源仓整体图如图3所示. 本文重点介绍重力对副面位姿的影响以及温度对副面位姿在 x 和 y 方向上的影响, 并且与射电法构建的重力模型数据在 y 向和 z 向进行对比.

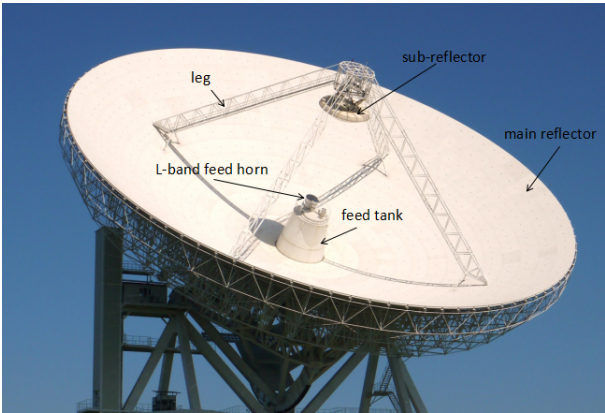


图 3 天马望远镜

Fig. 3 The TianMa Radio Telescope

3 PSD法测量结果

3.1 测量系统的安装

激光器配备专用电源与万向支架, 考虑TM65 m射电望远镜副反射面的高度会对激光器本身引入安装误差, 将激光器使用不锈钢罩遮风避雨, 并使用304不锈钢方管固定在副反射面边沿处. 将工业相机安装在馈源仓顶处的L波段接收机馈源喇叭旁, 调节相机

焦距使光斑落在相机可视范围内, 相机根据灰度值识别光斑并获取其2维位移值. 在光斑可视范围内贴上黑色接收板, 降低相机采集到野点的概率. 借助望远镜现有条件, 激光器及工业相机的安装见图4和图5.

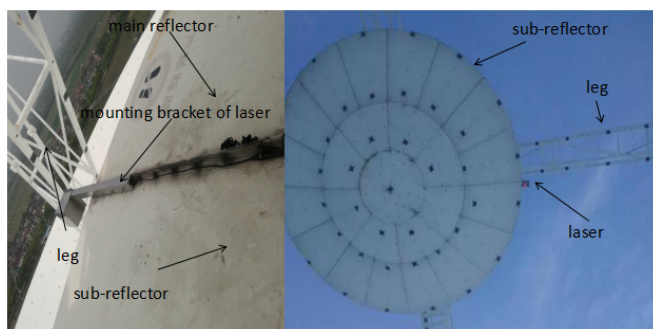


图 4 激光器在副面上的安装

Fig. 4 Installation of the laser on sub-reflector

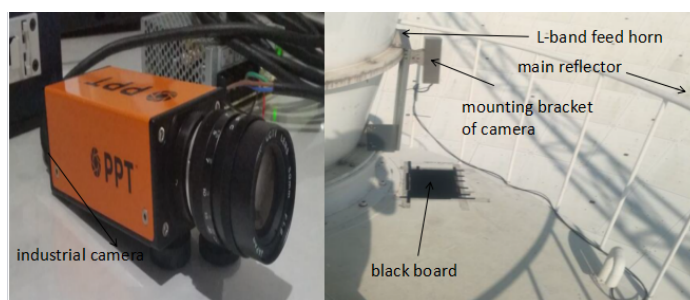


图 5 相机的安装固定

Fig. 5 Mounting and fixation of camera

长距离激光测距设备采用相位比较原理进行测量. 激光传感器发射不同频率的可见激光束, 接收从被测物返回的散射激光, 将接收到的激光信号与参考信号进行比较. 最后, 用微处理器计算出相应相位偏移所对应的物体间距离, 可以达到毫米级测量精度. 该测距设备可用测量范围0.1–30 m, 分辨率为0.1 mm, 激光发散角为0.6 mrad, 由图2可以看出, 该设备将安装在副反射面边沿测量到馈源仓顶处的垂直距离约14 m. 采用RS422接口将数据通过近100 m的电缆沿着副反射面撑腿及主反射面背架送至馈源仓的网络交换机, 再送至观测室终端的计算机.

由于该测距设备重量850 g, 尺寸为212 mm × 96 mm × 50 mm, 使其准直安装固定在副反射面边沿非常困难, 暂未设计出合适且稳固的安装调节支架. 所以在安装固定到副反射面边沿前, 使用该设备进行了初步测量, 不同于图2的安装原理图中让激光从副反射面射向馈源仓顶端, 这里将测距设备固定在馈源仓顶处, 让激光射向副反射面, 如图6所示.

3.2 x 、 y 2维矩阵函数的建立

在晴朗无风的夜空, 风载和温度对副面影响很小的情况下, 将TM65 m望远镜置于

不同的俯仰角位置, 对PSD 2维数据进行定标, 定标数据如表1所示.

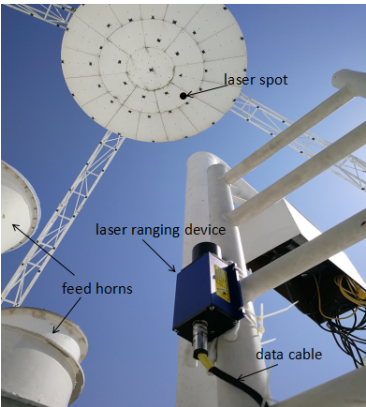


图 6 z 向位移的测量

Fig. 6 Measurement of the z -direction displacement

表 1 PSD 2维数据定标
Table 1 Two-dimensional data scaling of PSD

EL/ $^{\circ}$	θ_a/rad	kx	θ_b/rad	ky	offx/mm	offy/mm
88	1.1697	-2.3579	0.4049	0.4285	13.7	16.1
83	1.1738	-2.3853	0.3910	0.4122	17.2	17.1
78	1.1690	-2.3533	0.4058	0.4296	20.4	19
73	1.1856	-2.4667	0.4112	0.4360	23	20.6
68	1.1632	-2.3161	0.3943	0.4160	25.7	22.5
63	1.1743	-2.3884	0.3996	0.4223	28	24.2
58	1.1624	-2.3108	0.4116	0.4366	30	26.1
53	1.1586	-2.2868	0.4011	0.4241	32.6	27.3
48	1.1770	-2.4069	0.3938	0.4155	34.6	29.1
43	1.1683	-2.3489	0.3968	0.4190	36.2	30.3
38	1.1614	-2.3043	0.3863	0.4067	37.4	31.8
33	1.1690	-2.3531	0.4000	0.4228	38.8	33.1
28	1.1858	-2.4677	0.3862	0.4066	39.4	34
23	1.1693	-2.3551	0.3961	0.4182	39.7	35.1
18	1.1608	-2.3008	0.3886	0.4095	39.4	35.7
13	1.1746	-2.3907	0.4163	0.4421	39.3	36.4
8	1.1626	-2.3119	0.3911	0.4123	38.2	37.1

TM65 m EL工作范围 $7^{\circ} - 88^{\circ}$. 定标过程中选择EL每隔 5° 一个点, 通过手动调节副面的 x 位移或 y 位移, 获取光斑的2维位移量, 从而找到副面位移和光斑位移两者之

间的矩阵函数关系式. 表1中offx和offy分别表示副面定义为初始状态时对应的相机采集到的光斑2维位置初始值, xpsd与ypsd是相机采集的2维位移值, 其2维方向与副面的2维方向存在旋转角度. θ_a 和 θ_b 分别为副面位置的 x 方向与xpsd方向的夹角和副面 y 方向与ypsd的夹角. k_x 和 k_y 分别是根据实测数据拟合得到的斜率. $\theta_a = \arctan(k_x)$, $\theta_b = \frac{\pi}{2} - \arctan(k_y) + \pi$.

假设xpsd_x和ypsd_y分别表示相机采集到的光斑的2维数据值. $xpsd = xpsd_x - offx$; $ypsd = ypsd_y - offy$, xpsd和ypsd是工业相机采集到的光斑2维位移值, 其坐标定义取决于相机的安装位置. 由PSD采集到的2维光斑数据经过缩放、平移、旋转可以得到副面移动过程中的副面位姿变化的2维数据. 在定标过程中, 让望远镜在固定俯仰位置, 通过手动调节副面 x 方向位移获得xpsd和ypsd数据, 副面位置变化的2维数据xsub与ysub和xpsd与ypsd的对应关系如(1)式所示:

$$\begin{bmatrix} \frac{xsub}{sx_1} \\ \frac{ysub}{sy_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} xpsd & ypsd \\ ypsd & xpsd \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta_a \\ -\sin\theta_a \end{bmatrix}. \quad (1)$$

而通过手动调节副面 y 方向位移也可获得对应的xpsd和ypsd数据, 同理, 副面位置变化的2维数据xsub与ysub和xpsd与ypsd的对应关系如(2)式所示:

$$\begin{bmatrix} \frac{xsub}{sx_2} \\ \frac{ysub}{sy_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} xpsd & ypsd \\ ypsd & xpsd \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta_b \\ -\sin\theta_b \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中的 sx_1 、 sx_2 、 sy_1 、 sy_2 是缩放因子, 通过定标可以获得的 θ_a 、 θ_b 、 sx_1 、 sx_2 、 sy_1 、 sy_2 数值, 如表2所示. 在望远镜实际跟踪过程中可以根据实时获取的2维光斑数据xpsd_x和ypsd_y实时获取副面2维位置变化情况.

表 2 变换矩阵参数值

Table 2 Parameter values of transform matrix					
θ_a/rad	θ_b/rad	sx_1	sx_2	sy_1	sy_2
1.1697	0.3985	0.71	0.72	1.75	0.31

3.3 z 向初步测量结果

副面 z 向为焦距对外方向, z 向的移动直接影响望远镜焦点和焦距的变化, 影响望远镜天线效率. 使用图6所示方法对 z 向受重力影响随俯仰角的变化进行了初步测试. 在望远镜EL从 7° 全速上升到 88° 的过程中, 实时记录 z 向位移变化曲线, 并对实测数据进行2次拟合, 结果如图7所示.

由于目前光源安装于馈源仓顶端, 光斑位于副面中圈位置(副面由3圈面板组成), 在测量过程中依据副面曲率可以知道副面 x 向横移和 y 向倾斜会引起 z 向分量的变化, 因此把这一部分 z 向分量修正到图7的 z 向拟合曲线中, 得到修正后的 z 向位移随俯仰变化曲线如图8所示.

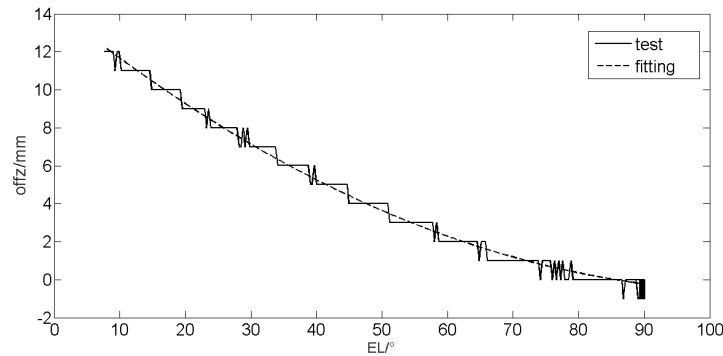


图 7 副面 z 向位移的实测与拟合结果

Fig. 7 Measured and fitting results of the sub-reflector's displacement in z -direction

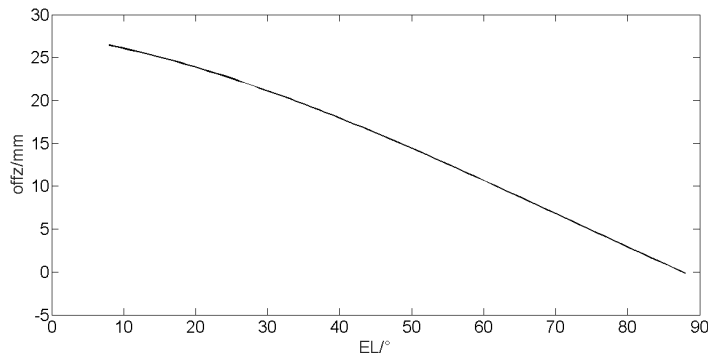


图 8 修正后的副面 z 向位移

Fig. 8 Corrected displacement of the sub-reflector in z -direction

3.4 重力对副面位姿变化的影响

当望远镜的俯仰角为 88° 接近朝天状态时, 支撑副反射面的4条撑腿受重力的影响在理论上是一致的. 为了分析重力因素对副反射面的影响, 选择一个晴朗无风的夜晚, 在没有风载和温度的影响下, 使TM65 m以 $0.05^\circ \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度, 由 88° 下降到 7° , 在此过程中使用表2的矩阵参数根据光斑位置可得到副面在 x 和 y 方向上的位移量. 副面 x 和 y 向位移随俯仰变化的曲线如图9所示.

从图9可以看出, 由于重力作用, 副面2维位置向特定方向移动. 俯仰角度越低, 副面的 x 和 y 向位移越大. 而且, y 向位移变化速度明显快于 x 向位移变化速度. 在俯仰很低约 20° 时, y 向的位移变化速度明显变缓慢.

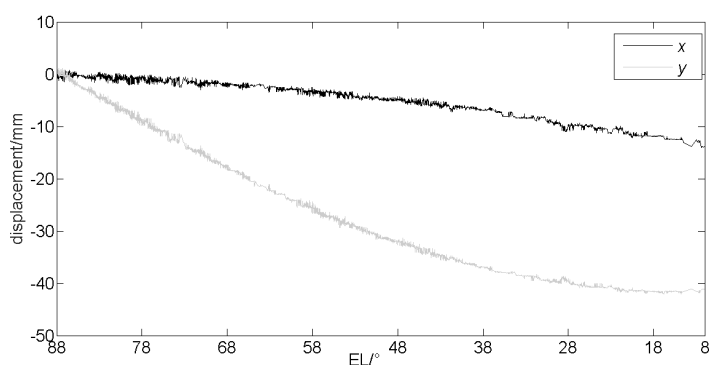


图 9 重力对副面位姿的影响

Fig. 9 The effect of gravity on the sub-reflector's position

3.5 温度对副面位姿变化的影响

由温度引起的热变形也是影响望远镜指向精度的一个重要因素. 早上, 在太阳升起的过程中, 朝向太阳的撑腿温度会迅速上升从而导致副面位置发生位移. 选择一个晴天, 温度 20°C – 32°C , 日出时间04:53, 日落时间18:52. 将TM65 m望远镜朝天放置, 根据采集到的光斑数据解析副面 x 向和 y 向的位移变化情况, 结果如图10所示.

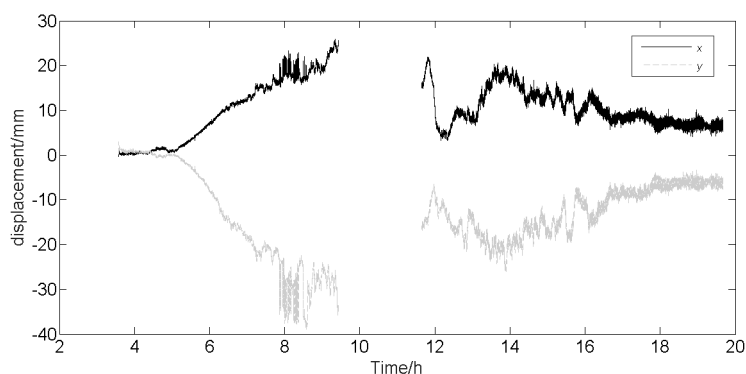


图 10 温度对副面位姿的影响

Fig. 10 The effect of temperature on the sub-reflector's position

从图10可以看到, 由于温度的变化, 副面位移变化有20 mm以上. 此外, 也发现早晨太阳升起, 温度急速上升导致副面位移变化速度快, 而下午太阳降落过程中, 温度下降速度慢, 因此副面位移变化速度慢.

4 PSD法与射电法的比较

目前天马望远镜采用射电法建立了随俯仰角变化的副面位姿随动调整模型. 射电法通过测试副面随动与固定时对天线效率的影响找到副面在不同俯仰角时的最佳位置, 从而构建重力模型. 结果表明副面随动模型可以有效改善TM65 m望远镜在高低仰角上的效率^[8], 以X波段工作频率为例, 目前的副面随动模型使得在整个俯仰角范围内天线效率达到60%.

副面 x 方向即水平方向, 平行于望远镜俯仰轴, 由于天线自身的对称性, 其导致副面发生的偏移不会大. 副面 y 方向与俯仰齿轮面平行(在天线水平时, 为重力方向), z 向为焦距对外方向, 这两个方向受重力影响比较大.

将PSD法测得的结果与现有射电法构建的重力模型进行比较, 由于 y 向和 z 向受重力影响较大, 这里主要对这两个方法在 y 向和 z 向的结果进行对比, 如图11–12所示. 图中, y -test和 z -test是射电法实测结果找到功率最大值和天线效率最大值对应的望远镜副面的 y 向和 z 向偏差, y -fitting和 z -fitting是根据实测数据拟合出的全俯仰上的副面位姿的最佳位置; y sub-fitting和 z sub-fitting是根据PSD法实测数据拟合出的全俯仰上对副面位姿的补偿量, 并通过曲线平移与 y -fitting和 z -fitting达到零点重合的结果. 对比发现两种方法在 y 向和 z 向两个方向上的一致性较好, 量级和变化趋势都比较接近.

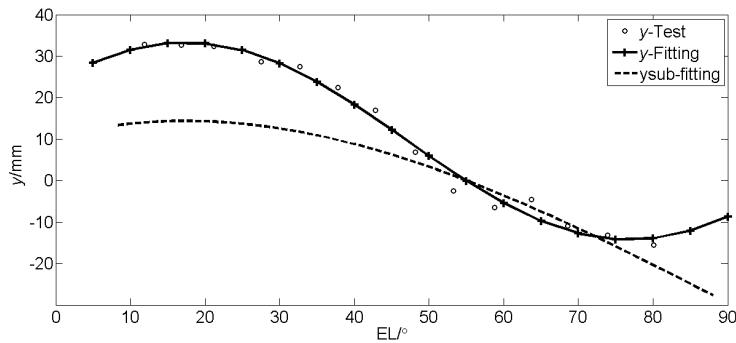


图 11 副面 y 方向位移随俯仰变化

Fig. 11 Variation of the y -direction displacement of sub-reflector with EL

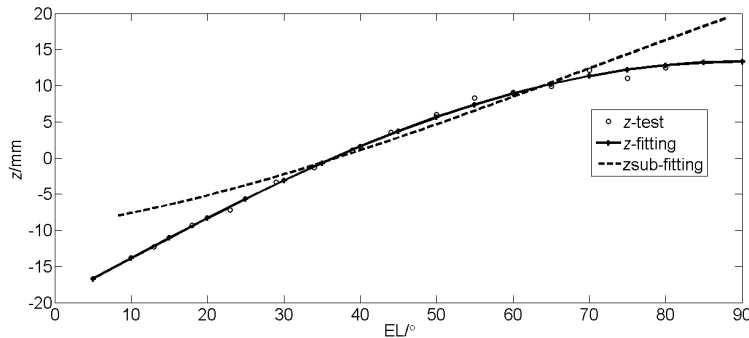


图 12 副面 z 方向位移随俯仰变化

Fig. 12 Variation of the z -direction displacement of sub-reflector with EL

5 总结与展望

TM65 m系统为了提高天线的指向精度, 通过构建主反射面模型、副反射面模型、指向模型等手段来综合提高. 本文介绍了副面上安装激光设备的设计与安装测试, 提出的PSD方法能够单独分析测量副面支撑结构的变形, 相比于射电法更加简单直观. 对于高低俯仰上副面的重力模型测量, PSD法和射电法结果有较好的一致性. 使用PSD法对

温度这个不确定因素对望远镜跟踪的影响给出了定量分析, 且在实际应用中可以在望远镜跟踪过程中实时监测副反射面位姿变化. 这一方法有助于测量和分析各种因素导致的大型射电望远镜的副面位姿变化. 下一步的工作中, 将会考虑长距离激光测距设备在副反射面上的固定安装, 并编写控制软件实现受温度等不确定因素影响下的副面位姿的实时修正与指向模型的进一步优化.

参 考 文 献

- [1] 程景全. 天文望远镜原理和设计——射电、红外、光学、X射线和Y射线望远镜. 北京: 中国科学技术出版社, 2003: 193
- [2] Dou Y C, Yao J T, Hou Y L, et al. Robot, 2012, 34: 399
- [3] Gawronski W. Proceedings of 2005 American Control Conference. Portland: IEEE, 2005: 3758
- [4] Ries P, Hunter T R, Constantikes K T, et al. PASP, 2011, 123: 682
- [5] 王锦清, 虞林峰, 赵融冰, 等. 中国科学: 物理学力学天文学, 2014, 44: 1232
- [6] 虞林峰, 王锦清, 赵融冰, 等. 天文学报, 2015, 56: 165
- [7] Yu L F, Wang J Q, Zhao R B, et al. ChA&A, 2015, 39: 524
- [8] 孙正雄, 陈岚, 王锦清. 天文学报, 2016, 57: 102

The Measurement of Sub-reflector's Displacements of Large Radio Telescopes by PSD Method

JIANG Yong-chen¹ WANG Jin-qing^{1,2} GOU Wei¹ YU Lin-feng¹
JIANG Yong-bin¹

(1 Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030)
(2 Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210033)

ABSTRACT Pointing accuracy is a challenging and key technical indicator of large radio telescopes. When telescopes are working, with the change of azimuth and elevation, the comprehensive influence of gravity and sunshine on the legs of sub-reflector will cause displacements of sub-reflector of the telescopes. Thus the pointing error increases, and efficiency of antenna decreases. Based on the TianMa 65 meter radio telescope, a measurement system for sub-reflector's displacements is constructed by Position Sensing Device (PSD) method. Three dimensional displacements data of sub-reflector can be collected by this method. Gravity model is built. Results from this model and existing model built by radio method are compared, and their results are consistent. In addition, sub-reflector's displacements caused by sunshine (local temperature effect on legs) can be analyzed. And this system can monitor displacements of sub-reflector caused by wind load and instantaneous start-stop of telescope.

Key words telescope, pointing, gravity, sunshine