doi: 10.15940/j.cnki.0001-5245.2017.04.005

轨道不平度对天线指向的影响分析与 修正*

刘 璇^{1,2,3} 艾力·玉苏甫^{1,2} 项斌斌^{1,2,4} 王从思^{4,5} 许 谦^{1,2} 王 军^{1,2,3}

(1 中国科学院新疆天文台 乌鲁木齐 830011)
(2 中国科学院射电天文重点实验室 乌鲁木齐 830011)
(3 中国科学院大学 北京 100049)
(4 西安电子科技大学机电工程学院 西安 710071)
(5 电子装备结构设计教育部重点实验室 西安 710071)

摘要 基于天线轨道不平度对望远镜指向的影响机理,测量并分析采用整体焊接轨道 技术后的乌鲁木齐南山26 m射电望远镜(NanShan Radio Telescope, NSRT)天线轨道误 差的分布情况及对指向的影响,从而对指向模型进行修正.采用移动最小二乘法(Moving Least-Squares, MLS)将测得的天线轨道高度差拟合成一个闭合的轨道高度分布曲线,确 定因轨道不平度影响的天线方位轴偏差,对比实测天线座架变形的方位轴偏差,发现二者 具有较强的相关性.考虑到天线座架重力变形的偏差包含南北向和东西向偏差,建立新的 指向偏差模型进行校正.最后通过对已知校准射电源进行扫描测量,将指向偏差数据进行 拟合.结果表明:新建的指向修正模型能够抑制已知指向模型偏差中的正弦分量,从而说 明所建模型很好地反映了天线的指向偏差并对偏差具有一定修正作用.

关键词 望远镜, 天文仪器, 方法和技术, 方法: 数据分析 中图分类号: P111; 文献标识码: A

1 引言

NanShan Radio Telescope (NSRT)是我国探月工程中VLBI (Very Long Baseline Interferometry)测轨系统的重要组成部分之一. 望远镜采用方位/俯仰轮轨式结构. 在天 线系统中, 轨道的精度^[1]是一项重要指标, 轨道的平整度^[2]会影响天线观测的指向精度, 从而影响观测结果.

NSRT天线轨道在升级改造前采用11段轨道拼接而成,相邻轨道间留有3-5 mm的间隙.经过20 yr的使用后,轨道接缝处的刚性逐渐变差,从而严重影响天线指向性.

[†]liuxuan@xao.ac.cn

²⁰¹⁶⁻¹²⁻²⁰收到原稿, 2017-02-09收到修改稿

^{*}国家重点基础研究发展计划(2015CB857100)、国家自然科学基金项目(11403089、51490660)、 中国科学院天文台站设备更新及重大仪器设备运行专项经费(2014、2015)资助

2014—2015年NSRT进行了改造升级,天线轨道采用高强度耐磨钢,其断面摒弃早期的"工型"结构,采用便于焊接的"凸型"结构,整体轨道焊接平面度要求优于0.45 mm.对初步试验结果分析,轨道接头变形小于0.35 mm,焊缝质量达到国标II级以上.图1所示为轨道接缝处的间隙图,其中左图为旧轨道接缝图,右图为新轨道接缝图.







Fig. 1 $\,$ Schematic diagram of the old (left) and new (right) welding gap of NSTR track

本文通过精确测量轨道的高程,得到轨道高度变化曲线以及实测天线座架倾斜量, 最后得到新轨的天线指向修正模型.通过将理论指向偏差与实际扫描已知源的指向偏差 进行对比,发现该模型能很好地实现天线指向的校正.

2 天线轨道不平度与座架倾斜误差测量

本文采用蔡司水准仪^[3]测量NSRT天线轨道的不平度,标记轨道观测点77个(单圈), 加上焊缝观测点11个(单圈),形成一个包含88个点均匀分布内外轨的往返闭合圆形水准 线路.各个观测站点与固定点高度比较,即可得到自身的站点高度差.图2为蔡司水准仪 对单个观测点记录高程差的示意图,图3为轨道整体观测点分布及两个焊缝之间的观测 点的具体分布示意图.



Fig. 2 Antenna Fig. 3 Distributions of the measurement positions and the welds of the track measurement track

水准仪测量时, NSRT天线以正北方向的外轨为基准点, 轨道共有11段弧形钢轨, 共

35 - 2

含有11个焊缝.考虑焊缝对轨道影响较大,在焊点两边各加一个观测点,则焊缝处共 有3个观测点(单个圆周上).焊缝间存在一段较长的弧形轨道,五点法能够很好地描述曲 线变化趋势,在两个焊缝间增加5个观测点(单个圆周上),则内、外轨单圈各有88个观测 点.考虑整个轨道面时,在与焊缝相邻的基准点处中间位置增加2个观测点,一共标记焊 缝11处,而在焊缝与焊缝之间的轨道中间位置,逆时针标记观测点10个.

我们取夜晚22:00—04:30期间对天线座架变形进行测量,此时天线各处温差较为均匀,避免温度等因素对天线变形的影响^[4].本文采用两台精度均为0.02 mm/m的框式 仪*A*和*B*为一组倾斜测量仪,其中*A*平行于俯仰轴,*B*垂直于俯仰轴.每组水平仪放置如 图4所示,放置在天线二层平台一侧横梁上.





Fig. 4 Schematic diagram and picture of the frame leveler measurement

两组框式水平仪按图5放置在天线座架二层平台上,每次进行测量时,天线以5°为间 隔进行顺时针方向转动,并将俯仰角固定,测得天线在不同方位角(azimuth, AZ)时所对 应的倾斜度.



图 5 框式水平仪放置示意图

Fig. 5 $\,$ Schematic diagram of the frame leveler placed on antenna pedestal

3 轨道对指向的影响

为了更好地分析轨道的不平度与指向性偏差之间的联系,首先分析蔡司水准仪所测

得的内外轨高度差数据,可发现内外轨相关系数达到0.9,具有极高相关性,可知内外轨高度差变化对天线方位轴的倾斜影响具有一致性.考虑到测得的轨道高度差值为分布的离散点,不能完全表示轨道高度的连续变化,我们通过采用移动最小二乘法(Moving Least-Squares, MLS)^[5]与最小二乘法(Least-Squares, LS)对比来拟合整个轨道的高度差趋势,发现MLS拟合效果更好.最后根据4个滚轮对应的两个正交向量得到圆形轨道面的法向量,得到轨道高度变化而引起的中心轴偏斜的理论^[6].

3.1 MLS确定轨道的曲线

3.1.1 拟合原理

在对NSRT天线轨道高度差的变化进行分析时,我们认为轨道不同方位角的高度差 只受到其附近点的影响,从而由附近点组成了该方位角的影响区域.在移动最小二乘法 中,通过调用紧支权函数的方法,对离散数据点进行曲线拟合,最后得到轨道高度曲线.

3.1.2 算法介绍

通过建立方位角的影响区域,建立拟合函数表示为:

$$\boldsymbol{H}(\alpha) = \sum_{i=1}^{n} \boldsymbol{b}_{i}(\alpha) \boldsymbol{k}_{i}(\alpha) = \boldsymbol{k}^{\mathrm{T}}(\alpha) \boldsymbol{b}(\alpha), \qquad (1)$$

其中 $b(\alpha)$ 是方位角的待求系数, $k(\alpha)$ 为基函数, $H(\alpha)$ 是 α 处的高度差.

考虑加权离散范式L,得:

$$\boldsymbol{L} = \sum_{j=1}^{m} \boldsymbol{\omega}(\alpha - \alpha_j) [\boldsymbol{H}(\boldsymbol{\alpha}) - \boldsymbol{h}_j]^2 = \sum_{j=1}^{m} \boldsymbol{\omega}(\alpha - \alpha_j) [\boldsymbol{k}^{\mathrm{T}}(\alpha_j) \boldsymbol{b}(\alpha) - \boldsymbol{h}_j]^2, \qquad (2)$$

其中*m*是影响区域方位角个数, $\omega(\alpha_j)$ 是 α_j 处的权值, h_j 是 α_j 处的轨道高度差实测值. 通过对待定系数 $b(\alpha)$ 求偏导, 从而确定拟合函数, 即:

$$\frac{\partial \boldsymbol{L}}{\partial \boldsymbol{b}} = \boldsymbol{X}\boldsymbol{b} - \boldsymbol{Y}\boldsymbol{h} = 0, \qquad (3)$$

可得:

$$\boldsymbol{b} = \boldsymbol{X}^{-1} \boldsymbol{Y} \boldsymbol{h} \,, \tag{4}$$

 $\ddagger \mathbf{\Psi} \mathbf{X} = \sum_{j=1}^{m} \boldsymbol{\omega}(\alpha_j) \mathbf{k}(\alpha) \mathbf{k}^{\mathrm{T}}(\alpha), \ \mathbf{Y} = [\boldsymbol{\omega}(\alpha_1) k(\alpha_1) \ \boldsymbol{\omega}(\alpha_2) k(\alpha_2) \ \cdots \ \boldsymbol{\omega}(\alpha_m) k(\alpha_m)], \ \mathbf{H} = [h_1 \ h_2 \ \cdots \ h_m].$

通过(4)式求解出系数b,从而得曲线函数H(α)表示轨道高程变化.

3.1.3 紧支权函数的确定

在对轨道曲线进行拟合时, 权值大小与距离 α_j 处方位角大小成反比, 即在影响区域内, 与 α_j 处距离越远, 权值越小. 通过定义变量 $r = \|\alpha - \alpha_j\|_2$, $r_{av} = r/r_{max}$ 为影响区域范围, 紧支权函数表示为:

$$\omega(r_{\rm av}) = \begin{cases} \frac{2}{3} - 4r_{\rm av}^2 + 4r_{\rm av}^3 & r_{\rm av} \leqslant \frac{1}{2} \\ \frac{4}{3} - 4r_{\rm av} + 4r_{\rm av}^2 - \frac{4}{3}r_{\rm av}^3 & \frac{1}{2} \leqslant r_{\rm av} \leqslant 1 \\ 0 & r_{\rm av} \geqslant 1 \end{cases}$$
(5)

3.2 轨道曲线拟合结果

将轨道上测量得到的88个方位角实测点进行网格化,对每个网格循环计算b(α),最 后链接网格点形成拟合的轨道高度差曲线. 图6中实线为MLS拟合曲线, 虚线为LS拟合 曲线, 空心点表示实测轨道高度差, 其中最小均方误差error^{LS} = 1.16×10^{-4} , error^{MLS} = 1.41 × 10⁻⁵, 这说明MLS不但能够较好地将轨道的变化趋势表示出来, 而且精度也 比LS拟合高. 总体上看轨道高度差最大值不超过0.03 mm, 具有很好的平整度.



Fig. 6 The fitting curves of the errors of antenna track

3.3 轨道高度差确定方位轴的理论偏差

通过实际拟合得到一个连续的天线轨道面闭合曲线,而天线方位轴的倾斜受到轨道 面上4个接触滚轮的高度差影响,可以得到不同方位角时,天线方位轴的倾斜度的大小. 图7中虚线为内轨高度差确定的天线偏差,实线为外轨高度差确定的天线偏差,可以看 出:轨道的内外高度差影响一致,总体高度差变化对整个天线的偏移有一定的影响,最 大偏移量不超过1.9″,说明轨道的平整度良好.



图 7 方位轴理论偏移量

Fig. 7 Theoretical offset of the antenna azimuth axis

4 框式水平仪对天线整体方位角偏差的测量

58卷

本文采用4个规格一样的框式水平仪, 按上文所述分成两组. 将两组水平仪放置在天线的二次平台上, 记录天线两侧偏移量 Δx_i (i = 1, 2)和 Δy_i (i = 1, 2), 从而最后确定天线的方位轴偏差. 表1中记录了在进行测量天线方位轴时, 天线表面的温度和风速. 天线表面温度基本稳定在13.5°C, 风速稳定在1.7 m/s. 说明测量天线偏差时, 温度与风速等因素可以作为常量, 不考虑这些因素对天线倾斜的影响.

表 1 天线表面温度及风速随着测量时间的变化 Table 1 The variations of the antenna surface temperature and wind speed with time

Parameter	Time						
	22:08	23:01	00:00	01:01	02:00	03:02	04:30
Temperature/°C	13.5	13.2	13.5	13.9	13.2	13.6	13.3
Wind speed/(m/s)	1.4	1.7	1.7	1.8	1.8	1.6	1.9

利用水平仪, 我们对NSRT 26 m天线座架进行测量, 俯仰角为35°. 共记录74个测量点(形成一个完全闭合的圆, 有一定冗余度), 从正北方向(方位轴起始角记为0°), 每隔5°记录一次方位轴的偏差 Δx_i 和 Δy_i , 得到图8. 可见, 两组数据中, 左图为 A_i 的偏移量 Δx_i , 表示框式水平仪平行俯仰轴的读数; 右图为 B_i 的偏移量 Δy_i , 表示框式水平仪 垂直俯仰轴的读数. 分析两组水平仪测量的方位轴偏差可知, 两组不同水平仪记录的 Δx_i 与 Δy_i 都具有较高的相关性.

4 期



图 8 框式水平仪实测方位轴偏移量

Fig. 8 The azimuth offset measured by the frame levelers

5 水平仪与水准仪对指向的影响

通过分析框式水平仪测得的x和y的偏差量,即可求得实际指向偏差 $\sqrt{x^2 + y^2}$ 测得 天线整体的方位轴实测偏移量;通过蔡司水准仪测量得到4个滚轮观测点的高程差,建立 两组正交向量,从而确定轨道面的方位角理论偏差.对比得到图9,图中实线为天线理论 倾斜度,虚线为实测倾斜度.由图9可见:两条曲线的偏差大部分在1"之内,且两条曲线 对指向变化的影响规律具有一致性.二者的相关系数在0.5–0.7之间,说明轨道的不平整 度对天线的指向性具有明显的相关性,很好地解释了轨道的不平整度是引起天线倾斜的 主要因素.



图 9 天线方位轴理论与实测倾斜度

Fig. 9 The theoretical and measured values of antenna azimuth offset

6 考虑轨道误差的指向修正模型

在本文中考虑到天线刚体形变的不一致性、二层平台与俯仰轴各自的倾斜量存在 差异,而轨道的不平度引起天线方位轴的东西、南北向的偏差以及天线座架重力变形引 起的东西、南北向的偏差^[7]是影响天线指向偏差的因素.如图9所示,通过MLS拟合的轨 道面曲线,可得到在不同方位角时,天线因轨道面的不平而引起的整体倾斜量n₂,从而求 得方位轴的实测拟合偏差^[8].而通过两组框式水平仪测量天线二层平台的偏差Δx、Δy, 可以得到天线座架的形变引起的指向偏差^[9].本文通过对天线的结构逐层^[10]进行分析, 图10中平面AC的倾斜将对二层平台产生一定的偏移量,最终导致俯仰轴的偏差,从而影 响天线的指向.本文将轨道的不平整度与天线座架的重力形变相结合^[11],确定二者共同 作用下天线指向的偏差^[12-14].建立的修正模型为

$$\Delta E = p_1 \cos A + p_2 \sin A + p_3 \cos E + p_4 A_m \sin(E + \phi), \qquad (6)$$

其中*p*₁、*p*₂分别为方位轴东西、南北向偏差系数, *p*₃、*p*₄分别为重力变形东西、南北向偏差系数, *A_m、 φ*为轨道不平度及天线座架变形引起的修正补偿系数, *A、E*分别指天线 实时的方位角和俯仰角.



图 10 轨道不平整度及天线座架重力变形对天线指向影响的示意图

Fig. 10 Schematic diagram of antenna pointing influenced by the track irregularity and the gravity deformation of antenna pedestal

在求解修正模型的过程中,首先需要确定修正系数^[3] A_m 、 ϕ . 这里可以将 $A_m \sin(E + \phi)$ 表示为

$$\alpha_{i1}(i) = \alpha_{\rm c} s_i - \alpha_{\rm s} c_i \,, \tag{7}$$

$$\alpha_{i2}(i) = \alpha_{\rm c} c_i - \alpha_{\rm s} s_i \,, \tag{8}$$

其中 $\alpha_{\rm c} = A_{\rm m} \cos \phi$, $\alpha_{\rm s} = A_{\rm m} \sin \phi$, $c_i = \cos E(i)$ 为天线俯仰角余弦分量, $s_i = \sin E(i)$ 为 正弦分量.

令 $\boldsymbol{P} = \begin{bmatrix} c & -s \\ s & c \end{bmatrix}$ 表示不同俯仰角时引起的变量矩阵, $\boldsymbol{X} =$ $\begin{vmatrix} \alpha_{c} \\ \alpha_{s} \end{vmatrix}$ 为修正系数向量, $\alpha = [\alpha_{i1} \ \alpha_{i2}]$ 则表示为水平仪实测倾斜量矩阵,得到方程组为

$$PX = \alpha, \qquad (9)$$

通过最小二乘法将框式水平仪测得的数据拟合求解得到

$$\boldsymbol{X} = (\boldsymbol{P}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P})^{-1}\boldsymbol{P}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\alpha}, \qquad (10)$$

已知 $A_m = \sqrt{X_{11}^2 + X_{21}^2}, \phi = \tan^{-1}(\frac{X_{21}}{X_{11}}),$ 则可得到修正项的幅度和相位偏差. 当确定 了修正项的幅度和相位偏差后,只需求解(6)式中的误差向量p即可.通过已知源的方位 俯仰角,得到天线的实际指向偏差,从而对误差系数进行拟合求解.

乘法求解误差系数:

$$\boldsymbol{p} = (\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B})^{-1}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\Delta\boldsymbol{E}\,. \tag{11}$$

修正模型确定的指向偏差与实际指向偏差对比如图11中左图所示, "*"为实际的指 向偏差, 而空心点则表示本文修正模型确定的指向偏差, 图11中右图为文献[8]所述的修 正模型确定的指向偏差与实际指向偏差对比, "*"为实际的指向偏差, 而空心点则表示文 献[8]所述的修正模型确定的指向偏差.对比左、右两图可以发现,本文的指向偏差较为 集中,且偏差范围较小,证明该模型的实用性较强.



图 11 本文模型(左)与文献[8] (右)修正前后指向偏差分布

Fig. 11 The pointing deviation distribution of uncorrected and corrected models of this paper (left) and ref.[8] (right)

4 期

最后分别用本文建立的指向修正模型和文献[8]所述的修正模型进行修正,并对修 正效果进行了比较.如图12左图所示,文献[8]所述的修正模型结果含有一个明显的正 弦分量(空心点所示),而采用本文所提的修正模型后,通过前文分析的轨道不平整度及 天线结构变形对指向的影响,将(10)式求得的修正角代入(6)式中,从而消除部分正弦分 量(实心点所示),使本文的模型指向偏差集中在0.04"附近;对比两个修正模型的修正差 如图12右图所示,二者偏差在0.04"以内.说明本文的修正模型比采用文献[8]所述的方法 修正效果好.



图 12 两个修正模型对指向偏差的修正量(左)及两者修正量之差(右)

Fig. 12 Corrected values of pointing offset (left) of the two corrected models and their differences (right)

7 结论

本文通过对乌鲁木齐NSRT 26 m天线轨道整改后进行不平整度的测量,从而分析轨 道的误差对天线指向的影响,建立了修正模型,从而校正指向模型.通过实际测量分析可 以得到以下结论:

(1)修正后轨道切向、径向精度均有明显提高,普遍偏差在0.09 mm内,且最大高度 差在焊缝处,不超过0.16 mm,满足天线水平精度.

(2)实测的天线框架倾斜度与轨道不平整度确定的天线偏差具有强相关性,很好地 说明天线指向偏差主要受到轨道不平整度的影响.

(3)通过对比文献[8]中的修正偏差,发现本文中修正模型通过将重力变形偏差分解 为东西、南北向后,将轨道不平整度与天线座架变形同时考虑作为对天线指向影响的补 偿系数,实际对比指向偏差发现,所建模型对指向偏差校准有一定提高,说明该模型能够 很好地校正轨道误差对指向的影响,具有一定的合理性.

为了更加精确地提高指向误差的精度,在后续研究中,将进一步考虑其他因素,如温度、风载等因素,建立相应的指向误差修正模型.

致谢

感谢参与本工作的乌鲁木齐南山基地相关工作人员.

参考文献

- Levy R. Structural Engineering of Microwave Antennas for Electrical, Mechanical, and Civil Engineers. New York: IEEE Press, 1996
- [2] Constantikes K. Measuring and Predicting Track Induced Pointing Errors for the Green Bank Telescope. Ottawa: USNC/CNC/URSI North American Radio Science Meeting, July 2007
- [3] 张正禄, 邓勇, 罗长林, 等. 武汉大学学报: 信息科学版, 2005, 30: 1
- $\left[4\right]$ Wodek G, Farrokh B, Ofelia Q, et al. IAPM, 2000, 42: 28
- [5] 曾清红, 卢德唐. 工程图学学报, 2004, 1:85
- [6] Meeks M L, Ball J, Hull A, et al. ITAP, 1968, 16: 746
- [7] Vandenberg N I, Himwich W E. Pointing Model Derivation. Washington: NASA Goddard Space Flight Center Space Geodesy Project, 1993
- [8] 李永江, 艾力·玉苏甫, 张正禄, 等. 武汉大学学报: 信息科学版, 2013, 38: 177
- [9] 付丽,仲伟业,乔海花,等.天文学报,2015,56:378
- $[10]\,$ Jiang Z Y, Kong D Q, Zhang H B, et al. AR&T, 2015, 12: 418
- [11] Maneri E, Gawronski W. IAPM, 2002, 44: 23
- $\left[12\right]$ Kong D
 Q, Wang S G, Wang J Q, et al. RAA, 2014, 14: 733
- [13] 虞林峰, 王锦清, 赵融冰, 等. 天文学报, 2015, 56: 165
- [14] Yu L F, Wang J Q, Zhao R B, et al. ChA&A, 2015, 39: 524

Analysis and Correction of the Influence of the Track Irregularity on Antenna Pointing

LIU Xuan^{1,2,3} AILI Yusup^{1,2} XIANG Bin-bin^{1,2,4} WANG Cong-si^{4,5} XU Qian^{1,2} WANG Jun^{1,2,3}

(1 Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011)

(2 Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011)

(3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

(4 School of Mechano-Electrical Engineering, Xidian University, Xi'an 710071) (5 Key Laboratory of Electronic Equipment Structure Design of Ministry of Education, Xi'an 710071)

ABSTRACT According to the influence mechanism of the antenna track irregularity on telescope pointing accuracy, the distribution of the track deviation and the influence of the deviation on the pointing of the Urumqi Nanshan 26 m telescope are reanalyzed, and provided that the whole welding track technology is used, thus the pointing model is correspondingly corrected. By using the moving least-squares method to fit the height of antenna track as a closed curve, the antenna azimuth tilt can be determined through the track irregularity. Through comparing the measured deviation of the antenna azimuth axis which is introduced by the deformation of the antenna mount frame, it can be found that the measured deformation is strongly correlated with the theoretical deformation. A new pointing model of deviation is established in view of the gravity deformations of antenna including the north-south and east-west deviations. Furthermore, the data of pointing deviation are filtered through scanning a known calibration radio source in the sky. The result shows that the sinusoidal component of the model deviation is well constrained by the new pointing correction model, thus it demonstrates that the new model can well reflect the antenna pointing deviation as well as amend it in some extend.

Key words telescopes, astronomical instrumentation, methods and techniques, methods: data analysis