

文章编号: 2095-4980(2017)04-0634-06

大型反射面天线轨道不平度对指向精确度的影响

吴 江, 王 博

(西安电子科技大学 电子装备结构设计教育部重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘 要: 针对奇台 110 m 口径射电望远镜高指向精确度特点, 在现有天线指向模型的基础上, 推导了轨道误差源(轨道不平度)对指向精确度影响的关系模型。基于功率谱函数傅里叶级数系数归并法, 建立了天线轨道不平度数学模型。针对国外某完全焊接式 50 m 天线, 轨道水平度测量数据, 通过实验数值仿真, 采用查表法补偿轨道不平度造成的天线指向误差, 使俯仰角误差精确度提高了 1.5", 对高指向精确度天线实现的研究提供了有力支持。

关键词: 轨道不平度; 指向精确度; 指向模型; 射电望远镜

中图分类号: TN823⁺.27

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201704.0634

Influence of track irregularity on the pointing accuracy for large reflector antenna

WU Jiang, WANG Bo

(Key Laboratory of electronic Equipment Structure Design, Ministry of Education, Xidian University, Xi'an Shaanxi 710071, China)

Abstract: For the characteristic of high pointing accuracy of QiTai 110 m diameter radio telescope, a pointing model is deduced on the relationship between the pointing error and track flatness. Based on the power spectrum function and Fourier series coefficients merging method, a mathematical model of antenna track roughness is established. Through the experiment on a foreign 50 m antenna with completely welded track, antenna elevation angle error is decreased by 1.5", which provides strong support to achieve high pointing accuracy of antenna research.

Keywords: track flatness; pointing accuracy; pointing model; radio telescope

指向精确度是大型反射面天线高频工作性能评价的重要指标之一, 主要受重力变形、风荷、热变形、轨道不平度等误差源影响, 特别是对于指向精确度高达 2.5"(1° 为 3 600")的新疆奇台 110 m 口径射电望远镜(Qi Tai radioTelescope, QTT)^[1], 结构复杂, 造成其指向误差的因素有很多, 因此有必要根据 QTT 的结构建立一个考虑各种误差源的指向误差模型, 其作用: a) 可以起到总的指向误差调控作用, 无论是对于可预见性的还是不可预见性的指向误差; b) 可以分离并且测量各个对指向误差造成影响的误差源; c) 使指向残差达到最小; d) 对于程序设计人员和观看人员而言容易理解和实施。目前有的天线指向修正模型, 主要考虑了天线的轴系误差对指向的影响^[2-5], 而缺少分析考虑各误差源对轴系的影响机理, 更没有考虑轨道不平度等非线性误差对轴系造成的影响, 大多数仅仅是对轨道不平度进行了离散的测量, 以及特定位置的指向矫正^[6-7], 缺少实时的天线全工况下的矫正方法。针对上述问题, 本文对超大型轮轨式天线, 分析了轨道不平度对指向精确度的影响机理, 提出了一种考虑由于轨道不平度引起的指向误差模型以及描述方法, 弥补了现有指向模型的不足, 并且通过轨道不平度函数以及指向模型矫正, 使轨道不平度造成的指向误差减小到($\pm 3 \times 10^{-15}$)"。

1 轨道不平度对天线指向精确度的影响机理

1.1 轨道不平度造成方位轴的倾斜

在理想水平面上, 方位轨道是一个半径为 ρ 的圆环, 轨道不平度高程为 $z(A)$, 其中 A 为方位角, $-\pi \leq A \leq \pi$,

收稿日期: 2015-07-23; 修回日期: 2016-05-09

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2015CB857100)

$z(A)/\rho \ll 1$, 图1为 QTT 方位架结构, 方位架的6组滚轮支撑点不同导致方位架绕 x_a, y_a, z_a 轴扭转。

$o_a x_a y_a z_a$ 一固定于方位轴的坐标系, 原点在方位轨道中心, z_a 轴与方位轴重合, 整体坐标系跟随方位轴转动、偏转而运动; 当天线不存在轴系误差且方位角 $A=0^\circ$ 时, 其与大地坐标系 $oxyz$ 重合, 如图2所示。

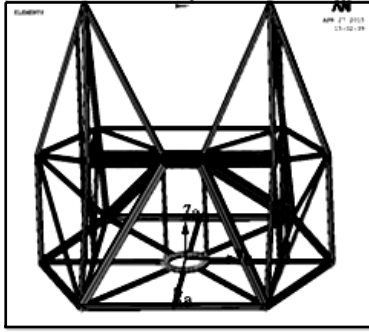


Fig.1 QTT azimuthal structure
图1 QTT 方位架

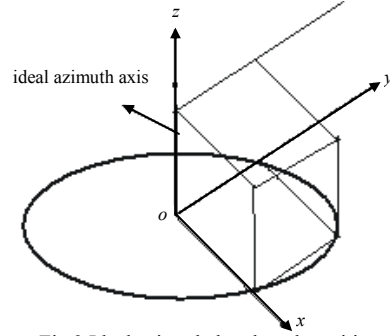


Fig.2 Ideal azimuthal and track position
图2 理想方位架与轨道位置

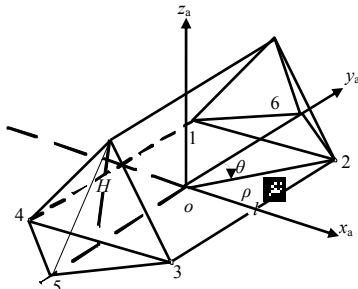


Fig.3(a) QTT azimuthal structure
图3(a) QTT 方位架结构

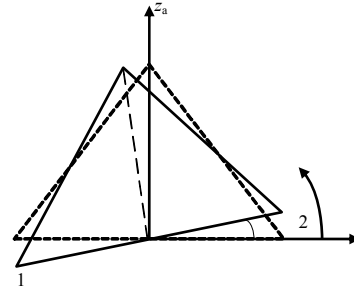


Fig.3(b) Rotator of pointer around z_a axis
图3(b) 指向绕 z_a 轴转量

1) 方位轴绕 z 轴的转动对指向精确度造成的影响

轨道 1,2 两点的高度分别为 $(\rho, A_1, z(A_1)), (\rho, A_2, z(A_2))$, 这两点造成上方俯仰轴端点的平移量为 δ_{12}, δ_{34} 同理, ϕ_{az} 表示轨道不平度造成的方位轴绕图2中 z 轴的转量, 同理有 ϕ_{ax}, ϕ_{ay} , 俯仰轴距离地面的高度为 H , 俯仰轴长 l , ρ 为轨道半径, θ 为图3(a)中 $\angle 2o6$ 夹角, 5,6 号支撑点在方位轴坐标系轴线上, 对绕 z 轴转动无影响。则:

$$\delta_{12} = H \left[\frac{z(A_2) - z(A_1)}{2\rho \cos(\pi/4)} \right], \text{ 同理 } \delta_{34} = H \left[\frac{z(A_3) - z(A_4)}{2\rho \cos(\pi/4)} \right] \quad (1)$$

$$\phi_{az} = \frac{\delta_{12} - \delta_{34}}{l} = \frac{H \left[\frac{z(A_2) - z(A_1)}{2\rho \cos(\pi/4)} \right] - H \left[\frac{z(A_3) - z(A_4)}{2\rho \cos(\pi/4)} \right]}{2\rho \cos(\pi/4)} = \frac{H(z(A_2) + z(A_4) - z(A_1) - z(A_3))}{2\rho^2} \quad (2)$$

2) 方位轴绕 x 轴的转动对指向精确度造成的影响:

$$\begin{cases} \Delta x_1 = \left[\frac{z(A_3) - z(A_1)}{2\rho} \right] \cos \theta, \Delta x_2 = \left[\frac{z(A_2) - z(A_4)}{2\rho} \right] \cos \theta, \Delta x_3 = \left[\frac{z(A_5) - z(A_6)}{2\rho} \right] \\ \phi_{ax} = \Delta x_1 + \Delta x_2 + \Delta x_3 \end{cases} \quad (3)$$

式中 $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3$ 分别表示方位架上对应支撑点间 z 向差值。

3) 方位轴绕 y 轴的转动对指向精确度造成的影响

$$\begin{cases} \Delta y_1 = \left[\frac{z(A_1) - z(A_3)}{2\rho} \right] \cos \theta, \Delta y_2 = \left[\frac{z(A_2) - z(A_4)}{2\rho} \right] \cos \theta \\ \phi_{ay} = \Delta y_1 + \Delta y_2 \end{cases} \quad (4)$$

根据虞梦月的指向模型^[8], 在其基础上进一步推导, 总的指向误差模型如式(5)所示, 当 $\phi_{ax} = \phi_{ay} = \phi_{az} = \phi_{ex} =$

$\varphi_{ey} = \varphi_{ez} = \varphi_{ox} = \varphi_{oy} = 0$ 时, 即仅考虑轨道不平度对指向误差影响的指向模型如式(6)所示。

$$\begin{bmatrix} \Delta A \\ \Delta E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \tan E & -1 & \sin A \tan E & -\cos A \tan E & -1 & 0 & \tan E & -1 & 0 & -\sec E \\ -1 & 0 & 0 & -\cos A & -\sin A & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{tx} \\ \varphi_{ty} \\ \varphi_{tz} \\ \varphi_{ax} \\ \varphi_{ay} \\ \varphi_{az} \\ \varphi_{ex} \\ \varphi_{ey} \\ \varphi_{ez} \\ \varphi_{ox} \\ \varphi_{oy} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta A \\ \Delta E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \tan E & -1 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{tx} \\ \varphi_{ty} \\ \varphi_{tz} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} Z(A_1) \\ Z(A_2) \\ Z(A_3) \\ Z(A_4) \\ Z(A_5) \\ Z(A_6) \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \frac{-\cos \theta}{2\rho} & \frac{\cos \theta}{2\rho} & \frac{-H}{2\rho^2} \\ \frac{\cos \theta}{2\rho} & \frac{\cos \theta}{2\rho} & \frac{H}{2\rho^2} \\ \frac{\cos \theta}{2\rho} & \frac{-\cos \theta}{2\rho} & \frac{-H}{2\rho^2} \\ \frac{-\cos \theta}{2\rho} & \frac{-\cos \theta}{2\rho} & \frac{H}{2\rho^2} \\ \frac{1}{2\rho} & 0 & 0 \\ \frac{-1}{2\rho} & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{ax} & \phi_{ay} & \phi_{az} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: A 为方位角; E 为俯仰角; ΔA 为方位角误差量; ΔE 为俯仰角误差量; $\varphi_{tx}, \varphi_{ty}, \varphi_{tz}$ 为轮轨不平引起的方位架坐标系误差量, 可以根据轨道描述函数计算这些量。 $\phi_{ax}, \phi_{ay}, \phi_{az}$ 为方位轴的误差量, 其主要由轮轨的全局倾斜和方位轴的安装误差所致。 $\phi_{ex}, \phi_{ey}, \phi_{ez}$ 为俯仰轴的误差量, 其主要由方位架的变形和俯仰轴的安装误差所致。 ϕ_{ox}, ϕ_{oy} 为电轴的误差量, 其主要由反射体的变形, 副面、馈源以及主面三者之间的位置偏差引起。

式(6)指向模型推导化简中, 采用了 $\sin \varphi = \varphi, \cos \varphi = 1$, 其适用范围为 $\varphi < 0.5^\circ$, 与此时同时也引入了化简误差 $\Delta\varphi = 0.0228''$, 所以在指向误差模型中, 在考虑误差源是否对指向精确度造成影响时认为, 当误差源对指向精确度造成的误差 Δ 小于 $\Delta\varphi$ 时, 即指向误差小于计算误差时, 是可以忽略不予考虑的。

2 轨道不平度的描述

2.1 轨道不平度造成的指向误差校正方法

轨道不平度造成的天线指向误差, 主要通过伺服控制补偿, 通常的补偿方案有 3 种, 方法 1 是通过射电天文校准法^[6], 要求选取强标准射电源, 通过天文观测获取最大增益方向, 即是天线指向方向; 方法 2 是根据轨道不平度造成的倾角仪测量值, 通过指向模型矫正, 这种方法在 JCMT, 34-DSN antenna, GBT 等天线上得到应用^[9-12]。第 3 种模型是在天线拟建阶段的一个指向误差理论模型^[13], 通过查表法加入到天线伺服控制中进行补偿, 在天线建成之前指向精确度分析主要以指向模型为主。其中, 第 1 种方法适用于天线指向精确度要求不是很高的天线, 不需要单独考虑轨道不平度造成的天线指向误差, 是一种总的指向误差矫正方法; 第 2 种指向修正方法, 要求高分辨率的倾角仪, 轨道不平度的测量方法属于动态测量, 存在严重的噪声干扰; 第 3 种方法没有考虑到轨道不平度造成的指向精确度影响。本文通过轨道不平度静态测量法所测得的轨道高程, 采用拟合函数的方法, 描述轨道

的轮廓,最后再将误差添加并运用到天线指向模型中。

Kim Constantikes 采用一阶正弦函数描述轨道的整体倾斜,这种描述太粗糙,对于较低指向精确度的天线使用,对于 2.5" 要求的 QTT,需要考虑到天线轨道局部不平对指向的影响。这里提出了基于功率谱密度的傅里叶函数展开法。如图 4~图 5 所示,某 50 m 口径天线完整焊接轨道,轨道采用分段焊接,分为 20 段,每段轨道分内外环各 13 个测量点,轨道半径 20 m,焊接完成后每隔 1.38° 轨道内圈外取一个轨道不平度测量点,某一方位位置的不平度高程由对应方位角内外圈测量值的均值决定。



Fig.4 Structure of a 50 m caliber telescope
图 4 某 50 m 天线轨道分块结构

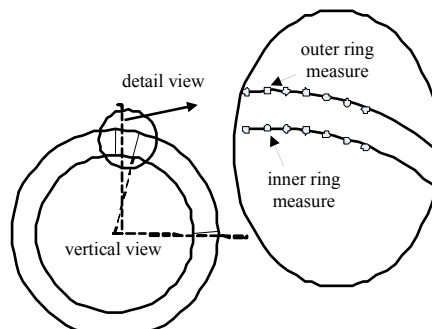


Fig.5 Measurement of a 50m caliber telescope's track
图 5 某 50 m 天线完整焊接轨道测量示意图

2.2 基于功率谱密度的傅里叶级数系数归并法

轨道的不平度是周期性的,可以看成是多个不同频率的波叠加构成的,傅里叶级数法是典型的周期性函数,具有很好的轨道不平度描述的潜质。函数描述要求尽可能的简单,在任一点过渡平滑,即函数处处可导,便于伺服控制的平缓过渡。傅里叶级数展开可以逼近任意一个曲线,展开级数越多,轨道轮廓描述得越精确,与此同时,其函数的参数也就越多,这里采用功率谱密度法挑选出主要频率,滤除无用模态,并通过系数归并,解决了上述的缺点问题。

例如,前 60 阶谐波展开时,函数展开项有 121 项,每一项幅值系数都不相同,这使得函数形式过于复杂,不利于伺服控制器的输入,所以先采用功率谱密度法,除去那些功率谱密度小的频率,展开成公式(7)所示形式,采用最小二乘原理求得 a_i, b_i 系数,再归并幅值系数,系数归并原理:四舍五入保留 1 位有效数字,例如 $0.21 \approx 0.22 \approx 0.24 \approx 0.20$,幅值系数小于 0.01 的可忽略。归并后系数个数由原来的 121 个减少到 13 个,如式(8)所示,在较少的参数个数的情况下实现了较好的模拟,模拟精确度见图 6~图 7。

采用傅里叶系数归并法后,模拟函数可以表示为:

$$z(x) = A_0 + \sum_{i=1}^n a_i \sin(iw_0 x) + b_i \cos(iw_0 x) \quad (7)$$

$$z(x) \approx a_0 + \sum_{i=1}^l c_1 f_1(w) + \dots + \sum_{i=1}^l c_k f_k(w) \quad (8)$$

式中: $f_k(w)$ 表示具有大致相同幅值系数的三角函数; $w_0 = 2\pi/360$; x 为天线的方位角。表 1 为使用该方法针对国外某高指向精确度天线轨道轮廓模拟结果,误差 P-P 值表示轨道实测轮廓与模拟函数间误差曲线的幅值范围,其中: RMS 为均方根值, RSME 为均方根误差。

表 1 傅里叶级数不同阶次模拟
Table1 Fourier series simulation of different orders

track/mm	original data	launched in the first 10 orders	launched in the first 20 orders	launched in the first 40 orders	launched in the first 60 orders	launched in the first 130 orders
RMS/mm	0.169 117	0.146 830	0.159 901	0.164 994	0.167 426	0.169 117
RSME/mm	0	0.083 914	0.055 060	0.037 118	0.023 855	$2.606\ 07 \times 10^{-16}$
number of parameters	NA	11	13	13	13	13
point to point error	0.79	0.53	0.37	0.25	0.18	1.5×10^{-15}

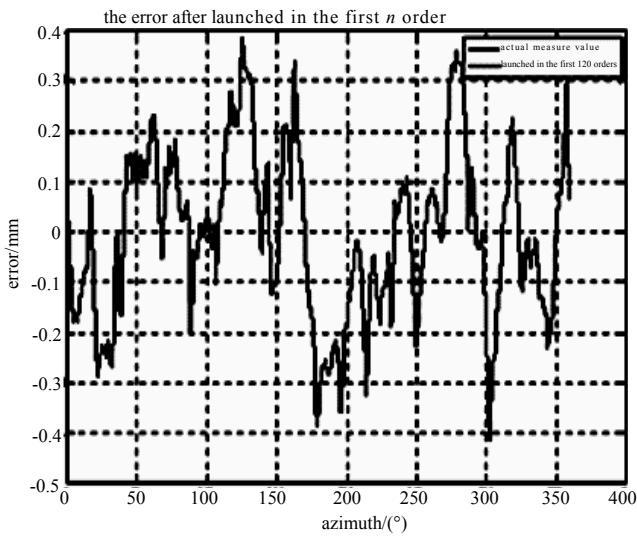


Fig.6 Select top 130 orders modal and merge coefficients
图 6 选取前 130 阶模态归并系数

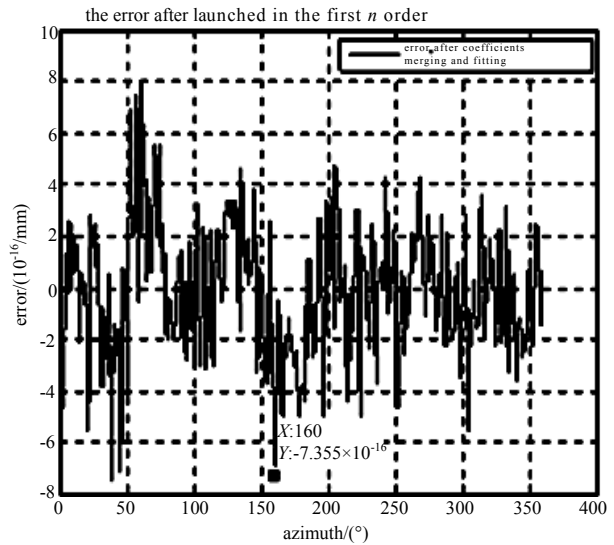


Fig.7 Simulation error
图 7 模拟误差

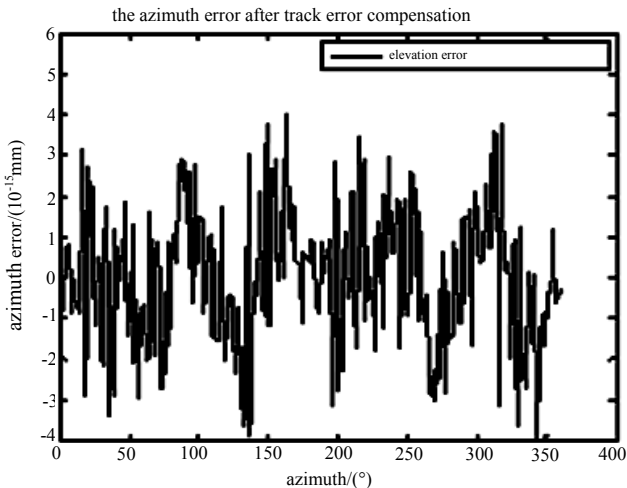


Fig.8 Azimuth pointing error caused by the 130 orders
图 8 130 阶展开造成的方位角指向误差

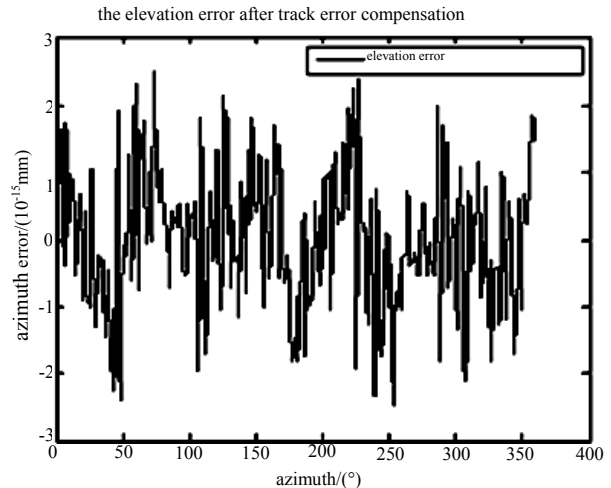


Fig.9 Elevation pointing error caused by the 130 orders
图 9 130 阶展开造成的俯仰角指向误差

3 轨道不平度对天线指向精确度影响的数值仿真

由表 1 可知, 就该轨道测量数据而言, 傅里叶级数归并系数法最大模拟精确度为 8×10^{-16} mm, 由频谱分析可知傅里叶级数展开到 130 阶时有最高模拟精确度, 其中轨道测量样本为 261 个。轨道不平度可在伺服控制中得到补偿, 轨道不平度中只有轨道描述后的残差会对指向精确度造成影响, 进行实验数值仿真, 结果见图 8、9。在指平工况下, 指向模型中不考虑天线轨道不平度时, 轨道误差实际上会造成的天线俯仰角误差约为 $\pm 1.5''$, 考虑轨道误差后, 将轨道的轮廓曲线函数带入误差模型(6)中, 能精准得到轨道每一处的指向误差, 最后通过伺服控制实时调整天线的俯仰角和方位角, 消除这部分指向误差, 使得最终轨道造成的指向误差小于 $(\pm 3 \times 10^{-15})''$, 小于 $0.0228''$, 可忽略不计, 补偿过程如图 10 所示, 详细可参考文献[13]。

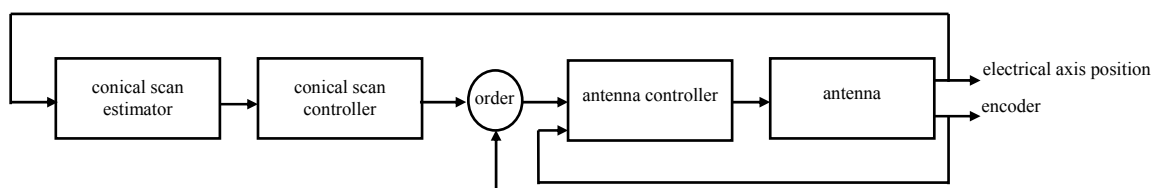


Fig.10 Compensation control of antenna by look-up table method
图 10 天线查表法补偿控制

4 结论

本文探讨并提出了一种考虑轨道不平度的射电望远镜指向模型的修正方法,通过对国外某 50 m 天线轨道进行相关研究,得到以下结论:

- 1) 总结了轨道不平度补偿的常用方法以及测量方法,并且根据 QTT 方位架特点提出了轨道不平度对指向精确度影响机理;
- 2) 分析了原有轴系误差指向模型中忽略的轨道不平度,并对原有的指向模型进行了修正;
- 3) 提出了基于功率谱主模态选取傅里叶级数系数归并法,进行轨道轮廓模拟,经过数值仿真实验,在理论上实现了轨道不平度零误差补偿;

为进一步提高轨道描述的准确性,下一步应提高水平度测量精确度及增加测量点密度,采用合理的方法除去轨道测量数据中的奇点,以更好地反映实际轨道变形情况。此外,滚轮轴承弹跳误差还未引入到指向误差模型中,在轨道设计阶段,轨道不平度与指向误差之间的函数关系还有待研究,这些都是今后研究的重点和探索方向。

参考文献:

- [1] 王娜. 新疆奇台 110 m 射电望远镜[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2014(8):783-794. (WANG Na. Xinjiang Qitai 110 m radio telescope[J]. Scientia Sinica:Physica,Mechanica & Astronomica, 2014(8):783-794.)
- [2] 吴迺. 测量雷达天线座轴系精确度分析[J]. 电子机械工程, 2001(2):41-43. (WU Yi. Analysis on precision of axes of measuring radar's pedestal[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2001(2):41-43.)
- [3] 高冠男,汪敏,施硕彪,等. 云台 40 m 射电望远镜的指向误差校正[J]. 天文研究与技术(国家天文台台刊), 2007,4(2):783-794. (GAO Guannan,WANG Min,SHI Shuobiao,et al. Pointing calibration for the 40 m radio telescope in Yunnan observatory[J]. Astronomical Research & Technology-Publications of National Astronomical Observatories of China, 2007,4(2):783-794.)
- [4] 高冠男. 云台 40 m 射电望远镜天线控制系统运行测试分析及天线指向误差校正[D]. 北京:中国科学院, 2007. (GAO Guannan. Operation test analysis and pointing calibration for the 40 m radio telescope in Yunnan observatory[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2007.)
- [5] 孔德庆,施浒立,张喜镇,等. 射电望远镜指向误差的广义延拓插值修正方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2008(1):157-161. (KONG Deqing,SHI Huli,ZHANG Xizhen,et al. Radio telescope pointing model based on the generalized extended interpolation correction method[J]. Journal of Xidian University(Natural Science), 2008(1):157-161.)
- [6] 顾健星. 佘山 25 米天线导轨问题对指向误差影响的研究[J]. 中国科学院上海天文台年刊, 1994(15):205-211. (GU Jianxing. The study of She Shan 25 m antenna track to the pointing accuracy[J]. Annals Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences,1994(15):205-211.)
- [7] SMITH D R. Achievable alignment accuracy and surface hardness of a large welded azimuth track[C]// Proceedings of SPIE. 2006:62731-01-62731-04.
- [8] 虞梦月. 110 m 口径超大型全可动天线轴系误差对指向精确度的影响[D]. 西安:西安电子科技大学, 2014. (YU Mengyue. The influence of axial system error on the pointing of 110 m diameter full steerable antenna[D]. Xi'an,China:Xidian University, 2014.)
- [9] GAWRONSKI W,BAHER F,QUINTERO O. Azimuth-track-level compensation to reduce blind-pointing errors of the beam-waveguide antennas[J]. The Telecommunications and Mission Operations Progress Report, 1999(139):1-18.
- [10] GAWRONSKI W. Modeling and Control of Antennas and Telescopes[M]. Berlin:Springer, 2008.
- [11] GAWRONSKI W,BAHER F,QUINTERO O. Azimuth-track level compensation to reduce blind-pointing errors of the deep space network antennas[J]. Antennas and Propagation Magazine, IEEE, 2000,42(2):28-38.
- [12] KONG Deqing,WANG Songgen,WANG Jinqing,et al. A new calibration model for pointing a radio telescope that considers nonlinear errors in the azimuth axis[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2014(6):733-740.
- [13] GAWRONSKI W. Control and pointing challenges of large antennas and telescopes[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2007,15(2):276-289.

作者简介:



吴 江(1988-),男,湖北省鄂州市人,硕士,主要研究方向为天线结构设计.email: wujiang.xidian@foxmail.com.

王 博(1990-),男,西安市人,在读硕士研究生,主要研究方向为天线结构设计.