

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2020-01-0041-13

# 国家授时中心 VLBI 网 13 m 射电望远镜指向修正

吴文雅<sup>1,2,3</sup>, 马浪明<sup>1,2</sup>, 姚当<sup>1,2</sup>, 刘佳<sup>1,2</sup>, 吴元伟<sup>1,2</sup>, 杨旭海<sup>1,2,4</sup>

- (1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;  
2. 中国科学院 精密导航定位与定时技术重点实验室, 西安 710600;  
3. 中国科学院大学 电子电气与通信工程学院, 北京 100049;  
4. 中国科学院大学 天文与空间科学学院, 北京 101048)

**摘要:** 中国科学院国家授时中心根据 VLBI2010 技术规范要求研制的 3 台 13 m 射电望远镜, 建成了我国第一套测地型 VLBI (very long baseline interferometry) 网, 并进行实验观测。天线 (射电望远镜接收信号的部分称之为天线) 的指向精度直接影响到 VLBI 系统的观测性能, 因此天线指向修正是 VLBI 网设施中最基础的工作。研究了影响 13 m 射电望远镜指向精度的物理根源, 根据观测要求得出天线指向精度要求, 并建立相对应的修正模型, 根据 13 m 射电望远镜的情况, 最终认定 13 m 射电望远镜采用 18 参数的修正模型; 研究了 13 m 射电望远镜实际测定的天线方向图及十字扫描法技术; 分析、比较各种归算方法, 采用傅里叶函数拟合方法确定其射电源精确位置; 利用射电源高精度位置的优势, 精确地测定 13 m 射电望远镜各方向的指向误差, 最后, 用最小二乘法拟合得到 18 参数修正模型的系数值, 实现了模型修正精度优于天线主瓣十分之一的目标, 并对观测结果进行了验证。最终修正后指向精度为 46.64", 优于天线主瓣十分之一 (53.9") 的要求, 达到 VLBI 系统观测要求。

**关键词:** VLBI 网; 射电望远镜; 天线修正模型; 最小二乘法

## Pointing calibration of 13 m antenna of VLBI network at National Time Service Center

WU Wen-ya<sup>1,2,3</sup>, MA Lang-ming<sup>1,2</sup>, YAO Dang<sup>1,2</sup>, LIU Jia<sup>1,2</sup>,  
WU Yuan-wei<sup>1,2</sup>, YANG Xu-hai<sup>1,2,4</sup>

- (1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;  
2. Key Laboratory of Precise Positioning and Timing Technology, Chinese Academic of Sciences, Xi'an 710600, China;  
3. School of Electronic, Electrical and Communication Engineering,  
University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;  
4. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101048, China)

**Abstract:** The first wide band domestic geodetic VLBI (very long baseline interferometry) networks,

收稿日期: 2019-05-17; 接受日期: 2019-06-18

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目 (11173026); 中国科学院国家授时中心青年创新人才资助项目; 载人航天预研资助项目 (0602)

作者简介: 吴文雅, 男, 硕士, 主要从事 VLBI 及射电望远镜指向方面的研究。

developed by the National Time Service Center (NTSC) of the Chinese Academy of Sciences, that is composed of three 13-meter radio telescopes and is now on commissioning phase. The pointing accuracy of the antenna is directly affecting the observation performance of the VLBI system, so, the antenna pointing correction is of one of the most basic works of the system. In this thesis, the error sources of the antenna pointing are studied. In order to meet the requirements of astronomical observations, a pointing correction model is established. The antenna pattern is measured by cross-scan method. And a 18-parameter correction model is established. By analyzing and comparing various reduce methods, we adopt the Fourier function fitting method to determine the precise position of radio sources, then, measured antenna errors for all directions. Finally, the coefficient values of the 18-parameter correction model are obtained by least squares fitting method. The final corrected accuracy is 46.64", which is better than the one-tenth (53.9") of the main lobe of the antenna, thus meets the requirements of astronomical observations.

**Key words:** very long baseline interferometry (VLBI) network; radio telescope; pointing model; least square method

## 0 引言

甚长基线干涉测量 (very long baseline interferometry, VLBI) 是 20 世纪 60 年代后期发展起来的一种射电干涉技术, 具有极高的角分辨率和测量精度, 在天体物理、天体测量、大地测量和天文地球动力学等研究领域得到广泛的应用<sup>[1]</sup>。

中国科学院国家授时中心 (NTSC) 的 3 台 13 m 射电望远镜分别位于喀什、吉林、三亚, 3 台射电望远镜组成了我国第一套测地型 VLBI 观测网。国家授时中心的 VLBI 观测网天线参照国际 VLBI2010 规范, 采用宽带技术, 具备天线形变小、天线转动速度快和快速换源等特点, 特别适用于航天器测定轨、地球定向参数 (EOP) (特别是世界时 UT1) 连续测量、可有效支持时空基准的建立及相关地上物理学科的研究<sup>[2]</sup>。

天线组成的射电望远镜主体, 是 VLBI 技术的基础, 而天线的高精度的指向是对射电望远镜的基本要求, 其精度不仅影响到望远镜观测目标源的能力, 还会影响跟踪系统的观测效率。

NTSC 13 m 射电望远镜采用稳定的地平式结构, 自动化程序自动把目标源的赤道坐标转换为地平坐标, 并直接控制天线软件 ACU (antenna control unit, 天线控制单元) 进行自动化观测。13 m 射电望远镜工作频率为 1.2~9 GHz, 频率越高天线主瓣宽度越窄, 因此对指向的要求也越高, 通常要求指向误差在十分之一波束宽度之内。天线主瓣波束宽度指天线功率方向图中半功率点的宽度 HPBW (half power beam width)<sup>[3]</sup>为

$$W_{\text{HPBW}} = \frac{1.02\lambda}{D} = \frac{1.02 \times \frac{c}{f}}{D} \approx \frac{58.4^\circ \times \frac{3 \times 10^8}{9 \times 10^9}}{13} \approx 539''。 \quad (1)$$

式 (1) 中,  $\lambda$  为工作波长, 最高工作频率为 9 GHz,  $D$  为天线口径,  $c$  为光速,  $f$  为工作频率。13 m 射电望远镜在频率为 9 GHz 时天线主瓣波束宽度大约为 539", 根据要求指向误差应控制在 53.9" 以内。

## 1 射电望远镜指向误差修正原理

射电源有相当高的位置精度, 用以定义国际天球参考架, 因此射电源可作为天线指向修正的实验目标, 其理论位置与实际测量位置的偏差即为天线指向误差。天线建造时通过校准具备一定指向精度, 但

有些误差仍然无法通过校准完全消除，这类指向误差一般由多因素造成，可将这些误差分为系统误差和偶然误差两大类<sup>[4]</sup>。偶然误差是指天线指向误差无法用模型精确模拟的误差，如由温差引起天线热胀冷缩造成的偏差<sup>[5]</sup>，多变环境造成的偏差<sup>[6-7]</sup>，传动齿轮、齿隙的偏差等，这些无法模型化的误差不得不认作为“随机”特性的误差，选择合适的运行方式与合适的运行环境来尽量减小其“随机”误差的影响。系统误差可根据物理原因用模型精确模拟的误差，如电轴与机械轴不重合引起的误差、天线方位轴与天顶不重合引起的误差、编码器安装误差和天线重力形变误差等，这些误差对天线指向的影响具有固定的变化规律，建立误差修正模型并通过测量确定其影响，原则上可以消除这部分原因引起的误差。图 1 所示为天线指向误差修正原理图，根据影响天线指向的物理根源，分析天线指向每一个误差源的影响规律，将所有误差源的校正函数综合得到天线指向误差修正模型表达式，根据实际天线指向测定的结果，最后通过最小二乘法拟合求出模型的修正项参数值，得到最终的误差修正实际模型，并对天线指向修正进行验证，给出天线指向修正的精度。因此，本文重点讨论对系统误差的精确标定方法，并采用傅里叶级数修正项对偶然误差进行修正。

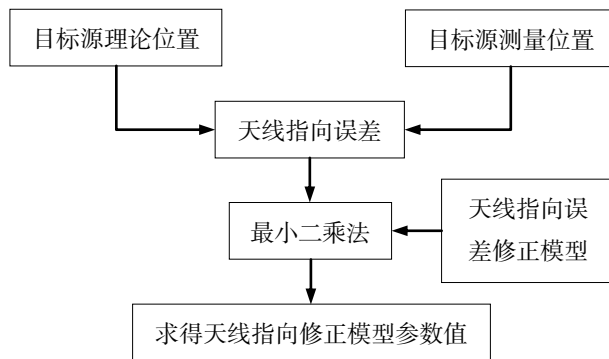


图 1 天线指向误差修正原理图

## 1.1 指向误差源的分析

NTSC 13 m 射电望远镜的指向误差源主要包括：天线电轴和机械轴不重合，俯仰轴与方位轴不垂直，天线的天顶与真天顶不重合、编码器安装误差、天线重力变形误差等。分析这些误差对应的天线指向影响，给出影响天线指向的理论修正函数，最终得到完整的修正模型。

NTSC 13 m 射电望远镜为地平式系统，因此用地平坐标系研究诸因素影响是最佳选择。在以下分析中方位角表示为  $A$ ，方位误差为  $\Delta A$ ，俯仰角为  $h$ ，俯仰误差为  $\Delta h$ 。图 2 为地平坐标系，地平坐标用

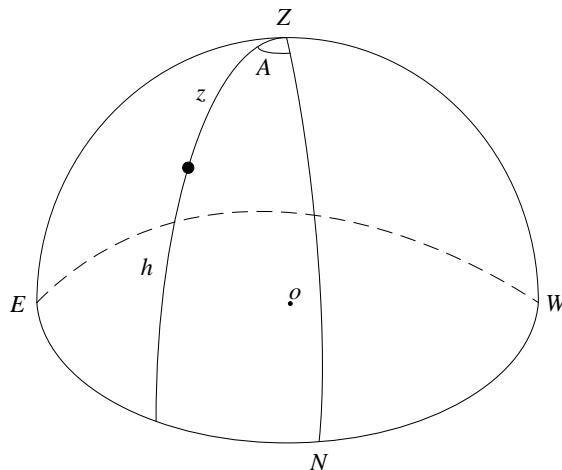


图 2 地平坐标系

$(A, z)$  或  $(A, h)$  表示, 其中天顶距  $z$  为从天顶到测量点的大圆弧的角距,  $h$  为测量点到地平圈的距离, 由于天顶是地平圈的极点, 天顶到地平圈的距离为  $\pi/2$ , 因此有  $z+h=\pi/2$ ,  $A$  从北点起, 顺时针为正。

### 1.1.1 天线电轴和机械轴不重合的影响

电轴方向即天线电相位中心的主轴方向, 机械轴方向是天线实际机械指向的方向, 一般情况下这两轴是不重合的。因此天线机械轴指向加二轴不重合的影响才能正确指向目标源。图 3 为电轴与机械轴不重合几何原理图, 天线电轴和机械两个轴之间距离为  $\sigma_1$ ,  $\zeta$  点为电轴,  $\zeta'$  为机械轴对应点, 与机械指向存在一个微小交角,  $\zeta\zeta'$  弧与经圈夹角为  $P$ , 在三角形  $\Delta Z\zeta\zeta'$  中利用正弦定律:

$$\frac{\sin \Delta A}{\sin \sigma_1} = \frac{\sin(\pi - P)}{\cos h}, \quad (2)$$

利用球面三角形第一五元素定律:

$$\sin \sigma_1 \cos P = \sin h \cos(h + \Delta h) - \cos h \sin(h + \Delta h) \cos \Delta A, \quad (3)$$

电轴与俯仰轴不垂直最终改正为:

$$\begin{cases} \Delta A = \sigma_1 \frac{\sin(\pi - P)}{\cos h} \\ \Delta h = -\sigma_1 \cos P \end{cases} \quad (4)$$

式 (2) 至 (4) 中,  $\sigma_1$  与  $P$  为常数,  $\Delta A$  修正项实际上为  $-\sec h$ ,  $\Delta h$  则变成零点改正。

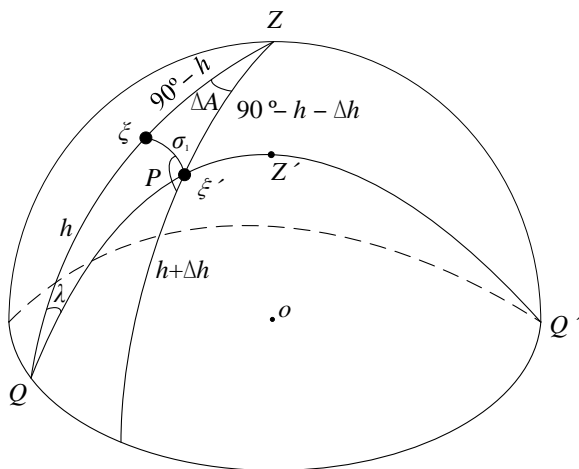


图 3 电轴与机械轴不重合的影响

### 1.1.2 俯仰轴与方位轴不垂直的影响

在地固系中方位轴是一个固定方向的轴, 不随仪器转动而转动, 理想俯仰轴应垂直于方位轴<sup>[8]</sup>。图 4 为俯仰轴与方位轴不垂直几何原理图, 理想情况下水平轴转动沿大圆为  $QZQ'$ ; 当俯仰轴与方位轴不垂直, 存在夹角为  $\sigma_2$  的情况下, 天线水平轴沿天球  $QZQ'$  轨迹运动。当天线指向  $\zeta$ , 由于水平轴不垂直, 实际指向  $\zeta'$ ; 在三角形  $\Delta Q\zeta\zeta'$  中, 有

$$\frac{\sin \lambda}{\sin \sigma_2} = \frac{\sin P}{\sin h}, \quad (5)$$

在三角形  $\Delta Z\zeta\zeta'$  中, 有

$$\frac{\sin \Delta A}{\sin \sigma_2} = \frac{\sin(\pi - P - \chi)}{\cos h}, \quad (6)$$

$$\cos \sigma_2 = \sin h \sin(h + \Delta h) + \cos h \cos(h + \Delta h) \cos \Delta A, \quad (7)$$

式 (6) 中,  $\chi$  影响为二阶小量, 得出

$$\begin{cases} \Delta A = \lambda \tan h \\ \Delta h = \frac{1 - \cos \sigma_2}{\sin h} \end{cases}, \quad (8)$$

由于  $\sigma_2$  是小量, 所以  $\Delta h$  为零。

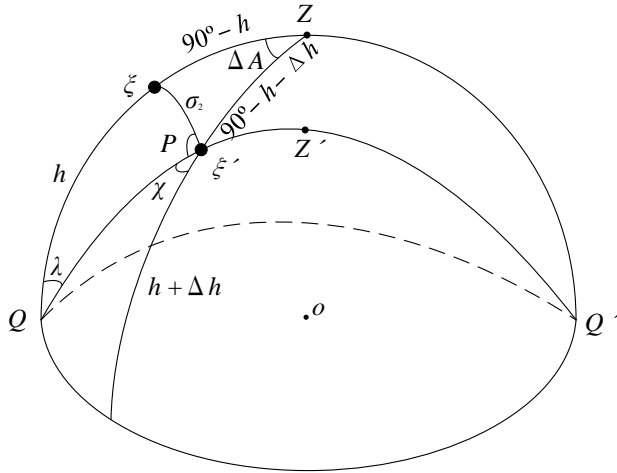


图 4 俯仰轴与方位轴不正交

### 1.1.3 方位轴偏离天顶

方位轴偏离天顶即天线方位轴不垂直于水平面<sup>[9]</sup>。图 5 为方位轴偏离天顶几何原理图,  $Z$  点为天顶,  $Z$  轴为发生倾斜后的方位轴 (天线机械轴天顶位置),  $a$  轴垂直于  $ZZ'$ ,  $N$  为地平圈上北点,  $a$  与  $N$  距离为  $\chi$ ,  $N$  为天线地平圈上 (方位轴偏离天顶情况) 与  $N$  对应北点,  $\sigma_3$  为倾斜角 ( $Z$  与  $Z'$  角距), 在窄三角形中用余弦定律, 得

$$\sin(h + \Delta h) = \sin h \cos \sigma_3 + \cos h \sin \sigma_3 \sin(A + \Delta A - \chi), \quad (9)$$

用正弦定律, 得

$$\frac{\cos(\chi - A - \Delta A)}{\cos h} = \frac{\cos(A - \chi)}{\cos(h + \Delta h)}, \quad (10)$$

即

$$\begin{cases} \Delta A = -\sigma_3 \cos(A - \chi) \tan h \\ \Delta h = \sigma_3 \sin(A - \chi) \end{cases}. \quad (11)$$

方位轴的倾斜可通过正交分解为东西向倾斜和南北向倾斜,  $\chi$  为 0 时是东西向倾斜, 当  $\chi$  为  $\pi/2$  时为南北向倾斜。

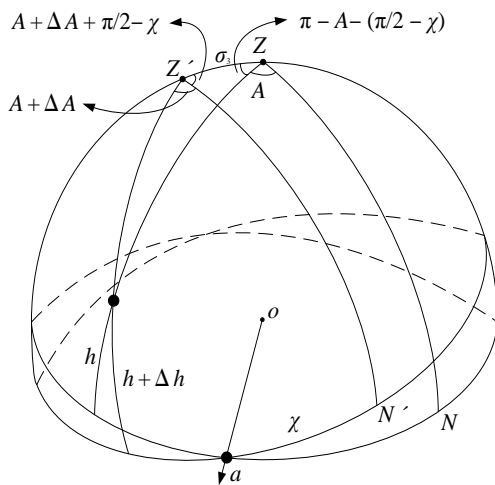


图 5 方位轴倾斜

### 1.1.4 编码器误差

编码器偏置误差造成方位和俯仰的零点偏差,采用常数项改正。编码器刻度误差是编码器单位角度与实际单位角度存在的误差<sup>[10]</sup>,假设编码器单位角度是实际单位角度的 $\delta$ 倍,有

$$\begin{cases} \Delta A = \delta A \\ \Delta h = \delta h \end{cases} \quad (12)$$

在水平轴和垂直轴均有编码盘,因此编码盘安装误差分为水平轴编码盘安装误差和垂直轴编码盘安装误差。编码盘安装误差物理原因是编码盘安装偏心和倾斜引起的。图 6 方位轴码盘偏心几何原理图,设码盘中心离转动中心距离为 $e$ ,码盘半径为 $r$ , $A_p$ 是码盘转动中心和天线转动中心连线与北方向的夹角,天线方位角为 $A$ ,方位轴码盘偏心对方位角的影响为 $\Delta A$ ,显然有

$$\Delta A = \frac{e}{r} \sin(A - A_p) = \frac{e \cos A_p}{r} \sin A - \frac{e \sin A_p}{r} \cos A \quad (13)$$

所以方位偏心误差改正项为 $\sin A$ 和 $\cos A$ ,同理俯仰偏心误差改正项为 $\sin h$ 和 $\cos h$ 。码盘倾斜的影响为倾斜角在水平面上投影,与倾斜角余弦成正比,是二阶小量,可略去。

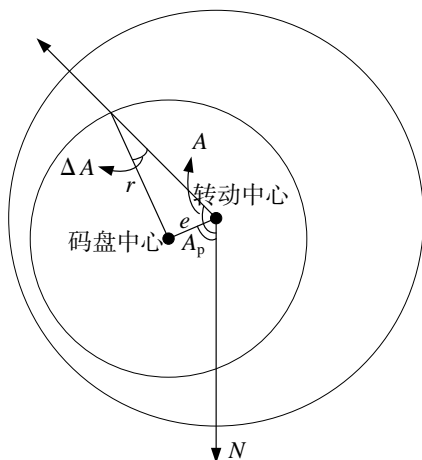


图 6 方位轴码盘偏心误差影响

### 1.1.5 天线重力变形误差

由于重力作用,天线会产生形变,在仰角为 $0$ 时,影响最大,由于对称性及重力对天线形变影响,

仅对仰角引起误差，改正值可表示为

$$\Delta h = \delta \cos h。 \quad (14)$$

## 1.2 建立指向模型

通过以上初步分析，我们可以得到主要的几个误差修正项。修正项通过分析过程可以得到，实际误差并非完全符合总结的规律，而且还有一些随机变化的影响因素，这些因素引起的误差通过以上修正项无法完全消除，所以在以上的基础上还需进一步寻找经验项建立新模型。

### 1.2.1 几种常见的射电望远镜指向误差修正模型

① 射电望远镜 8 参数修正模型为：

$$\begin{cases} \Delta A = P_1 + P_4 \tan h + P_5 \sec h + P_6 \cos A \tan h + P_7 \sin A \tan h \\ \Delta h = P_2 + P_3 \cosh - P_6 \sin A + P_7 \cos A + P_8 \cot h \end{cases}。 \quad (15)$$

式 (15) 中， $A$  为方位值， $h$  为俯仰值， $\Delta A$  为方位差， $\Delta h$  为俯仰差， $P_1 \sim P_8$  为模型参数，各修正项对应含义如表 1 所示。

表 1 射电望远镜 8 参数指向误差修正模型参数含义对照表

参数	修正项	含义	参数	修正项	含义
$P_1$	1	方位零点偏差	$P_5$	$\sec h$	电轴与俯仰轴不正交
$P_2$	1	俯仰零点偏差	$P_6$	$\cos A \tan h$	方位轴东西向倾斜
$P_3$	$\cosh$	天线重力变形	$P_7$	$\sin A \tan h$	方位轴南北向倾斜
$P_4$	$\tan h$	俯仰轴与方位轴不正交	$P_8$	$\cot h$	大气折射残余误差

上海天文台模型与云南天文台模型，包括新西兰模型均采用 8 参数修正模型，只是书写方式略有差异，但其代表的物理意义均相同。

② 佳木斯 66 m 射电望远镜 12 参数修正模型为：

$$\begin{cases} \Delta A = P_1 - P_3 \tan h \cos A - P_4 \tan h \sin A + P_5 \tan h - P_6 \cosh + P_7 \sin h - P_8 \sec h \\ \Delta h = P_2 + P_3 \sin A - P_4 \cos A + P_9 \cosh + P_{10} \sin 2h + P_{11} \cos 2h + P_{12} \cot h \end{cases}。 \quad (16)$$

12 参数修正模型是在 8 参数修正模型基础上提出的增强型模型<sup>[11]</sup>，比 8 参数修正模型多了  $\sin h$ ， $\cosh$ ， $\sin 2h$  和  $\cos 2h$  这 4 项。这 4 项是由修正项重力变形和俯仰轴与方位轴不正交这两项系数通过傅里叶级数展开得到，可解决这两个因素的高阶误差引起的指向偏差，详细展开步骤可见参考文献<sup>[11]</sup>。

### 1.2.2 NTSC 13 m 射电望远镜 18 参数指向误差修正模型

8 参数误差修正模型基本消除了大部分物理原因引起的误差，12 参数误差修正模型考虑天线不对称影响，但是仍然无法消除模型近似带来的误差。本文提出加入傅里叶级数修正项的修正模型，得到 18 参数新模型：

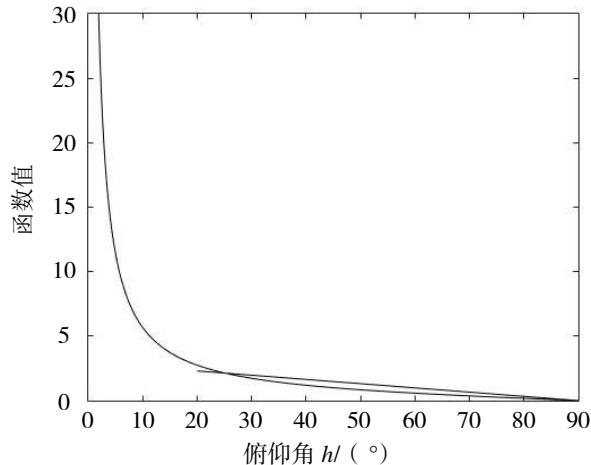
$$\begin{cases} \Delta A = P_1 + P_2 \tan h - P_3 \sec h + P_4 \sin A \tan h - P_5 \cos A \tan h + P_{10} A + \\ \quad P_{11} \cos A + P_{12} \sin A + P_{15} \cos 2A + P_{16} \sin 2A \\ \Delta h = P_4 \cos A + P_5 \sin A + P_6 + P_7 \cosh + P_8 h + P_9 \sin h + P_{13} \cos 2A + \\ \quad P_{14} \sin 2A + P_{17} \cos 8h + P_{18} \sin 8h \end{cases}。 \quad (17)$$

式 (17) 中各项系数对应含义示于表 2。

表 2 NTSC 13 m 射电望远镜指向误差修正模型参数含义对照表

参数	修正项	含义	参数	修正项	含义
$P_1$	1	方位零点偏差	$P_{10}$	$A$	方位轴角编码器刻度差
$P_2$	$\tanh$	俯仰轴与方位轴不垂直	$P_{11}$	$\cos A$	傅里叶级数补偿余弦一次项
$P_3$	$-\operatorname{sech}$	电轴与俯仰轴不垂直	$P_{12}$	$\sin A$	傅里叶级数补偿正弦一次项
$P_4$	$\sin A \tanh$	方位轴南北向倾斜	$P_{13}$	$\cos 2A$	傅里叶级数补偿余弦二次项
$P_5$	$-\cos A \tanh$	方位轴东西向倾斜	$P_{14}$	$\sin 2A$	傅里叶级数补偿正弦二次项
$P_6$	1	俯仰零点偏差	$P_{15}$	$\cos 2A$	傅里叶级数补偿余弦二次项
$P_7$	$\cosh$	天线重力变形	$P_{16}$	$\sin 2A$	傅里叶级数补偿正弦二次项
$P_8$	$h$	俯仰轴角编码器刻度差	$P_{17}$	$\cos 8h$	傅里叶级数补偿余弦八次项
$P_9$	$\sinh$	傅里叶级数补偿正弦一次项	$P_{18}$	$\sin 8h$	傅里叶级数补偿正弦八次项

NTSC 13 m 射电望远镜的 18 参数修正模型相比于 8 参数与 12 参数修正模型主要增加了  $A, h, \sin h, \cos A, \sin A, \cos 2A, \sin 2A, \cos 8h$  和  $\sin 8h$  这 11 项, 由于 13 m 射电望远镜相比佳木斯 66 m 射电望远镜更轻, 天线形变小, 因此未加入 12 参数中添加的  $\sinh, \cosh, \sin 2h$  和  $\cos 2h$  这 4 项。图 7 为  $\cosh$  波形图, 我们发现当俯仰角度较小时,  $\cot h$  这一项函数曲线补偿量大大增加。而实际情况中并未出现在俯仰角较低时指向误差过大的情况, 因此修正项  $\cot h$  系数应该不大, 故不列入模型内。在俯仰  $20^\circ \sim 90^\circ$  之间, 我们发现  $\cot h$  曲线近似于一次函数曲线, 而刚好 18 参数修正模型中增加了修正项  $h$ , 所以此处修正项  $\cot h$  所补偿的误差可由修正项  $h$  完成。

图 7 函数  $\cot h$  曲线图

增加的傅里叶级数项包含一次、二次和八次项, 在方位误差修正模型中, 由于俯仰位置对方位影响微小, 所以仅增加了以方位角为变量的修正项:  $\cos A, \sin A, \cos 2A$  和  $\sin 2A$ , 以此来修正未知因素对方位的影响。在俯仰误差修正模型中, 由于已分析的修正项中包含了傅里叶级数一次项  $\cos A, \sin A$  和  $\cos h$ , 所以增加了以方位角为变量的修正项  $\cos 2A, \sin 2A$ , 也增加了以俯仰角为变量的修正项  $\sin h, \cos 8h$  和  $\sin 8h$ , 此处之所以采用了八次项而不是二次项或四次项, 是因为俯仰角取值范围在  $0^\circ \sim 90^\circ$  之间, 二次项周期为  $180^\circ$ , 四次项周期为  $90^\circ$ , 八次项周期为  $45^\circ$ ; 由傅里叶级数的性质可知周期过大不适合拟合未知函数, 所以八次项比二次项和四次项更合适。

随着模型参数增多, 模型对最终拟合所用的数据依赖性更强, 受观测点在天区分布情况的影响更大, 因此观测时应选择能较好分布全天区的目标, 并且不应再增加过多修正项, 以防模型过度拟合, 影响精度。18 参数模型可更好地消除未知因素和模型近似带来的误差, 适用于天线转速快、形变小的 13 m 射



电望远镜；因 12 参数模型可更好消除重力变形和方位轴与俯仰轴不正交等影响的特点，适用于重量大、地基变形的射电望远镜；对于更小型射电望远镜可采用方便拟合的 8 参数模型。

## 2 射电望远镜指向误差确定

国家授时中心的 3 台 13 m 射电望远镜结构功能基本相同，指向修正模型相似，本文仅对三亚台站 13 m 射电望远镜进行研究。

### 2.1 天线功率方向图与十字扫描法

射电望远镜在不同方向上接收信号的能力通常用天线功率方向图来描述<sup>[12]</sup>，如图 8 和 9 所示为理论天线功率方向图和实测天线功率方位图。由图可知当天线指向功率方向图主瓣方向时，接收信号最强，天线偏离目标源时信号会有很大强度的降低。根据此特性，可先引导天线对准目标源，对天线方位角度和俯仰角度进行正向与负向偏置扫描，以此得到偏置方向的功率值，从而画出实测天线功率方向图。此扫描方法先后进行方位和俯仰的扫描，天线在天空中扫描到的位置形如一个“十”字，称之为十字扫描法。

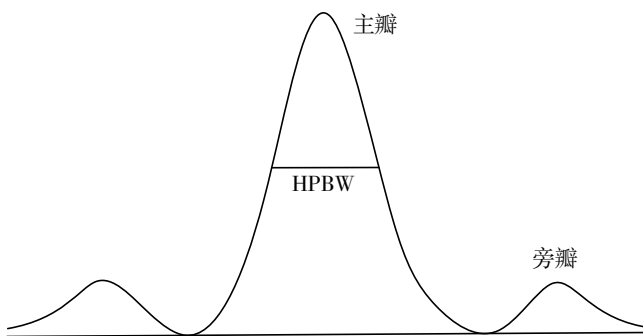


图 8 理论天线功率方向图

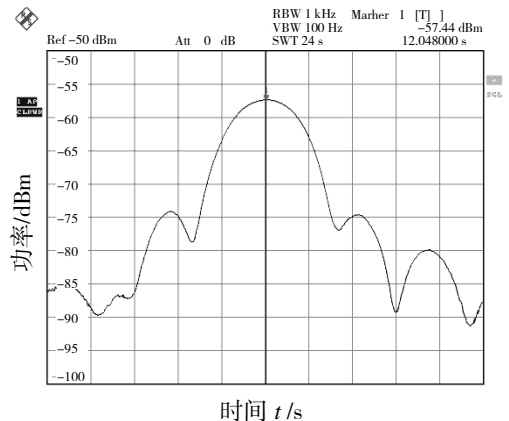


图 9 实测天线功率方位图

### 2.2 目标源测量位置

十字扫描的目的是为了得出功率方向图中主瓣波峰位置，此位置即为该时刻目标源实际测量位置，显然此位置为功率最大点，由于信号存在干扰，可能最高点位置并非目标源实测位置，如图 10 所示为有干扰的十字扫描功率点。因此不能简单地通过找最大点来确定实际指向位置。

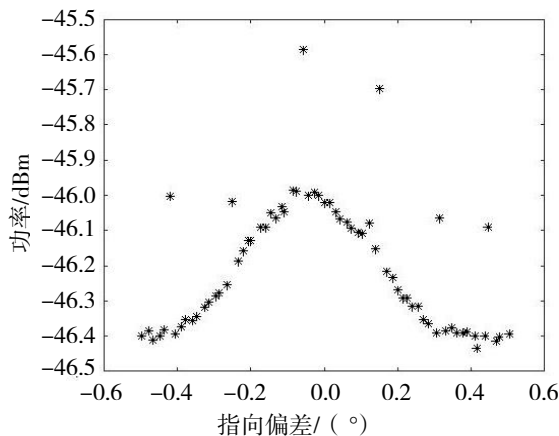


图 10 有干扰的十字扫描功率点

通过观察天线方向图和十字扫描后采集的数据点图,如图 8、11、12、13 所示,发现功率曲线波形同高斯函数波形、傅里叶函数波形等很相似。将功率点进行曲线拟合,通过拟合的曲线得到最大点,此最大点最接近于实测位置。

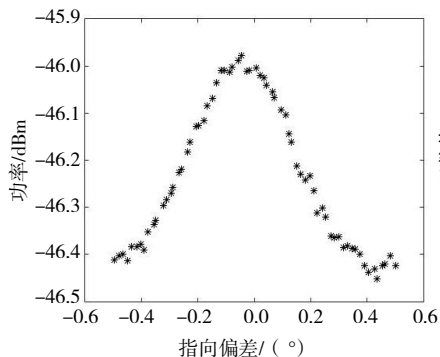


图 11 无干扰的十字扫描功率点

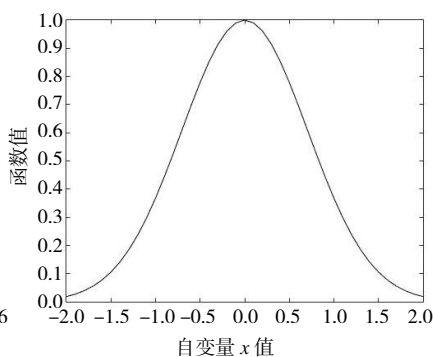


图 12 高斯函数波形

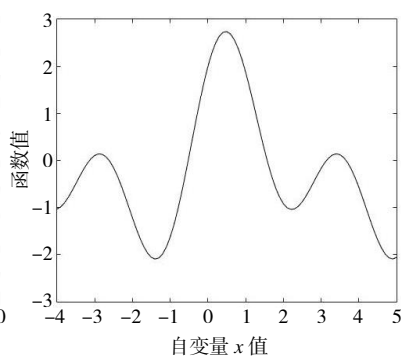


图 13 傅里叶函数波形

首先尝试高斯函数拟合,高斯函数公式如下

$$f(x) = a_1 \times e^{-0.5 \times ((x-a_2)/a_3)^2} \quad (18)$$

在用高斯函数实现拟合的过程中发现结果并不理想,于是采用参考文献[13]中方法,在高斯函数后加入三次项进行拟合,函数式见式(19),拟合后功率图如图 14 所示,功率图横坐标为方位差或俯仰差,纵坐标为功率大小。

$$f(x) = a_1 + a_2 x + a_3 x^2 + a_4 x^3 + a_5 \times e^{-0.5 \times ((x-a_6)/a_7)^2} \quad (19)$$

由图 14 可看出加入三次项后的高斯拟合效果仍然很差,所以尝试傅里叶函数拟合,式(20)为拟合公式,拟合后功率图如图 15 所示,比较图 14 和图 15 可看出傅里叶拟合效果更好,因此本文将采用傅里叶拟合确定目标源实际测量位置。

$$f(x) = a_1 + a_2 \cos(a_6 x) + a_3 \sin(a_6 x) + a_4 \cos(2a_6 x) + a_5 \sin(2a_6 x) \quad (20)$$

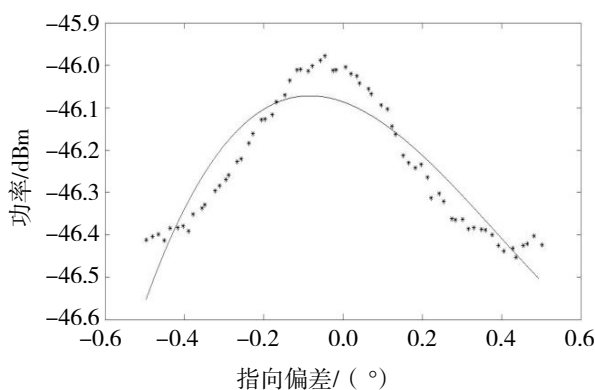


图 14 加入三次项后的高斯拟合功率图

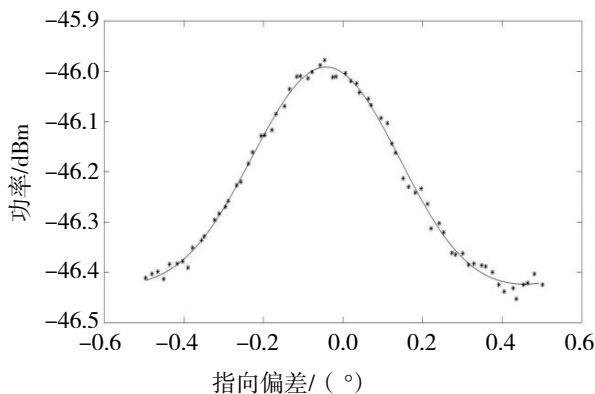


图 15 傅里叶拟合功率图

### 3 指向模型拟合及实测结果

根据强标准射电源稳定易跟踪的特性,实验选择强标准射电源作为实验目标源<sup>[14]</sup>。考虑到所选射电源位置周边不能有强的射电背景影响定位,另外所选源的方位、俯仰能较好的全天区覆盖,所以最终本

实验选择 3C144, 3C274, 3C405, 3C461 和 3C279 等共 13 个强射电源作为目标源进行观测。天区覆盖如图 16 所示。

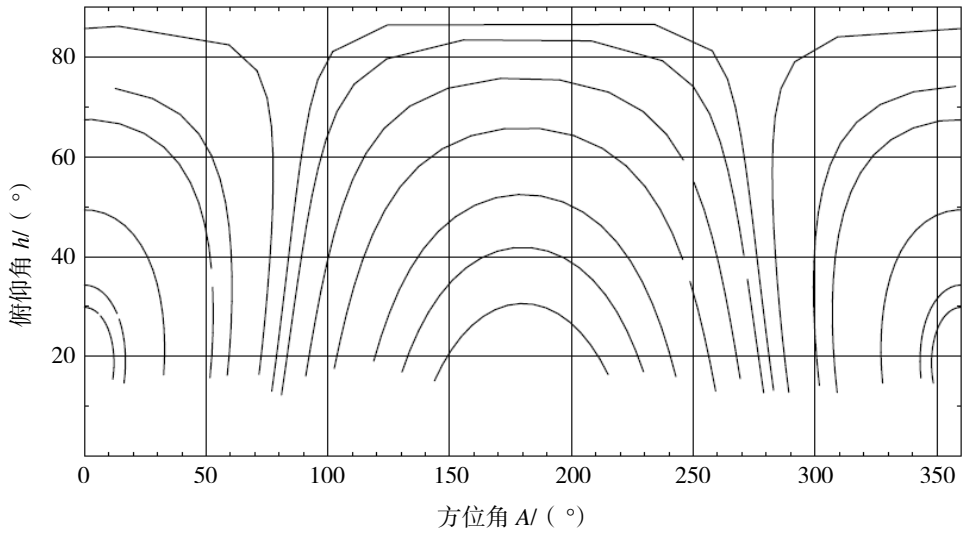


图 16 目标射电源轨迹分布图

本文采用 NRP-Z21 功率计采集信号功率，该功率计测量频率范围 10 MHz~18 GHz，功率测量范围 -67 dBm~+23 dBm，完全满足实验要求。NTSC 13 m 射电望远镜日常观测时，均采用由天线接收的射频信号，通过变频器变频后的中频信号，因此将功率计接入中频输出端采集信号功率更为合理。由于观测频段越高，对指向要求就越高，因此，十字扫描时最高射频观测频率设置为 9 GHz，带宽 512 MHz，功率计采用连续平均模式，积分时间 40 ms，一次方位（或俯仰）扫描时间 60 s，扫描宽度为 1 080"（约 2 倍天线主瓣波束宽度）。功率计通过 USB 口接入计算机，ACU 每秒钟读取一次功率值，并记录该时刻的目标源方位  $A_u$ 、目标源俯仰  $E_u$ 、天线方位  $A_r$ 、天线俯仰  $E_r$ 、方位差值  $A_d$ 、俯仰差值  $E_d$  和功率值  $R_v$ 。

指向十字扫描波形特征明显，如图 11 所示，根据扫描波形易判断信号是否存在异常或干扰，出现异常或严重干扰时因更换目标源或剔除该段数据，出现如图 10 所示轻微干扰时，可通过剔除异常数据点的方法消除干扰。

### 3.1 指向模型最小二乘拟合

根据实测位置的源方位  $A$ 、源俯仰  $h$ 、方位差  $\Delta A$  和俯仰差  $\Delta h$ ，采用最小二乘法拟合天线指向误差修正模型，通过最小化误差的平方和来计算最佳参数。为区分误差计算值与误差测量值，设测得的方位差为  $\Delta A'$ ，俯仰差为  $\Delta h'$ ，由式 (17) 计算得到的方位差为  $\Delta A$ ，俯仰差为  $\Delta h$ ，方位差误差为  $\delta_{\Delta A}$ ， $\delta_{\Delta A} = \Delta A - \Delta A'$ ，俯仰差误差为  $\delta_{\Delta h}$ ， $\delta_{\Delta h} = \Delta h - \Delta h'$ 。由于方位空间角为  $A \cos h$ ，设总偏离误差为  $\delta_{\Delta}$ ，即

$$\delta_{\Delta} = \sqrt{(\delta_{\Delta A} \cos h)^2 + (\delta_{\Delta h})^2} \quad (21)$$

假设有  $L$  组数据，设误差加权平方和为  $\varphi$ ，即

$$\varphi = \sum_{i=1}^L [(\delta_{\Delta A_i} \cos h_i)^2 + (\delta_{\Delta h_i})^2] \quad (22)$$

若使  $\varphi$  最小，用  $\varphi$  对  $P_1 \sim P_{18}$  求偏导，令这 18 个偏导数为零，得到 18 个方程组。将 18 个方程组整理后可写成矩阵形式  $\mathbf{AP} = \mathbf{B}$ 。在 MATLAB 中使用矩阵除法可求得解<sup>[15]</sup>，即  $\mathbf{P} = \mathbf{A} \setminus \mathbf{B}$ ，求得三亚站 13 m 射电望远镜结果如表 3 所示。

表 3 NTSC 三亚站 13 m 射电望远镜指向误差修正模型参数值

参数	数值	参数	数值	参数	数值	参数	数值
$P_1$	-0.066 453	$P_6$	-0.338 233	$P_{11}$	0.002 26	$P_{16}$	-0.001 361
$P_2$	0.005 593	$P_7$	0.245 826	$P_{12}$	-0.008 238	$P_{17}$	-0.000 248
$P_3$	-0.033 099	$P_8$	0.005 464	$P_{13}$	-0.001 919	$P_{18}$	-0.002 319
$P_4$	0.004 679	$P_9$	-0.126 822	$P_{14}$	0.002 501	/	/
$P_5$	0.007 004	$P_{10}$	-0.000 086	$P_{15}$	-0.002 695	/	/

### 3.2 指向误差修正精度

天线指向误差可由空间方位角误差和俯仰角误差计算得到, 计算空间方位角指向误差和俯仰角指向误差的均方差  $\delta_A$  和  $\delta_h$  如式 (23) 所示, 其中  $n$  表示数据个数,  $\Delta A_i$  表示观测到的方位指向误差,  $h_i$  表示天线俯仰角度,  $\Delta h_i$  表示观测到的俯仰指向误差。

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta A_i \times \cos h_i)^2}{n}} \\ \delta_h = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta h_i)^2}{n}} \end{array} \right. \quad (23)$$

综合指向误差由  $\delta$  表示

$$\delta = \sqrt{\delta_A^2 + \delta_h^2} \quad (24)$$

NTSC 13 m 射电望远镜指向误差要求小于 53.9"。将拟合指向模型时所用数据代入式 (23), 可求得  $\delta_A = 32.25$ ,  $\delta_h = 33.69$ , 使用式 (24) 可求得  $\delta = 46.64$ , 方位误差、俯仰误差和总误差均达到误差要求。13 m 射电望远镜在建立之初采用上海台 8 参数模型, 模型精度在方位上达到 56.21", 俯仰上达到 59.43", 总误差 81.8"; 之后尝试佳木斯 66 m 射电望远镜 12 参数模型, 模型精度在方位上达到 45.73", 俯仰上达到 47.38", 总误差 65.85"。以上两模型得到的精度不满足观测要求, 18 参数模型精度相比 8 参数模型和 12 参数模型有明显的提高。选取 10 个方向上的射电源来验证模型指向误差, 如表 4, 计算出这组数据方位指向误差为 20.1", 俯仰指向误差为 21.2", 总误差为 29.2"。

表 4 NTSC 13 m 射电望远镜指向误差验证数据

序号	目标源名	方位角/(°)	俯仰角/(°)	方位偏差/(")	俯仰偏差/(")
1	3C454.3	257.29	40.14	-21.6	-3.6
2	3C120	250.33	30.13	-14.4	-7.2
3	3C274	131.39	53.93	25.2	-18
4	3C273	144.43	46.87	21.6	-21.6
5	3C345	59.81	56.57	36	-36
6	3C84	303.86	25.78	-10.8	-14.4
7	2 134+00	114.93	28.24	14.4	7.2

续表 4

序号	目标源名	方位角/ (°)	俯仰角/ (°)	方位偏差/ (")	俯仰偏差/ (")
8	3C48	239.73	78.85	-3.6	-10.8
9	1 803+784	2.73	50.84	-25.2	-21.6
10	1 611+343	73.43	37.54	28.8	-32.4
结果统计				$\delta_A = 20.1$	$\delta_h = 21.2$
$\delta = 29.2$					

## 4 结语

本文从射电望远镜指向误差源入手, 对不同误差源进行分项修正, 并加入傅里叶级数项来消除部分未知误差, 相比其他误差修正模型更为精确。本次实验一共进行 610 次实际观测, 获得 NTSC 13 m 射电望远镜方位指向误差 32.25", 俯仰指向误差 33.69", 总指向误差 46.64", 满足预定的 53.9" 指向精度要求。需要注意的是, 由于射电望远镜的指向误差会跟随时间的推移而变化, 需要在半年时间左右重新校准一次。

### 参考文献:

- [1] 钱志瀚, 李金岭. 甚长基线干涉测量技术在深空探测中的应用[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2012.
- [2] 姚当, 弓剑军, 马浪明, 等. 基于 VGOS 系统的 UT1 初步观测与计算[J]. 时间频率学报, 2018, 41(3): 234-241.
- [3] ROHLFS K, WILSON T L. 射电天文工具[M]. 北京: 北京师范大学, 2008.
- [4] 赵彦. 大射电望远镜指向误差建模分析与设计研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008.
- [5] UKITA N. Thermal effects on the pointing of the Nobeyama 45-m telescope[J]. Publication of the Astronomical Society of Japan, 1998, 4(1): 1-5.
- [6] SMITH D R, TIMOTHY P A, AMY L J, et al. Measurements of dynamic pointing variations of a large radio telescope[J]. SPIE, 2000, 4015: 467-475.
- [7] HU K Y, YUSUP A L, XU Q. Deformation measurement and pointing model analysis of 25 m antenna[J]. Applied Mechanics and Materials, 2015, 3744(713): 424-431.
- [8] GUIAR C N, LANSING F L, RIGGS R. Antenna pointing systematic error model derivations[J]. Telecommunications & Data Acquisition Progress Report, 1987, 88: 36-46.
- [9] MEEKS M L, BALL J A, HULL A B. The pointing calibration of the Haystack antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 1968, 16(6): 746-751.
- [10] LEWIS H, LUPTON W, SIROTA M J, et al. Pointing and tracking performance of the W.M. Keck Telescope[C] // SPIE 1994 Symposium on Astronomical Telescopes & Instrumentation for the 21st Century: Advanced Technology Optical Telescopes V, Kailua, Kona, HI, United States: 1994: 117-125.
- [11] 喻业钊, 韩雷, 周爽, 等. 佳木斯 66 m 射电望远镜指向精度测量及改进[J]. 天文研究与技术, 2016, 13(4): 408-415.
- [12] 克里斯琴森 W A, 霍格玻姆 J A. 射电望远镜[M]. 陈建生, 译. 北京: 科学出版社, 1977.
- [13] 虞林峰, 王锦清, 赵融冰, 等. TM65 m 射电望远镜指向模型的建立[J]. 天文学报, 2015, 56(2): 165-177.
- [14] 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, 2007, 4(2): 188-194.
- [15] 刘卫国. MATLAB 程序设计教程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.