

TM65 m射电望远镜指向模型的建立*

虞林峰[†] 王锦清[‡] 赵融冰 董 健 左秀婷 苟 伟 刘庆会
范庆元

(中国科学院上海天文台 上海 200030)

摘要 介绍了建立上海天文台天马65 m射电望远镜(简称TM65 m)指向模型的过程. 采用“十字扫描”的方法对单点数据进行采集, 采用带有高斯项和非线性项的曲线模型进行偏差拟合, 并对单点扫描过程中源角径导致的波束展宽量进行了仿真分析, 通过使用射电源预报来提高建立模型的效率. 用最小二乘法对全天区数据进行拟合, 得出了8个天线参数的指向模型, 并在实际中验证, 最后建立了TM65 m望远镜X波段指向模型. 盲指误差达到12.36角秒, 满足了X波段及以下波段的指向要求.

关键词 望远镜, 方法: 十字扫描, 方法: 数据分析

中图分类号: P111; **文献标识码**: A

1 概述

上海天文台天马65 m射电望远镜是目前国内口径最大的射电望远镜, 它将在射电天文、地球动力学和空间科学等多种学科中成为我国乃至世界上一台主干观测设备, 同时也将我国的嫦娥探月工程、火星探测及其它深空探测工程的应用中做出重大贡献. 如此大的口径意味着更窄的波束, 对指向精度也提出了更高的要求. 目前TM 65 m已经配备了L, S, C, X低频波段4套接收机系统, 其中X波段频率最高, 波束最窄, 指向要求最高, 在X波段上的模型也适用于其他波段, 因此本文讨论的指向模型都是建立在X波段上. 通常情况下要求天线的指向误差达到1/10波束宽度^[1], 对于TM65 m大概是15角秒. 本文将具体介绍望远镜指向模型的建立过程及方法. 主要分为两部分, 分别是单点偏差测量和全天区模型拟合, 图1和图2分别表示的是整个测试的系统框图和数据处理流程图.

2014-04-25收到原稿, 2014-12-05收到修改稿

*国家自然科学基金项目(11303076)资助

[†]lfyu@shao.ac.cn

[‡]jqwang@shao.ac.cn

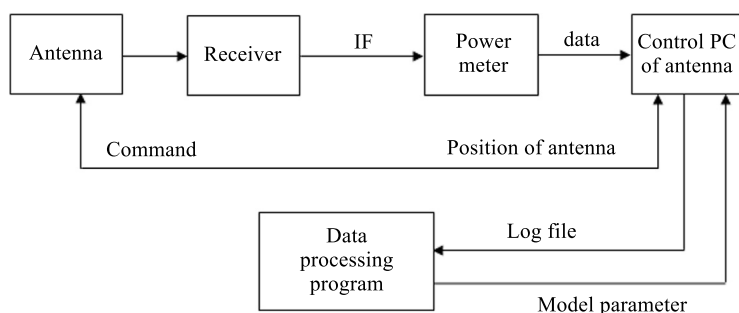


图 1 建立指向模型系统框图

Fig. 1 The systematic diagram for building a pointing model

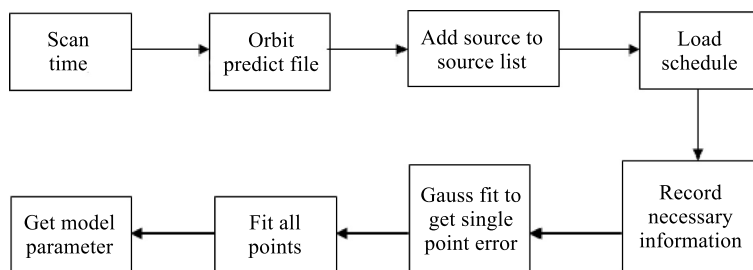


图 2 数据处理流程图

Fig. 2 The flow chart of data processing

2 单点数据采集及拟合

2.1 单点数据采集

本文采用一种新的方法来采集并拟合单点的指向误差, 用功率计和计算机取代传统的辐射计和绘图仪, 得到更高精度的功率读数和实时的天线位置信息, 如图1所示. 接收机中频信号输出接入到功率计, 读数由天线控制程序读取, 同时控制天线扫描并实时读取天线位置信息, 功率计选用罗德施瓦茨NRP-Z21型号, 此款功率计频率范围为10 MHz至18 GHz, 功率测量范围为-67 dBm至+23 dBm, 测量精度0.01 dBm; 另外用十字扫描法配合高斯加非线性项拟合, 可以使单点的拟合误差达到1/20波束宽度; 同时, 为了提高自动化程度, 使指向采集点的空间分布更合理, 在开始扫描之前, 对常用射电源的轨道进行了预报, 如图3所示(t_0 表示程序设定的观测起始时刻, 如果此时该射电源不可见, 则 t_0 为该射电源刚升起时刻, el_0 表示 t_0 时刻射电源的俯仰位置), 然后只需要将可见的、合适的一批射电源添加到射电源列表中, 天线控制计算机由程序控制让天线对射电源列表中的源轮流进行十字扫描, 即在方位和俯仰方向分别进行一次从负偏到正偏的扫描. 一般我们选取的俯仰扫描宽度为 $0.15^\circ (\pm 0.075^\circ)$, 为了使方位俯仰宽度一致, 方位扫描宽度为 $0.15^\circ / \cos(EL)$. 一次方位或俯仰扫描60 s, 每秒采集功率读数2次. 如图4所示, 两个波形分别是方位和俯仰扫描得到的图形, 从图中可以看到, 俯仰扫描的峰要明显高于方位扫描的峰, 根据十字扫描的特性我们可以知道, 此时的天线指向至少在俯仰方向上是有较小偏差的. 利用此图形我们可以在每次观测前进行指向验证时快速判断天

线指向是否出现异常, 进一步可以快速排查一些引起异常的原因, 如副面偏转或者馈源未换到位等. 然而在指向模型建立的数据收集阶段, 我们还需要其他信息来计算更为精确的指向误差. 所以在天线进行十字扫描的同时, 天线控制计算机除了记录功率计读数外, 还将记录天线的其他各项参数, 包括“天线的实际位置”, “射电源此时的位置”, “两者的差值”等信息. 将所有这些信息记录到log文件里面. 我们将一次十字扫描称为一个scan, 当收集到的scan足够多, 且方位、俯仰能够很好地覆盖全天区, 接下来数据处理程序就可以对这些scan进行全天区拟合. 在这之前还要对每个scan进行单点误差拟合以得到天线在不同方位、俯仰的指向误差.

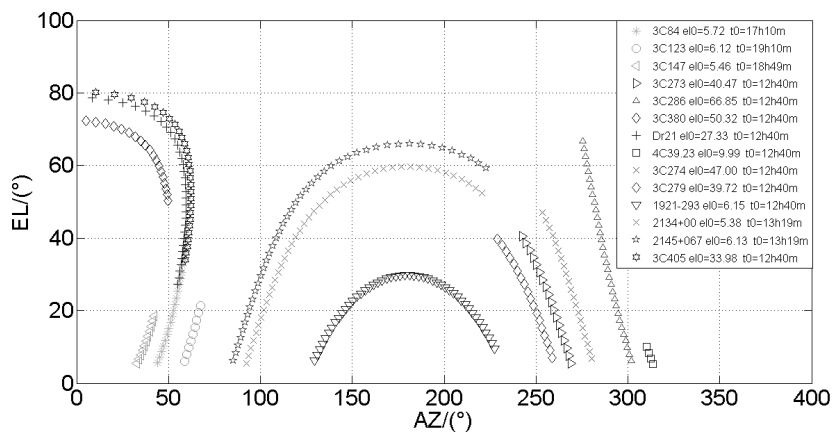


图3 轨道预报

Fig. 3 The prediction of source orbit

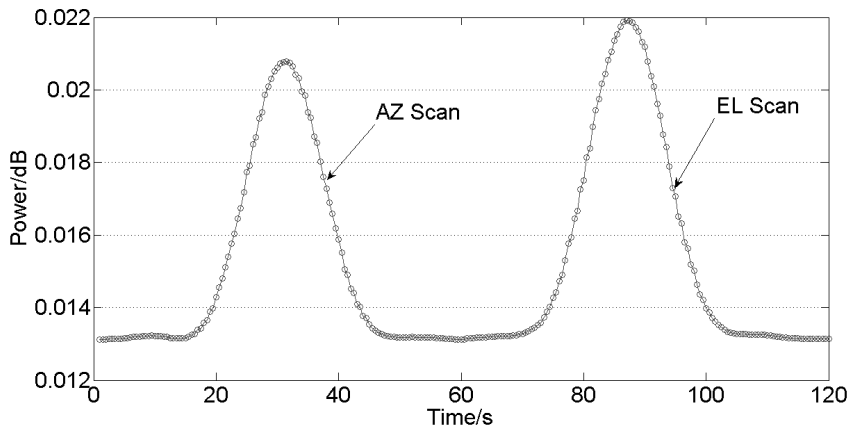


图4 十字扫描功率图

Fig. 4 The power diagram of cross scan

2.2 单点误差拟合

我们知道, 如果天线的指向没有误差, 那么在天线对射电源进行扫描时, 天线的位置

相对于射电源位置的偏量为零时,此时总功率读数最大,所以反过来,只要我们找到总功率最大时天线相对于射电源的偏置便可以获得此位置时天线的单点指向误差.由于对射电源扫描得到的总功率曲线符合高斯分布,因此对总功率读数与天线相对于射电源位置的偏差进行高斯拟合,便可以很容易地得到此偏差值.此功能在Matlab中很容易实现,将方位或者俯仰扫描的“功率值”以及“位置偏差”用cftool工具进行拟合,由于底噪的存在,功率的分布并不能满足(1)式所表示的单纯的高斯函数,如图5:横坐标与纵坐标分别表示单点的指向偏差和功率读数,实心点为实测点,实线为拟合曲线.

$$f(k) = b(1) \times e^{-0.5 \times ((k-b(2))/b(3))^2}. \quad (1)$$

我们在此基础上加入了多项式,分别用(2)式、(3)式的曲线对功率进行拟合,效果均不理想.

$$f(k) = b(1) \times e^{-0.5 \times ((k-b(2))/b(3))^2} + b(7), \quad (2)$$

$$f(k) = b(1) \times e^{-0.5 \times ((k-b(2))/b(3))^2} + b(4) \times k + b(7). \quad (3)$$

直至我们加入了二次项,拟合效果开始趋于理想,如图6所示为高斯拟合加入二次项后的拟合效果.进一步地,我们再加入三次项,看是否能够有更好的结果,如图7.

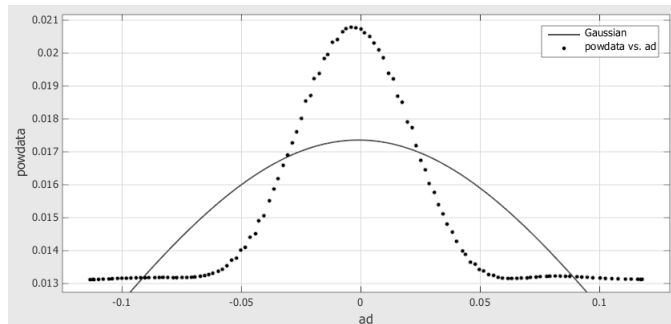


图 5 纯高斯拟合

Fig. 5 Fitting with an only Gaussian term

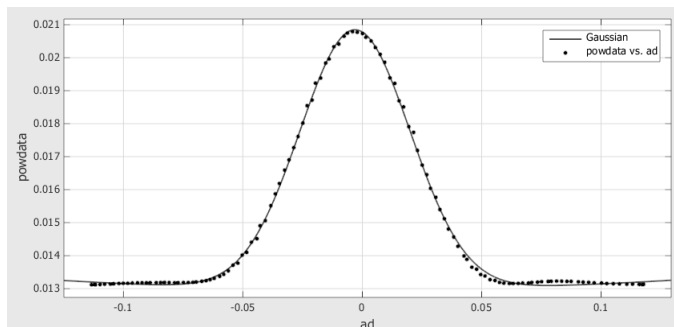


图 6 二次项高斯拟合

Fig. 6 Fitting with the Gaussian and quadratic terms

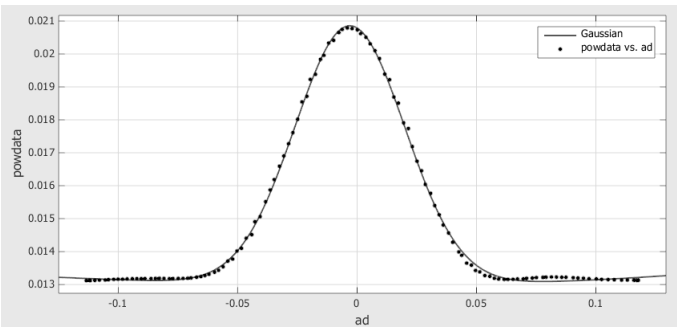


图 7 三次项高斯拟合

Fig. 7 Fitting with the Gaussian and cubic terms

比较三次项和二次项拟合的情况, 可以看到三次项的效果要更好一些, 为了更直观地了解三次项的改善情况, 我们对Matlab给出的两种拟合的几个重要参数进行比较. 如表1: 从各个参数上来看, 三次项拟合相对于二次项拟合的改善是比较微弱的, 其拟合的方差略微有所改善, 在此基础上如果再加入更多次的项, 其改善也是很微弱的. 而分析三次项拟合的结果, 拟合参数 $b(2)$ 的取值范围在 $-0.003\ 196$ 至 $-0.002\ 826$, 拟合的最大误差小于1角秒, 对于X波段及更低频的波段来说, 已经完全可以满足其指向精度的要求, 因此我们采用如(4)式中三次项高斯函数表达式.

$$f(k) = b(1) \times e^{-0.5 \times ((k-b(2))/b(3))^2} + b(4) \times k + b(5) \times k^2 + b(6) \times k^3 + b(7). \quad (4)$$

表 1 2次拟合重要参数比较
Table 1 Comparison of key parameters in 2 different fittings

Parameter	$b(1)$	$b(2)$	$b(3)$	RMS
Gaussian and quadratic polynomial	7.868×10^{-3}	-3.035×10^{-3}	2.314×10^{-2}	8.338×10^{-5}
Gaussian and cubic polynomial	7.867×10^{-3}	-3.011×10^{-3}	2.308×10^{-2}	8.349×10^{-5}

在Matlab中, 构造函数1:

$\text{fun} = \text{inline}('b(1) \times \exp(-0.5 \times \frac{(k-b(2))^2}{b(3)}) + b(4) \times k + b(5) \times k^2 + b(6) \times k^3 + b(7)')$; 'b', 'k'), 将天线控制程序采集到的log文件中“总功率”与“位置偏量”进行非线性最小二乘拟合:

$$b = \text{nlinfit}(k, y, \text{fun}, b0), \quad (5)$$

就可以得到函数1中7个常数项 $b(1)$ 到 $b(7)$ 的值. 而其中 $b(2)$ 就是函数取最高点时 k 的取值, 也就是总功率最大时天线相对于射电源的偏置, 我们所需要的天线指向误差便是这个值. 为了方便用户的使用以及之后各个scan的操作和全天区拟合、模型参数计算, 我们将Matlab连接到了vc程序中¹, 整个数据处理程序便是一个简单的MFC程序. 只要点击“选择数据”, 将之前提到的log文件导入程序, 然后点击“开始”, 程序就会开始逐条拟合每个scan的方位和俯仰偏差. 图8所示就是一个scan的误差拟合情况.

¹ 过程可参考http://blog.sina.com.cn/s/blog_67d069a90100q2t8.html, VC6.0调用MATLAB 生成的COM组件(deplytool方式).

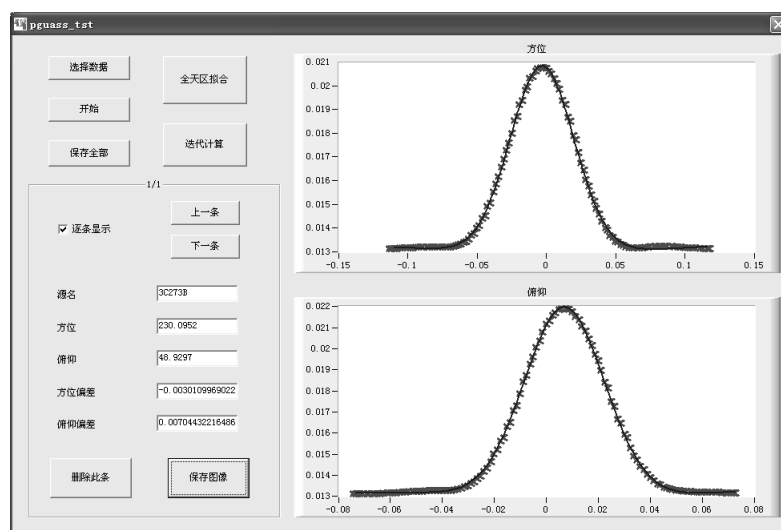


图 8 单点误差拟合

Fig. 8 Fitting the single pointing error

可以看到图中左侧分别显示的是“扫描源名”、“方位位置”、“俯仰位置”、“方位偏差”、“俯仰偏差”，图中显示天线方位位置 230° ，俯仰位置 49° ，方位偏差为 -0.0030° ，俯仰偏差 0.0070° 。可以看到，天线在此位置上指向的俯仰误差为 25.2 角秒，结果跟我们对图4的分析是一致的，方位误差由于还没有乘上 $\cos(49^\circ)$ ，实际上要更好一点，为 7.1 角秒。每个scan的这些信息将会被记录到另一个文件中，用来进行全天区的拟合。右边上下两条曲线分别表示方位和俯仰扫描，横坐标为“位置偏差”，纵坐标为“总功率”；叉点是实际测得的“总功率”与“位置偏差”，实线为拟合出(4)式中各个参数后得出的拟合曲线。从图中可以看到，拟合曲线和实际曲线符合得非常好，由此可以说明(4)式的三次项高斯曲线可以很好地符合实际扫描曲线，拟合出的结果是可靠的。有个别情况如在扫描过程中外界出现较大的干扰导致实测点不能很好地被拟合，可以将其删除，保留下质量较好的数据。

另外，射电源并非都是理想点源，以上扫描得到的高斯曲线实际上是天线波束被展宽后的结果，是天线波束和射电源角径方向亮温分布卷积得到的。根据高斯分布的特性，两个高斯波卷积的结果仍然是高斯波，我们假定射电源在角径方向上的亮温符合高斯分布。下面我们对两个高斯波卷积结果进行分析，我们知道一个高斯波形的均方根 σ 可以反映这个波形的宽度，而两个高斯波卷积得到的高斯波的均方根的平方是他们二者均方根的平方和，所以我们假设天线波束宽度为1(如图9实线)，源角径为0.5(图中虚线)，图中点线就是展宽后的波形，其展宽还是比较明显的。天马65 m天线在X波段的波束宽度约为 130 角秒，表2列出的是一些常用射电源的角径及其与天线波束宽度的比值，图10所示的就是源角径与波束不同比值对天线波束的展宽量。可以看到，一些源对于扫描波形的展宽是有比较大的影响的。

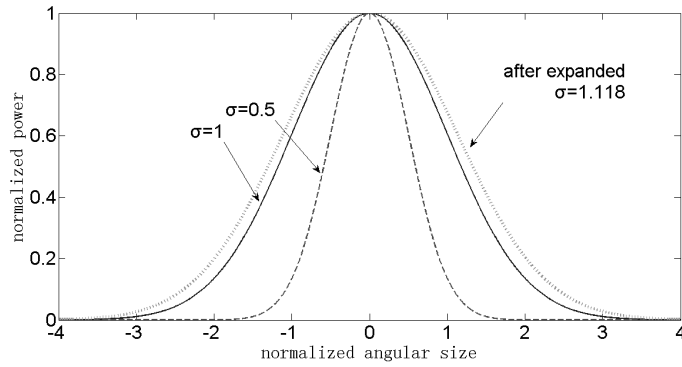


图9 波形展宽示意图

Fig. 9 General view of beam expansion

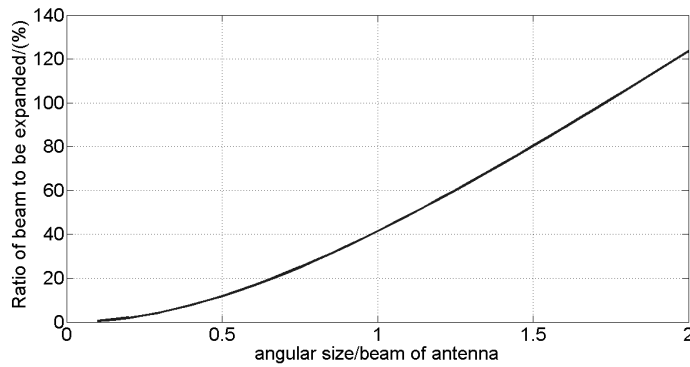


图10 不同源角径对波束展宽的影响比较

Fig. 10 Comparison of the effects of different angular sizes on beam expansion

表2 常用射电源角径及其与天线波束比值

Table 2 Angular sizes of commonly used sources and the ratio to the beam of antenna

Source	3C84	3C123	3C144	3C273b	3C274	3C345	3C405	Dr21
angular size/($''$)	1	15	300	20	200	170	115	20
angular size/ beam of antenna	0.007	0.1	2	0.13	1.33	1.13	0.77	0.13

2.3 全天区拟合结果分析

假设 ΔAZ_i 、 ΔEL_i 分别表示第 i 个scan的方位误差和俯仰误差, EL_i 表示第 i 个scan的俯仰角度, 则方位上的指向误差均方根 δ_A 为:

$$\delta_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\Delta AZ_i \times \cos(EL_i)]^2}{n}}, \quad (6)$$

俯仰上的指向误差均方根 δ_E 为:

$$\delta_E = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\Delta EL_i]^2}{n}}, \quad (7)$$

而总的指向误差 δ 为:

$$\delta = \sqrt{\delta_A^2 + \delta_E^2}. \quad (8)$$

从2013年6月30日晚至7月1日下午, 总共采集到有效数据点数151点, 在方位和俯仰上的分布如图11~12所示. 可以看到这些点覆盖天区较大且在方位和俯仰上均分布得较为均匀, 残差分布也很好, 方位误差在方位分布上的残差为6.33角秒, 经过修正可以达到5.05角秒, 俯仰误差在俯仰分布的残差为19.47角秒, 经过修正可以达到8.27角秒. 整体的方位俯仰拟合情况如图13所示: 修正前残差为20.47角秒, 修正后可达9.69角秒. 图14显示的分别是模型中方位和俯仰补偿量的三维分布图, 右侧颜色棒示意的即是Z轴的模型补偿量, 可以看到俯仰误差在方位上有明显的周期分布.

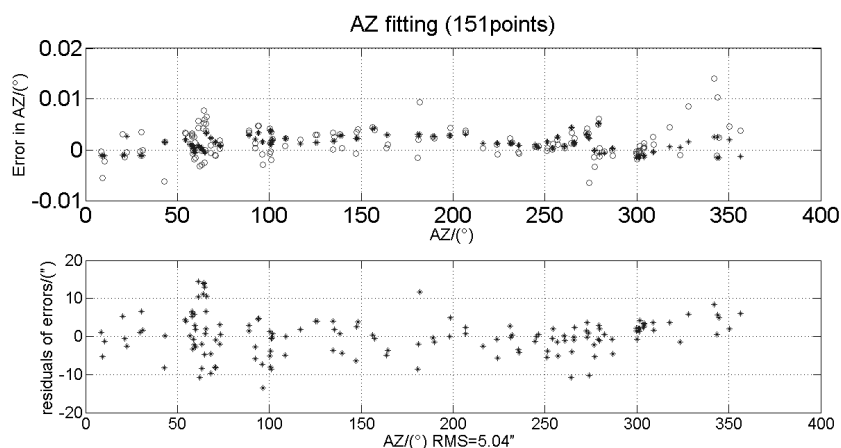


图 11 单点数据方位拟合及残差分布

Fig. 11 Distribution of single errors and their residuals in the azimuth direction

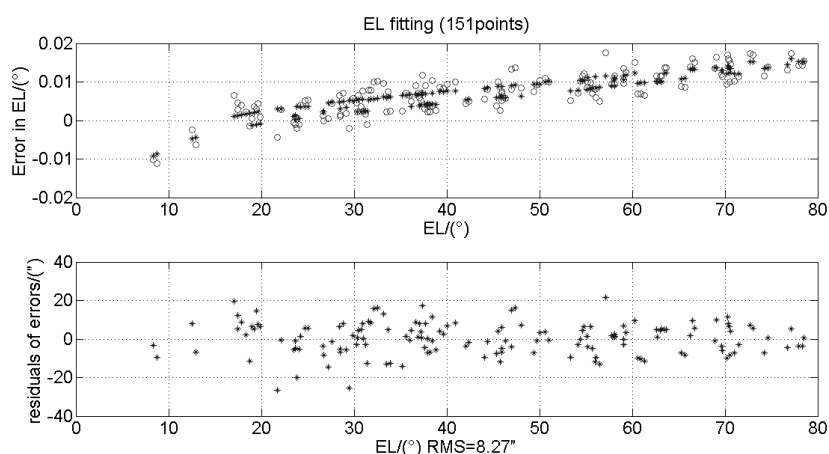


图 12 单点数据俯仰拟合及残差分布

Fig. 12 Distribution of single errors and their residuals in the elevation direction

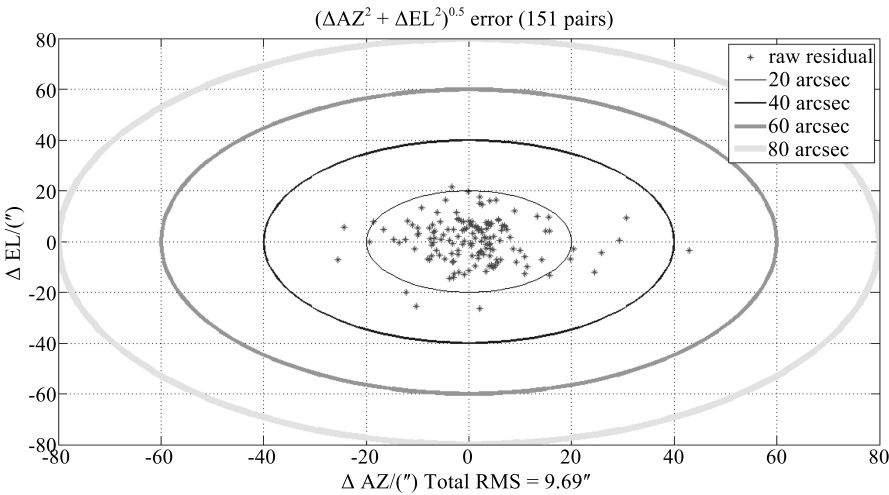


图 13 方位俯仰整体残差分布

Fig. 13 Distribution of the overall residuals

为了得到单次扫描指向误差拟合的精度, 我们对3C274连续进行了5次十字扫描, 得到结果如表3, 5次测量的方位偏差的最大差值为1.69角秒, 俯仰偏差的最大差值为1.08角秒. 如之前分析的拟合误差大概在1角秒左右, 加之其他一些因素的影响, 这个测量的精度是合理可信的.

表 3 连续5次扫描3C274结果

Table 3 The results of scanning 3C274 for 5 times

AZ/(°)	EL/(°)	Error in AZ/(″)	Error in EL/(″)
219.9861	66.1487	-7.47	8.64
220.9117	65.8931	-8.05	7.92
221.8276	65.6342	-7.44	8.28
222.7216	65.3702	-7.04	7.56
223.5972	65.1020	-6.36	8.64

3 指向模型

天线的指向误差是由很多原因造成的, 比如大气折射、天线的制造和装配误差、天线的结构变形以及因温度变化或温度变化梯度引起的变形误差等等. 目前天线指向校准方法包括硬件校准和软件校准. 硬件校准主要分为天线的轴系校准、馈源最佳位置的调整、轴角位置指示器校准和电轴校准这几个方面. 对于大射电望远镜, 硬件校准比较困难, 一般只在安装调试时进行, 以后很难修正, 且通过硬件加工、调试保证指向精度成本较高, 对于重量等载荷造成的指向偏差也难以改正. 因此还必须对指向误差进行分析和观测, 建立指向误差修正模型, 并通过软件校准才能满足精度要求. 这也是目前世界各地大射电望远镜通常采用的方法^[2].

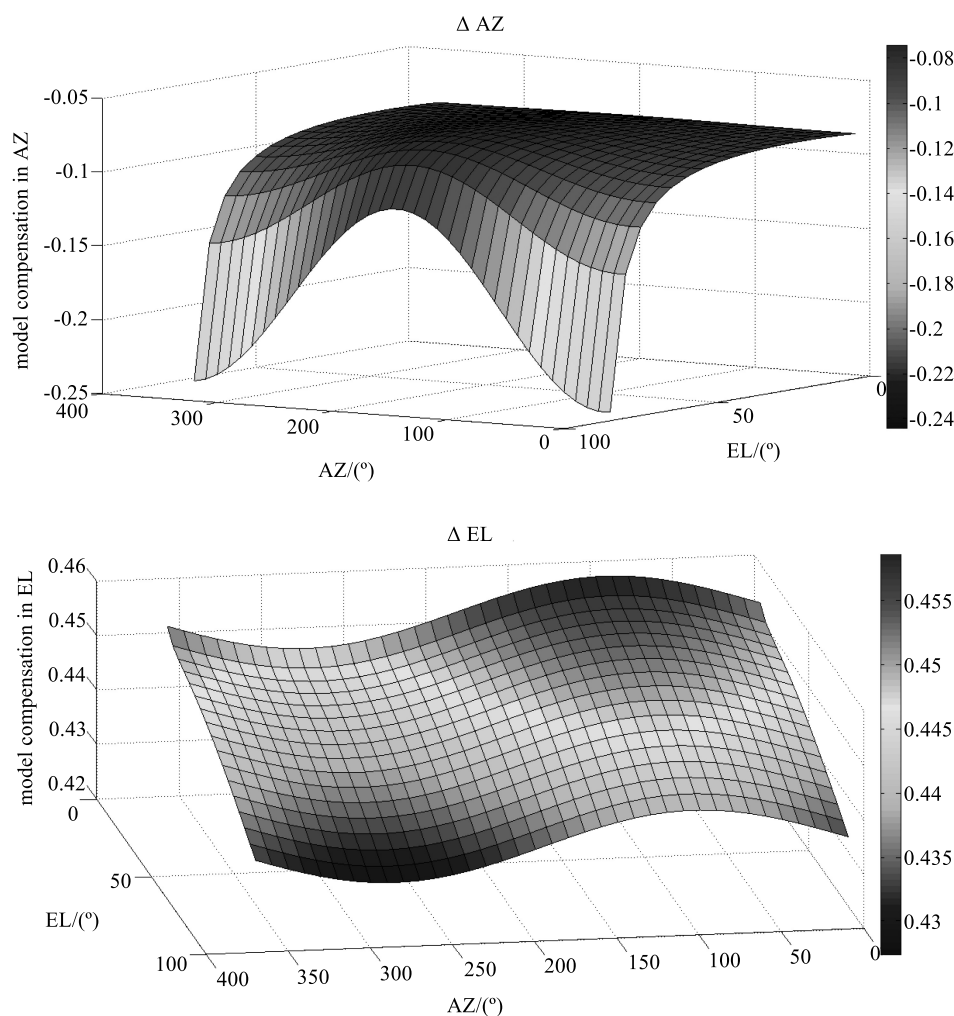


图 14 模型补偿量(Z轴单位: 度)

Fig. 14 The compensation of pointing model (unit of axis Z: degree)

在所有影响望远镜指向精度的因素中, 绝大多数具有特殊规律和重复性, 可以利用误差函数进行修正; 也有一些因素具有随机变化的特点, 无法用参数模型精确描述. 所有固有的、有规律的误差都称为系统误差, 主要由以下几个因素组成, 这些因素的影响都将反映在天线方位和俯仰的指向偏差上:

(1) 射电准直误差;

天线方向图的极大值方向称为天线的电轴, 天线电轴与俯仰轴不正交时产生的误差为准直误差. 主要对方位产生影响, 当偏离角度 δ 以及 ΔAZ 很小时,

$$\Delta AZ = -\delta \sec(EL). \quad (9)$$

(2) 编码器固有误差;

方位和俯仰编码器本身的误差, 各自只对方位或俯仰产生一个常数的偏量.

(3) 天线轴不正交引起的误差;

天线的方位轴与俯仰轴不正交产生的误差. 假设两者偏离角度为 ε , 当 ε 很小时, 俯仰上的偏差可以忽略不计, 此时方位偏差

$$\Delta AZ = \varepsilon \tan(EL) . \quad (10)$$

(4) 方位轴倾斜引起的误差;

方位轴偏离天顶一个角度 φ 引起误差,

$$\Delta AZ = -\varphi \tan(EL) \sin(K_a - AZ) , \quad (11)$$

$$\Delta EL = \varphi \cos(K_a - AZ) , \quad (12)$$

其中 K_a 是水平轴的方位.

(5) 重力导致的结构变形;

重力变形十分复杂, 它随着俯仰角的变化而变化, 将引起主反射面、副反射面、馈源等移动, 对俯仰有较大影响. 通常俯仰角越小, 俯仰偏差就越大, 但是很难找到他们之间的数学表达式, 一般用经验公式来拟合:

$$\Delta EL = \beta \cos(EL) . \quad (13)$$

式中 β 为俯仰系数.

(6) 大气残余折射误差;

经过以上几何计算对指向误差的矫正后, 大气残余折射误差由下式表示:

$$\Delta EL = K \cot(EL) , \quad (14)$$

其中 K 是考虑了气压、温度、湿度影响后的一个常数.

更加详细的分析可以参阅参考文献[2-3].

3.1 指向模型的确定

根据以上分析, TM65 m将采用如下模型:

$$\Delta AZ = C1 + C3 \times \tan(EL) \cos(AZ) + C4 \times \tan(EL) \sin(AZ) + C5 \times \tan(EL) - 1 / \cos(EL) \times C6 , \quad (15)$$

$$\Delta EL = C2 - C3 \times \sin(AZ) + C4 \times \cos(AZ) + C7 \times \cos(EL) + C8 / \tan(EL) , \quad (16)$$

其中: $C1$ 为方位编码器的固有误差; $C2$ 为俯仰编码器的固有误差和准直误差; $C3 = -\varphi \sin K_a$; $C4 = \varphi \cos K_a$; $C5$ 为方位轴偏离的角度; $C6$ 为天线波束偏离角度; $C7$ 为重力形变因子; $C8$ 为大气残余折射误差.

3.2 指向模型参数拟合

将单点的方位、俯仰误差进行全天区的拟合, 可以得到(15)式和(16)式的各项系数如表4(单位: 度).

将表4中的系数代入到天线控制程序的指向模型中, 由此TM65 m X波段的指向模型建立完成.

表 4 天线指向模型参数表
Table 4 Parameters of the pointing model

Parameter	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Value	-0.01200	0.01878	-0.00161	0.00032	-0.01518	-0.01939	-0.01369	-0.00188

3.3 指向模型验证

为了验证我们建立的指向模型的准确性, 在天线加入模型后在不同方位、俯仰上做了30个scan的扫描, 对最后的指向精度进行检查, 得到如表5所示结果. 根据(6)~(8)式得到方位指向误差8.17角秒, 俯仰指向误差9.28角秒, 整体误差为12.36角秒.

表 5 指向精度验证结果
Table 5 Verification of the pointing accuracy

Scan	AZ Position/(°)	Error in AZ/(″)	EL Position/(°)	Error in EL/(″)
1	311.37	0.82	40.8	-8.64
2	197.23	-2.30	44.69	-7.56
3	245.88	-2.95	24.37	-8.64
4	114.84	-5.08	54	-4.68
5	115.41	-9.64	54.39	-5.76
6	78.73	3.02	49.86	-5.04
7	78.87	2.76	55.28	0.00
8	130.62	-0.47	49.14	-16.2
9	131.75	-5.61	49.46	-13.68
10	162.22	11.88	39.85	-11.16
11	312.67	4.90	31.63	-19.8
12	254.11	17.83	13.74	-36
13	213.56	1.38	39.83	-12.6
14	312.74	21.50	31.31	-18
15	246.19	-4.93	23.98	-18
16	299.84	-0.78	68.67	-1.8
17	311.43	2.41	39.61	-1.8
18	131.40	-9.74	63.19	4.68
19	132.36	-13.00	63.51	12.6
20	82.77	-2.82	60.70	-15.84
21	148.76	3.59	56.40	-3.96
22	49.57	-4.36	56.62	3.24
23	146.52	-7.88	46.85	-15.84
24	147.14	-3.92	47.09	-9

表5 续

Table 5 Continued

Scan	AZ Position/($^{\circ}$)	Error in AZ/($''$)	EL Position/($^{\circ}$)	Error in EL/($''$)
25	315.27	14.18	23.67	-15.48
26	226.01	-12.96	33.14	-7.92
27	82.91	-3.48	61.13	72.88
28	315.35	1.99	23.36	-14.4
29	295.72	0.00	48.87	-7.2
30	226.44	-3.03	32.83	-14.4
$\delta_A = 8.17$		$\delta_E = 9.28$		

4 结论

本文详细论述了TM65 m在X波段指向模型的建立过程, 主要采用了十字扫描法和高斯拟合法获取单点指向偏差; 然后采用模型拟合手段建立了指向模型, 并分析了源角径大小对扫描测量波束的影响. 目前TM65 m射电望远镜的指向精度为12.36角秒, 其中方位8.17角秒, 俯仰9.28角秒, 满足X波段15角秒的指向精度要求. 另外, 在实际应用中此模型也能很好地符合S、C两个波段, 而L波段由于是偏馈设计, 也只要在此基础上在俯仰上加上 0.072° 的常数偏置即可.

参考文献

- [1] 赵彦. 大射电望远镜指向误差建模分析与设计研究. 西安: 西安电子科技大学, 2008
- [2] 高冠男, 汪敏, 施硕彪, 等. 天文研究与技术, 2007, 4: 188
- [3] Guir C N, Lansing F L, Riggs R. TDAPR. 1986, 88: 36

Pointing Model Establishment of TM65 m Radio Telescope

YU Lin-feng WANG Jin-qing ZHAO Rong-bing DONG Jian
ZUO Xiu-ting GOU Wei LIU Qing-hui FAN Qing-yuan

(Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030)

ABSTRACT A new method is described to establish the pointing model of the 65-meter Radio Telescope of Shanghai Astronomical Observatory (TM65 m). The prediction of source orbit is used to improve efficiency. The single pointing error is collected via “cross scan”, and the model is fitted with both the Gaussian and nonlinear terms. It is also simulated and analyzed how the beam is expanded after scan because of the angular size of a source. An eight parameter pointing model is built after fitting all collected errors. The model is applied and has been proved to work well in X band and other bands with lower frequencies. The final pointing accuracy in X band is 12.36 arcseconds.

Key words telescopes, methods: cross scan, methods: data analysis