



论 文

日喀则40米射电望远镜副反射面建模

江永琛¹, 张磊¹, 王锦清^{1,2,3,4*}, 王凡⁵, 周海凌⁵, 张伟⁵, 孙正雄¹, 虞林峰¹,
赵融冰^{1,2,3,4}, 吴晓静¹, 孙焱¹, 格桑¹, 格桑曲旦¹, 卜运忠¹, 马明成¹, 觉安罗布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 210023

3. 上海市空间导航与定位技术重点实验室, 上海 200030

4. 射电天文与技术全国重点实验室, 北京 100101

5. 中国电子科技集团公司第三十九研究所, 西安 710065

*联系人, E-mail: jqwang@shao.ac.cn

收稿日期: 2025-07-17; 接受日期: 2025-10-24; 网络出版日期: 2025-11-20

国家自然科学基金(编号: 12273097)和国家重点研发计划(编号: 2021YFC2203501)资助项目

摘要 调整副面位姿可以补偿重力对大型射电望远镜带来的主反射面面型与副反射面支撑的形变影响, 从而提高望远镜在不同俯仰角度上的天线效率和指向精度. 本文通过研究日喀则40米射电望远镜(RKZ40m)副面的位姿对天线增益和指向产生的影响, 根据RKZ40m副面调整机构的特点, 提出了使用扫描法建立副面随动模型的方法, 将副面Z向与Y向的建模过程进行了统一. 使用增强型实时相关处理机和副面调整机构上位机, 根据实测数据建立了副面随动模型, 并将副面随动模型与有限元仿真进行了对比. 通过开启和关闭副面随动模型对RKZ40m天线性能进行了测试. 结果表明, 副面随动模型可以有效改善天线在高低俯仰上的天线效率, 在X波段上, 射电望远镜的天线效率在全俯仰角度上可提高至70%以上.

关键词 射电望远镜, 相关处理机, 副面模型, 指向, 天线效率

PACS: 95.55.Jz, 84.40.Ba, 06.30.Bp, 07.05.Fb

1 引言

大型射电望远镜天线在射电天文、地球动力学和深空探测等多种学科中发挥着重要作用. 中国科学院上海天文台在日喀则和长白山建立了两台40 m口径的大型射电望远镜, 两台望远镜均配备了副面调整机构. 重力对副反射面支撑的影响会使副反射面的位置和姿

态发生变化, 从而偏离主反射面的焦点, 且受重力影响发生的形变并不是固定的, 其会随射电望远镜俯仰角度的不同而变化. 这些形变会导致射电望远镜的接收效率下降, 同时会使射电望远镜的指向发生偏转. 当主反射面和天线背架受到重力作用时会发生形变, 从而偏离理想抛物面. 主反射面发生变形后会产生一个新的焦点, 将副面移动到对应的位置在一定程度上可

引用格式: 江永琛, 张磊, 王锦清, 等. 日喀则40米射电望远镜副反射面建模. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2026, 56: 269512

Jiang Y C, Zhang L, Wang J Q, et al. Sub-reflector modeling of Shigatse 40-meter radio telescope (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2026, 56: 269512, doi: [10.1360/SSPMA-2025-0317](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2025-0317)

以补偿主反射面和背架发生的形变。

副面调整的优点在于可以通过实测建立准确的补偿模型, 与主动面相比, 控制调整更加迅速、简洁, 缺点在于部分主面的重力变形可能无法完全补偿。RKZ40m副面位姿可调, 可以对副面支撑和主反射面的形变在一定程度上进行补偿, 从而提高不同俯仰角度上的天线效率和指向精度。由于RKZ40m没有配备主动面系统^[1], 无法对主反射面进行调整使其更接近理想抛物面, 所以只能通过调整副反射面的位姿来补偿副面支架的重力形变和部分补偿主反射面的变形, 从而提高射电望远镜的天线效率和指向精度, 因此副面的位姿调整在RKZ40m上显得尤为重要。

国外具备副面位姿可调功能的大型射电望远镜有 Effelsberg、GBT、LMT等, 国内的天马望远镜、乌鲁木齐南山26米射电望远镜和正在建设中的奇台110米射电望远镜^[2]等也具有副面调整机构。2006年, Effelsberg望远镜升级了新的副反射面系统, 该系统采用了不对称的Stewart并联机构^[3]。Effelsberg望远镜使用全站仪进行测量^[4], 建立了一个与仰角相关的模型来补偿焦点位置的变化^[5]。GBT望远镜使用正交的Stewart并联机构作为副面调整机构^[6], 同样实现了随仰角变化调整副面位置来保持焦点位置稳定, 并定期与指向校准测量同步进行焦点扫描^[7]。LMT望远镜、南山26米望远镜和天马望远镜的副面调整同样采用传统的Stewart并联机构^[8-10]。LMT望远镜使用激光跟踪仪监控副面的位置进行补偿^[11,12]。天马望远镜使用步进法移动副面, 对功率进行拟合得到副面的最佳位置进行补偿^[13]。奇台110米射电望远镜使用了一种具有两组独立促动器的改进型Stewart并联机构, 该改进型Stewart并联机构在静态承载能力和刚度方面均优于传统Stewart并联机构^[14]。与全站仪或激光跟踪仪方案相比, 直接利用望远镜功率数据无需额外硬件。该方式能综合反映系统误差, 并用于副面调整以部分补偿主面形变。

2 副面位姿坐标定义

为更好地对副面位姿进行分析, 建立副面的坐标系。X轴为射电望远镜的俯仰轴, Y轴与俯仰齿轮面平行(射电望远镜水平放置时的重力方向), Z轴为射电望远镜焦距向外的方向, α 为绕X轴转角, β 为绕Y轴转角, 均符合右手法则。图1为射电望远镜水平放置时的坐标

系。当射电望远镜俯仰发生变化时, 受到重力作用影响, 副面及其撑腿会发生形变导致副面位姿的变化。其中, 重力方向上的Y向和 α 转角以及聚焦方向上的Z向变化较大, 而由于射电望远镜的对称性, X向和 β 转角变化较小。

图2为射电望远镜竖直放置时副面位姿相较于初始位姿的变化。其中 ΔZ 、 ΔY 和 $\Delta\alpha$ 分别为副面Z向平移量、Y向平移量和 α 转角旋转量。

RKZ40m的副面面形均方根误差小于0.05 ms。同时其位姿可调, 定位精度小于0.1 mm, 随俯仰变化可进行3个平移自由度实时调整, 具有匀速扫描功能, 并且速度可设置(速度 ≥ 0.4 mm/s)。RKZ40m副反射面调整使用双层三自由度调整机构。该调整机构基于3个自由度独立调整的思想设计, 任意一个自由度调整不影响其他两个自由度。可进行采用Y向平动、Z向平动和X向转动3个自由度电动调整, 在必要的时候对其他两轴进行手动调整。副面调整机构见图3。

相较于天马65米射电望远镜所采用的主动副面调整机构Stewart并联机构^[10], 这种调整机构的结构更加简单可靠, 控制更加简单直接, 同时可以实现副面形变最大方向, 即重力方向的补偿。

3 副面位姿仿真

在对RKZ40m副面进行实际测量建立副面随动模

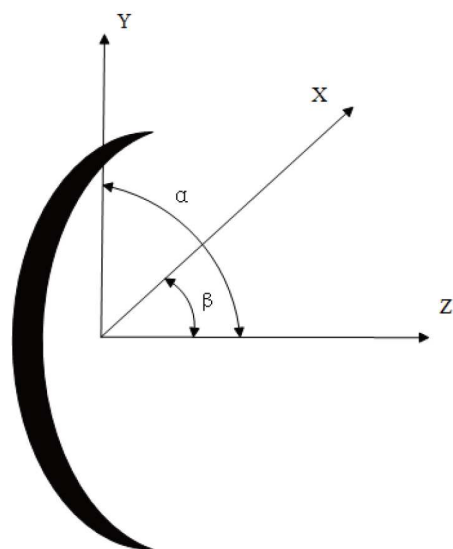


图1 副面坐标定义
Figure 1 Definition of the sub-reflector coordinates.

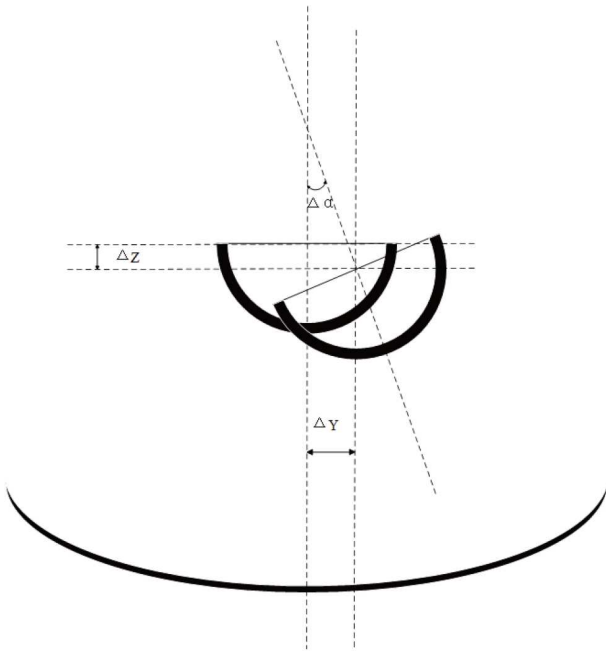


图 2 副面的位姿变化
Figure 2 Changes of pose of the sub-reflector.

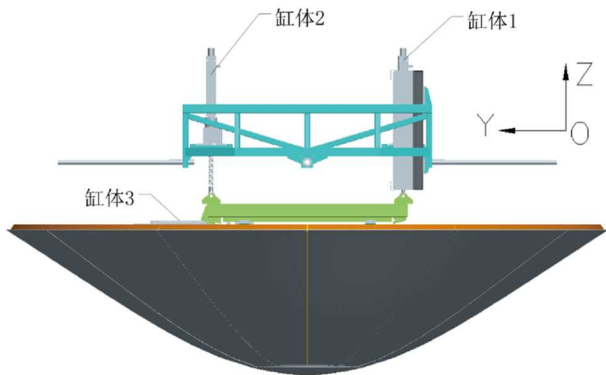


图 3 (网络版彩图) RKZ40m副反射面调整机构
Figure 3 (Color online) Adjustment mechanism of RKZ40m's sub-reflector.

型之前, 首先对其副面位姿进行仿真, 探究副面在 X/Y 向平移、 α/β 转角以及 Z 向平移对天线方向图、指向和功率最大值的影响. 使用的仿真建模工具为Grasp10.0, 仿真参数按照RKZ40m实际参数设置, 主面直径为40 m, 副面直径为4.2 m, 焦径比为0.315, 仿真频率为4 GHz (波长为0.075 m).

3.1 副面在 X/Y 向平移仿真

由于副面在 Y 向平移和 X 向平移的原理完全一致, 本文仅对副面在 X 向偏移以 $1/5\lambda$ (15 mm)步长, 从0到 2λ

(150 mm)偏移进行仿真, 天线方向如图4所示.

可以看出, 副面的 X/Y 向偏移影响了天线方向图的对称性. 当偏移量达到 0.4λ 时, 第一旁瓣开始与主瓣融合. 副面的 X/Y 向偏移对方向图最大值的影响并不明显, 副面偏移 0.4λ 天线增益仅下降约0.1 dB. 为分析副面在 X/Y 向平移对天线指向的影响, 取方向图峰值位置并进行二次项拟合可以得出, 副面的 X/Y 向偏移会导致指向发生偏移, 且偏移程度基本成线性, 线性关系约为 $10.43''/\text{mm}$.

3.2 副面绕 X/Y 轴旋转仿真

副面绕 X/Y 轴旋转原理同样相同, 对副面绕 X/Y 轴的 α/β 转角以 0.2° 步长, 从0到 2° 偏移进行仿真, 方向图如图5所示.

可以看出, 副面 α/β 转角并不会影响方向图的对称性, 对方向图最大值的影响较小, 副面偏转 2° 增益下降不足0.1 dB. 为分析副面 α/β 转角对天线指向的影响, 取方向图峰值位置并进行二次项拟合, 结果表明, 副面 α/β 转角会导致指向发生偏移, 且偏移程度基本成线性, 线性关系约为 $389.3''/^\circ$.

3.3 副面在 Z 向平移仿真

对副面在 Z 向偏移以 $1/5\lambda$ (15 mm)步长, 从 $-\lambda$ 到 λ 偏移进行仿真, 方向如图6所示.

可以看出, 副面 Z 向偏移不会影响天线的指向, 但会影响方向图的最大值, 在副面 Z 向偏差 0.2λ 时, 旁瓣

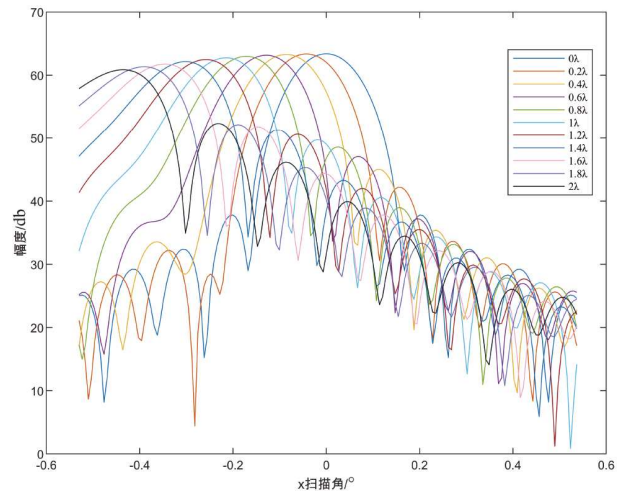


图 4 (网络版彩图)副面 X 向平移方向
Figure 4 (Color online) X -direction translation of the sub-reflector.

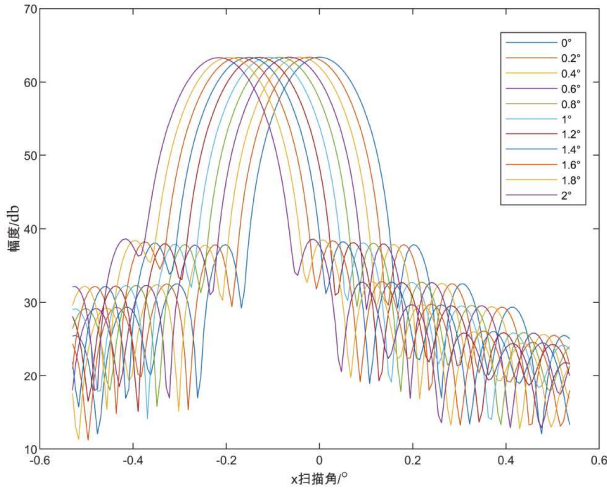


图 5 (网络版彩图)副面 α 转角方向
Figure 5 (Color online) α corner direction of sub-reflector.

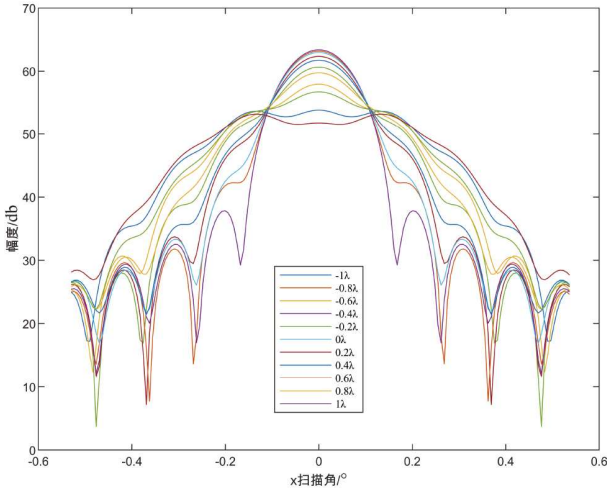


图 6 (网络版彩图)副面Z向平移方向
Figure 6 (Color online) Z-direction translation of the sub-reflector.

已经和主瓣融合. Z向正偏, 即副面远离主面方向, 相较负偏对方向图的影响更大, 当副面Z向正偏 0.4λ 时, 天线增益下降约1.65 dB, 当副面Z向负偏 0.4λ 时, 天线增益下降约1.04 dB.

4 RKZ40m副面随动模型建立

4.1 副面仿真结果分析

分析第3节对RKZ40m副面位姿的仿真结果以建立副面随动模型. 由图4可知, 副面的X向和Y向偏移会导致方位指向和俯仰指向产生误差, 但并不会极大地

影响天线方向图的幅度最大值. 由于重力原因和天线的水平对称性, 副面支撑和主面不会在X向产生较大形变, 形变主要产生在俯仰过程中的重力方向, 即Y向上, 且俯仰角度越低, Y向形变就越大. 由图6可知, 副面在Z向的偏移会极大地影响天线方向图的幅度最大值, 但不会对天线的指向产生影响, 因此对副面Z向偏移的补偿可以极大地改善天线的效率. 受重力因素影响, 在天线观测过程中, 随着俯仰角度变化, 副面会在Z向产生偏移, 且随着俯仰角度的升高, Z向偏移量也会变大. 由图5可知, 副面在 α 转角基本不会对天线最大增益产生影响, 只会对天线指向产生影响, 在射电望远镜经过指向修正后, 其指向偏差也会被一同补偿. 副面 α 转角对天线性能的影响要远小于Z向和Y向的偏差, 因此在建立副面随动模型时暂不考虑 α 转角.

4.2 副面随动模型

通过仿真结果、副面调整机构结构设计和上述分析, 对采用卡塞格林式的RKZ40m建立如下副面随动模型^[15,16].

$$\Delta Y = A + B \cos(EL), \quad (1)$$

$$\Delta Z = C + D \sin(EL), \quad (2)$$

$$\Delta EL = \Omega \Delta Y, \quad (3)$$

式中, EL 为射电望远镜俯仰角度; ΔY 和 ΔZ 分别表示在不同俯仰角度下副面在Y向和Z向所需调整量; A 、 B 、 C 、 D 为副面模型的参数. 如前文所述, 当对副面在Y向进行移动时会影响天线的俯仰指向, 且影响基本呈线性, 因此式(3)被用以补偿副面Y向移动所产生的俯仰指向偏差. 受重力因素影响和天线的对称性, 副面的偏移与天线方位角度基本无关, 因此模型只考虑了副面对俯仰角度的随动. 实际建模过程的关键为通过实测得到数据, 对数据进行分析 and 拟合求解出 A 、 B 、 C 、 D 、 Ω 的最佳参数.

在RKZ40m建成之初, 由于装配误差等因素, 需要对副面位姿进行调整来确定初始位置. 天线研制单位采用摄影测量法和同步卫星法反复测量, 使得在此俯仰角度上天线扫描出来的方向图对称同时增益最高, 由此确定了 48° 俯仰角度下副面的最佳位姿, 此时3个缸体的位置见表1. 将此时副面的位姿作为初始位姿, 下文所有对副面的调整均基于该位姿的相对调整量.

采用天线效率最大化的角度对副面进行建模. 由

表 1 副面位姿初始值

Table 1 Sub-reflector initial position

	缸体1 (mm)	缸体2 (mm)	缸体3 (mm)
初始值	-42.608	-51.431	13.004

于地球同步卫星的俯仰角度不会发生变化, 只能对特定的俯仰角度进行测量, 因此本文使用射电源3C84、3C123或DR21, 在X波段进行跟踪观测. 日喀则地区下午风速较大, 会使副面支撑发生抖动, 甚至会使命射望远镜指向发生严重偏转导致无法正常跟踪射电源. 同时该地区光照较强, 傍晚时期光照强度变化较快且在主面上分布不均, 从而使主面和副面支撑存在明显的温度梯度, 温度变化较快也会导致产生除重力因素影响外的不可控形变. 为减小温度、风速、云层和水汽等外界因素对射电望远镜接收电磁信号的影响, 本文选择在晴朗微风的夜晚对射电源进行观测, 得到副面建模所需的数据.

建立副面随动模型的主要步骤可以概括如下:

(1) 使用天线控制计算机发出指令, 控制射电望远镜跟踪选定的射电源;

(2) 进行指向扫描, 确定射电望远镜的方位俯仰指向偏差, 并对偏差进行补偿, 确保射电望远镜能够正确指向射电源;

(3) 在跟踪射电源的情况下, 对副面进行扫描式移动, 同时天线控制计算机记录扫描过程中的当前时间、天线实时俯仰角度和副面3个缸体的实时位置等信息, 增强型实时相关处理机的上位机记录当前时间和采集的功率数据;

(4) 将功率数据和副面位置根据时间进行对齐, 并拟合得到当前俯仰副面最佳位置, 俯仰角度每隔 5° 重复一次上述步骤直至得到全俯仰角度的数据;

(5) 将副面最佳位置与俯仰角度按模型进行拟合, 得到全俯仰角度的副面随动模型.

4.3 副面Z向建模

由仿真结果可知, 副面在Z向的平移对天线增益影响最大, 为提高天线效率, 首先对副面Z向移动进行建模. 由于副面在Z向的平移并不会影响天线的指向, 因此我们控制射电望远镜一直跟踪射电源. 在移动天线副面前, 首先进行指向校准. 然后重新对准射电源, 控制射电望远镜副面在Z向上从当前位置的 -15 mm 扫描到 $+15\text{ mm}$, 扫描速度为 0.5 mm/s . 同时, 天线控制计算

机与相关机上位机记录时间、俯仰角度、副面Z向位置和功率等信息. 扫描结束后, 通过所记录的时间信息将两组数据进行对齐. 由于功率数据为每秒记录一次数据, 而天线控制信息为每秒记录20个数据, 因此无法简单地通过判断时间是否相等进行对齐. 又因为副面Z向位置在扫描过程中为线性的, 而功率数据为非线性的, 因此我们选择先对副面Z向位置按时间进行线性拟合, 得到其随时间变化的函数, 之后将记录功率数据的时间带入函数, 即可得到所对应的副面Z向位置. 副面位置数据间隔 50 ms , 因此时间误差最大为 50 ms , 导致的对齐位置误差最大为 0.025 mm .

然后将天线功率作为因变量, 对应的副面Z向位置作为自变量进行二次项最小二乘法拟合, 得到该俯仰角度下副面Z向最佳位置. 由于整个扫描的过程只需要 1 min , 在此期间天线的俯仰不会产生较大变化, 同时日喀则地区大气较为稀薄, 因此我们认为在扫描过程中天线的噪底不会产生明显改变. 表2为不同俯仰角度下副面Z向位置的拟合结果和误差. 图7为天线俯仰 40° 时的副面Z向位置数据和拟合结果.

表 2 不同俯仰角度下副面Z向位置拟合结果

Table 2 Fitting results of sub-reflector Z-direction of different elevations

俯仰角度 ($^\circ$)	最佳Z向位置 (mm)	拟合优度	均方根误差 (mW)
10.69	6.31	0.91	0.026
11.01	5.99	0.94	0.023
13.30	5.95	0.91	0.026
13.65	5.91	0.92	0.026
15.47	5.85	0.91	0.028
15.82	5.75	0.92	0.026
17.58	5.67	0.92	0.025
17.94	5.56	0.93	0.022
20.91	5.44	0.93	0.024
22.62	5.26	0.94	0.024
28.12	4.16	0.96	0.029
30.60	4.33	0.98	0.029
35.59	3.81	0.98	0.028
40.50	3.50	0.99	0.026
45.28	3.10	0.95	0.049
50.57	2.50	0.90	0.029
64.82	1.72	0.99	0.035
70.36	1.58	0.99	0.030
70.77	1.64	0.99	0.029

射电望远镜跟踪射电源从 10° 升至 70° 的过程中, 每隔 5° 重复一次上述操作得到全俯仰角度的副面Z向最佳位置. 最后以副面Z向扫描过程中俯仰角度的平均值作为自变量, 该角度下的副面Z向最佳位置与初始位置的差 ΔZ 为因变量, 使用式(2)进行自定义函数的参数拟合, 可得到副面Z向的随动模型中的 C 和 D 参数. 去除掉风力等外界因素导致的异常数据后, 全俯仰角度的副面Z向最佳位置拟合结果如图8所示. 拟合得到参数 C 为7.439, 95%置信区间为(7.287, 7.59), 参数 D 为-6.214, 95%置信区间为(-6.49, -5.938).

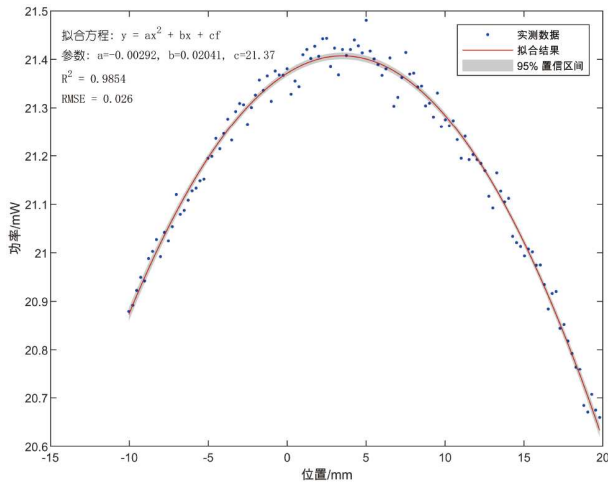


图 7 (网络版彩图) Z向扫描功率
Figure 7 (Color online) Z-direction scanning power.

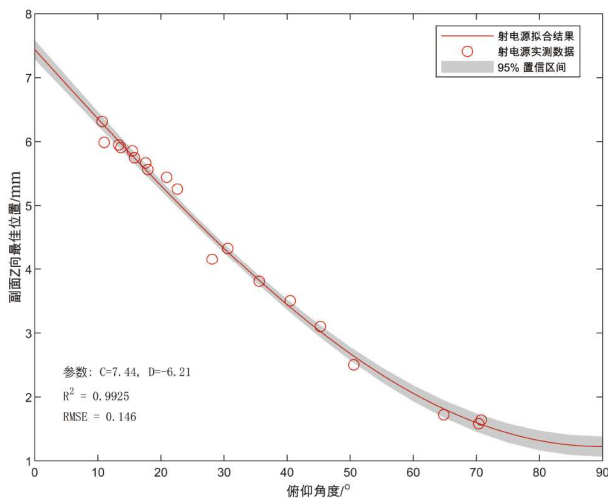


图 8 (网络版彩图)全俯仰副面Z向最佳位置
Figure 8 (Color online) Optimal Z-direction position of all elevations.

4.4 副面Y向俯仰指向补偿建模

由仿真结果可知, 副面在Y向的平移会导致俯仰指向的偏差, 且偏差基本呈线性, 因此要对副面Y向进行扫描, 首先要解决扫描过程中的指向偏差, 需要先对式(3)进行拟合, 得到 Ω 参数. 在跟踪射电源的情况下, 使副面在Y向平移多个值, 之后进行俯仰扫描得到俯仰指向误差, 最后解算出Y向平移对俯仰指向误差 ΔEL 的影响系数. 使用射电源3C144进行测试, 测试结果如表3所示.

以副面Y向平移作为自变量, 俯仰角度的偏移作为因变量进行拟合, 结果如图9所示. 实测数据拟合 Ω 为 $11.32''/\text{mm}$, 95%置信区间为(10.82, 11.81), 与仿真结果 $10.43''/\text{mm}$ 吻合.

4.5 副面Y向建模

将得到的副面Z向随动模型和Y向导致的俯仰指

表 3 副面Y向位置对指向的影响

Table 3 Impact of sub-reflector Y-axis position on pointing accuracy

副面Y向位移 (mm)	俯仰指向偏差+ (")	俯仰指向偏差- (")	平均指向偏差 (")
8	83.84	83.84	83.84
6	60.03	60.03	60.03
4	43.44	34.81	39.12
2	23.28	7.31	15.29
0	-2.50	-9.17	-5.83
-2	-28.57	-38.0	-33.32
-4	-45.62	-54.71	-50.16

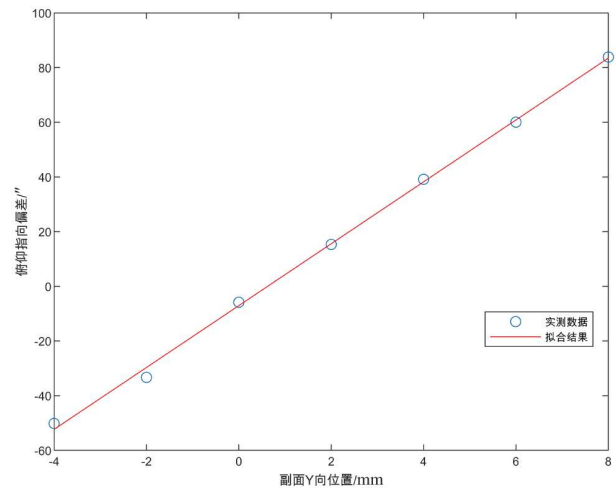


图 9 (网络版彩图)副面Y向平移对指向的影响
Figure 9 (Color online) Influence of the Y-direction translation of sub-reflector on pointing.

向偏差模型(式(2)和式(3))加载至天线控制计算机中. 当副面在Y向进行移动时, 天线控制计算机可以实时补偿其导致的俯仰指向偏差, 使得射电望远镜可以一直对准射电源. 在此基础上对副面Y向随动模型进行建模, 过程与副面在Z向的随动模型类似. 首先进行指向扫描和补偿, 根据仿真结果可知, 副面在Y向的偏移对天线增益的影响较小, 因此我们需要扩大扫描的范围以获得完整的波峰. 在指向射电源的情况下控制副面在Y向在 $-40-40$ mm之间进行匀速扫描, 扫描速度为 1 mm/s, 同时记录数据, 并将天线信息与功率信息两组数据进行对齐.

然后将天线功率作为因变量, 对应的副面Y向位置作为自变量进行二次项最小二乘拟合, 得到该俯仰角度下的副面Y向最佳位置. 表4为不同俯仰角度下副面Y向位置的拟合结果和误差. 图10为天线俯仰 55° 时的副面Y向位置数据和拟合结果.

在各个俯仰角度上对副面进行上述Y向扫描, 得到全俯仰的副面Y向最佳位置, 最后使用式(1)进行参数拟合, 结果如图11所示. 拟合得到参数 A 为 30.25 , 95% 置信区间为 $(25.03, 35.48)$, 参数 B 为 -66.56 , 95% 置信区间为 $(-73.97, -59.15)$.

表 4 不同俯仰角度下副面Y向位置拟合结果

Table 4 Fitting results of sub-reflector Y-direction of different elevations

俯仰角度 ($^\circ$)	最佳Y向位置 (mm)	拟合优度	均方根误差 (mW)
10.88	-42.34	0.98	0.213
12.37	-36.81	0.99	0.168
15.02	-36.88	0.98	0.222
30.73	-25.08	0.96	0.281
33.06	-23.00	0.93	0.297
35.47	-20.87	0.96	0.312
36.18	-20.98	0.96	0.262
37.33	-23.09	0.97	0.253
50.64	-8.75	0.96	0.238
52.28	-9.24	0.98	0.172
54.87	-6.82	0.98	0.165
57.27	-4.24	0.95	0.241
59.74	-1.57	0.90	0.313
61.86	0.25	0.96	0.216
64.80	3.64	0.94	0.276
72.80	5.72	0.96	0.233
75.10	8.65	0.95	0.264

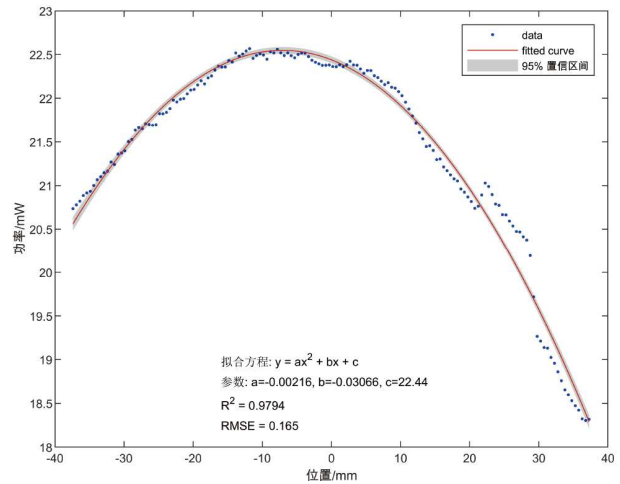


图 10 (网络版彩图) Y向扫描功率

Figure 10 (Color online) Y-direction scanning power.

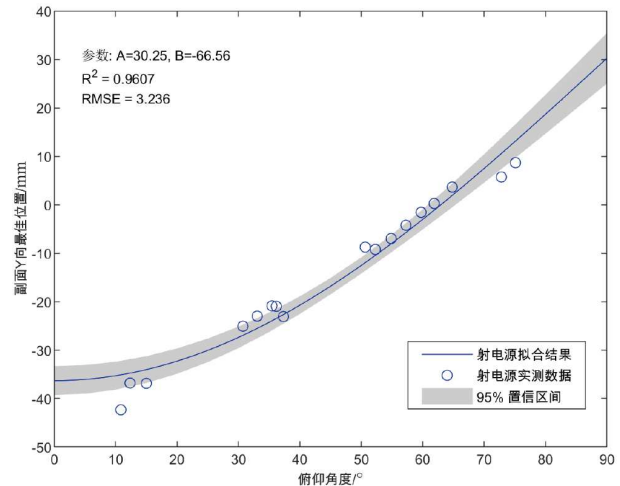


图 11 (网络版彩图)全俯仰副面Y向最佳位置

Figure 11 (Color online) Optimal Y-direction position of all elevations.

4.6 扫描法建模优势

本文使用扫描法对射电望远镜副面随动模型在Z向与Y向的建模过程进行了统一, 大大简化了副面随动模型的建模流程. 与天马65米射电望远镜的副面随动模型建模过程相比, 在Z向模型上使用扫描法代替步进法, 相较于步进法的5个步进位置, 扫描法可以在扫描的过程中以每秒20个位置的频率记录功率数据, 数据量的大大增加提高了模型准确性、参数估计精度和模型的泛化能力. 天马65米射电望远镜副面Y向模型建模使用的方法为控制副面在Y向步进5个位置, 在每个位置上进行俯仰扫描取功率最大值以消除副面Y向移

动对俯仰指向的影响, 再对扫描得到的方向图进行噪底裁剪后拟合功率最大值. 本文扫描法除增加了Y向位置的数据量外, 还通过使用提前加载俯仰指向补偿模型的方法消除了俯仰指向的偏差, 这种做法大大降低了每个俯仰角度下测量副面Y向最佳位置所需的时间, 避免了噪底的变化.

4.7 实测与仿真随动模型对比

对通过射电源实测建立的副面随动模型与天线研制单位提供的有限元仿真模型进行比较, 如图12所示. 可以看出两者基本吻合, 相关系数为0.996, 均方根误差为0.178 mm.

将实测建立的副面Y向模型与有限元仿真结果进行对比, 如图13所示. 可以看出两者基本吻合, 相关系数为0.98, 均方根误差为6.57 mm.

5 性能分析

天线的电性能参数是衡量天线性能的重要指标, 天线俯仰角度的变化和外界因素的影响均会使天线的电性能参数发生变化^[17,18]. 本节通过测量RKZ40m的电性能参数来评估副面随动模型对其天线性能的影响.

5.1 天线效率

射电望远镜的天线效率是衡量性能的关键指标之

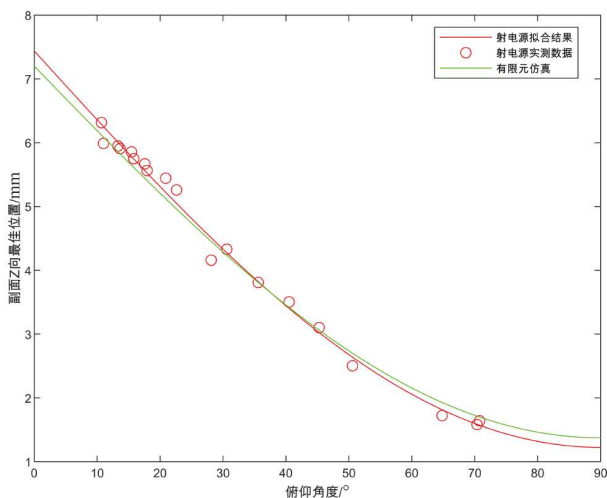


图 12 (网络版彩图)副面Z向模型对比

Figure 12 (Color online) Comparison of the Z-direction model on the sub-reflector.

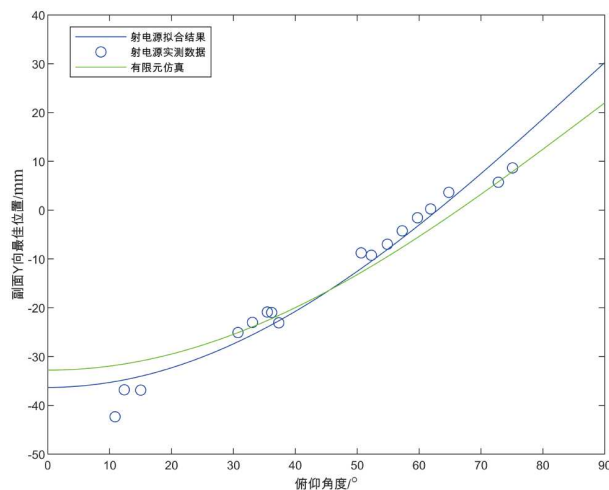


图 13 (网络版彩图)副面Y向模型对比

Figure 13 (Color online) Comparison of the Y-direction model on the sub-reflector.

一, 该指标反应了天线在接收电磁波过程中的能量转换效率, 天线效率由多个因子共同决定.

目前对射电望远镜进行天线效率测量的方法通常为标准源法, 即利用流量已知的射电源作为标准信号源, 将实际接收到的功率与理论上标准源应辐射到望远镜处的功率进行对比得到天线效率.

我们使用3C123作为观测目标射电源, 测量RKZ40m的天线效率. 射电流量密度为 9.173 Jy ^[19], 测量带宽为64 MHz, 积分时间为1 s. 天线效率测试结果已对大气、仰角进行修正^[20]. 首先将副面固定在表1所示的初始位置, 测量当前俯仰角度下的天线效率, 之后开启副面随动模型, 使副面移动到当前俯仰角度所对应的最佳位置, 再对相同的射电源测量天线效率, 全俯仰角度上测量得到副面随动开启和关闭时的天线效率数据. 最后对副面随动开启和关闭状态下的效率数据进行多项式拟合, 得到在全俯仰角度范围的效率曲线, 如图14所示. 可以看出, 开启副面随动模型后, 可以显著提高射电望远镜在高低俯仰角度上的天线效率, 俯仰角度在 8° – 85° 之间的效率达到70%以上.

5.2 天线灵敏度

系统等效流量密度 $SEFD$, 表示系统噪声对应的流量密度, 决定了射电望远镜最小可测流量, 一般用来衡量天线的灵敏度. 一个高灵敏度的射电望远镜可以在相同的观测时间内检测到更多、更暗弱的射电源, 或

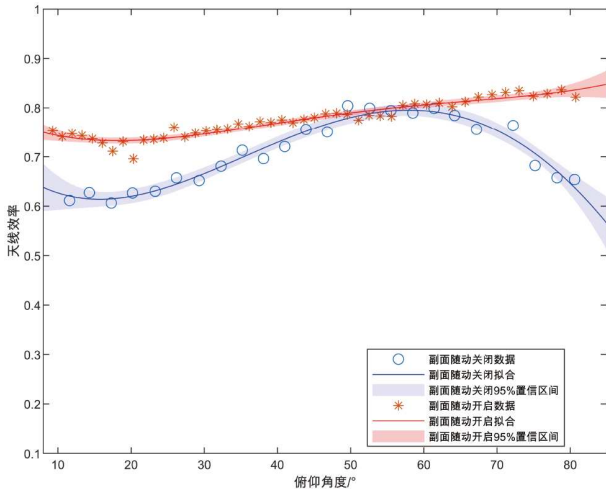


图 14 (网络版彩图)副面随动前后的天线效率
Figure 14 (Color online) Antenna efficiency with or without sub-reflector model.

者对于给定的射电源能够获得更高的信噪比观测数据. $SEFD$ 的计算公式为

$$SEFD = \frac{2kT_{\text{sys}}}{A_{\text{eff}}}, \quad (4)$$

式中, k 为玻尔兹曼常数(1.38×10^{-23} J/K), T_{sys} 为系统噪声温度, A_{eff} 为天线的有效接收面积.

在实际测量中, 当望远镜使用某一频率观测已知流量的射电源时, 就会导致接收机功率的升高, 体现为望远镜噪声温度的升高. 每央斯基流量导致的温度升高被称为 $DPFU$, 对 $SEFD$ 进行测量的方式一般为先测量 $DPFU$, 之后将系统温度与 $DPFU$ 对比.

$$SEFD = \frac{T_{\text{sys}}}{DPFU}. \quad (5)$$

图15和图16为副面开启前后的 $DPFU$ 和 $SEFD$. 可以看到当开启副面随动后, 天线的 $DPFU$ 相比未开启副面随动时提高, $SEFD$ 相比未开启副面随动时降低, 说明开启副面随动模型可以提高天线的灵敏度.

6 结论

本文主要研究了RKZ40m的副面位姿随动模型的建模. 首先对RKZ40m的副面位姿变化对天线产生的影响进行了仿真. 然后介绍了对主动副面位姿进行测量的方法, 以及如何对测量得到的数据进行处理进而建立天线的副面随动模型. 根据RKZ40m副面调整机

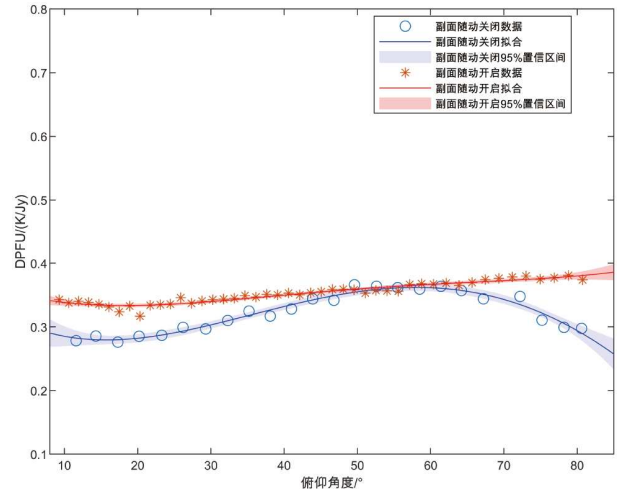


图 15 (网络版彩图)副面随动前后的 $DPFU$
Figure 15 (Color online) $DPFU$ with or without sub-reflector model.

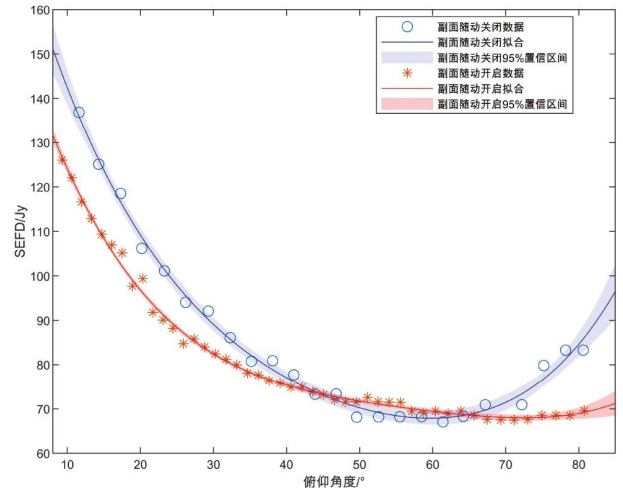


图 16 (网络版彩图)副面随动前后的 $SEFD$
Figure 16 (Color online) $SEFD$ with or without sub-reflector model.

构的设计, 提出了通过扫描法对副面位姿进行测量, 将副面Z向与Y向的建模过程进行了统一, 与步进方法相比, 该方法具有更加简单、快速和准确的优势. 使用该方法对RKZ40m的副面进行了测试, 根据实测数据成功建立了副面随动模型, 望远镜加载副面随动模型后, 俯仰变化时副面实时移动到最佳位姿. 将副面随动模型与有限元仿真进行了对比, 取得了较好的一致性. 最后对副面随动模型开启前后的天线性能进行了检测, 研究副面随动模型对天线性能的改进. 测试结果表明, 副面随动可以有效提高高低俯仰角度上的天线性能, 可以在全俯仰角度上将X波段上的天线效

率提高至70%以上, 证明了副面随动模型对天线性能的有效改善.

本工作所用的扫描法基于功率曲线, 不需额外计量硬件, 可实现高密度仰角采样与在线、可重复的标定, 已在实际运行中验证其工程可用性. 相较于常见

的随俯仰经验模型与全口径波前/面形重建路径, 扫描法以成本低、依赖少的特点更适合日常运维与快速健康诊断. 三类方法互为补充: 经验模型用于轻量实时控制, 扫描法承担周期性参数刷新与不确定度评估, 而面形重建在需要时用于深度优化.

参考文献

- 1 Sun Z X, Wang J Q, Yu L F, et al. Adjustment method of main reflector for a large radio telescope (in Chinese). *Acta Astron Sin*, 2024, 65: 44–54 [孙正雄, 王锦清, 虞林峰, 等. 大型射电望远镜主反射面调整方法研究. *天文学报*, 2024, 65: 44–54]
- 2 Kazezkhan G, Wang N, Xu Q, et al. Robust self-calibration of subreflector actuators under noise and limited workspace conditions. *Machines*, 2025, 13: 484
- 3 Bach U, Kraus A, Fürst E, et al. First report about the commissioning of the new Effelsberg sub-reflector. Max-Planck-Institut für Radioastronomie, Bonn, 2007
- 4 Nothnagel A, Pietzner J, Eling C, et al. Homologous deformation of the effelsberg 100-m telescope determined with a total station. In: *Proceedings of the Sixth General Meeting of the International VLBI Service for Geodesy and Astrometry*, Tasmania, 2010
- 5 Pietzner J, Nothnagel A. Deformation effects of the Effelsberg 100 m Radio Telescope. In: *EGU General Assembly Conference Abstracts*. Vienna, 2010
- 6 Prestage R M, Constantikes K T, Balser D S, et al. The GBT precision telescope control system. *SPIE*, 2004, 5489: 1029–1040
- 7 White E, Ghigo F D, Prestage R M, et al. Green Bank Telescope: Overview and analysis of metrology systems and pointing performance. *Astron Astrophys*, 2022, 659: A113
- 8 Gawronski W, Souccar K. Control systems of the large millimeter telescope. *IEEE Antennas Propag Mag*, 2006, 47: 41–49
- 9 Kazezkhan G, Xiang B, Wang N, et al. Dynamic modeling of the Stewart platform for the NanShan Radio Telescope. *Adv Mech Eng*, 2020, 12: 1687814020940072
- 10 Dou Y C, Yao J T, Hou Y L, et al. Orientation precision monitoring and homing strategy of the subreflector adjusting system for 65 meters radio telescope (in Chinese). *Robot*, 2012, 34: 399–405 [窦玉超, 姚建涛, 侯雨雷, 等. 65米射电望远镜副面调整系统姿态精度监测与回零策略. *机器人*, 2012, 34: 399–405]
- 11 Wang C, Li H, Ying K, et al. Active surface compensation for large radio telescope antennas. *Int J Antennas Propagation*, 2018, 2018: 1–17
- 12 Schloerb F P, Souccar K, Gale D M, et al. Lasers: A real time antenna metrology system for the large millimeter telescope. *SPIE*, 2022, 12188: 477–488
- 13 Wang J Q, Yu L F, Zhao R B, et al. Sub-reflector model depending on elevations and performance evaluation for TM65m radio telescope (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2014, 44: 1232–1240 [王锦清, 虞林峰, 赵融冰, 等. TM65m射电望远镜副面随动模型及性能评估. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2014, 44: 1232–1240]
- 14 Kazezkhan G, Xu Q, Wang N, et al. Performance analysis and optimization of a modified stewart platform for the Qitai Radio telescope. *Res Astron Astrophys*, 2023, 23: 095022
- 15 Matsushita S, Saito M, Sakamoto K, et al. Elevation angle dependence of the SMA antenna focus position. arXiv: astro-ph/0606514
- 16 Nikolic B, Prestage R M, Balser D S, et al. Out-of-focus holography at the Green Bank Telescope. *Astron Astrophys*, 2007, 465: 685–693
- 17 Qian Z H. VLBI techniques for deep space exploration (in Chinese). In: *Proceedings of the 7th Annual Symposium of CSA-CDSET*. Harbin: CSA-CDSET, 2010. 519–525 [钱志瀚. 甚长基线干涉测量技术在深空探测中的应用. 见: 中国宇航学会深空探测技术专业委员会第七届学术年会论文集. 哈尔滨: CSA-CDSET, 2010. 519–525]
- 18 Zuo Y X, Li Y, Sun J X, et al. A research on the gravity deformation of Delingha 13.7m telescope. *Chin Astron Astrophys*, 2011, 35: 439–446
- 19 Ott M, Witzel A, Quirrenbach A, et al. An updated list of radio flux density calibrators. *Astron Astrophys*, 1994, 284: 331–339
- 20 Wang J Q, Zhao R B, Yu L F, et al. Antenna performance measurements in L, S, C, and X bands for TM65m radio telescope (in Chinese). *Acta Astron Sin*, 2015, 56: 278–294 [王锦清, 赵融冰, 虞林峰, 等. TM65m射电望远镜L、S、C、X频段天线性能测量. *天文学报*, 2015, 56: 278–294]

Sub-reflector modeling of Shigatse 40-meter radio telescope

JIANG YongChen¹, ZHANG Lei¹, WANG JinQing^{1,2,3,4*}, WANG Fan⁵, ZHOU HaiLing⁵,
ZHANG Wei⁵, SUN ZhengXiong¹, YU LinFeng¹, ZHAO RongBing^{1,2,3,4}, WU XiaoJing¹,
SUN Yan¹, GE Sang¹, GESANG QuDan¹, BU YunZhong¹, MA MingCheng¹ &
JUEAN LuoBu¹

¹ Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China

² Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023, China

³ Shanghai Key Laboratory of Spatial Navigation and Positioning Technology, Shanghai 200030, China

⁴ National Key Laboratory of Radio Astronomy and Technology, Beijing 100101, China

⁵ The 39th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Xi'an 710065, China

*Corresponding author (email: jqwang@shao.ac.cn)

In large radio telescopes, precise adjustment of the sub-reflector's position and orientation can effectively compensate for gravitational deformations in both the main reflector surface and sub-reflector supporting structure. This compensation is crucial for maintaining optimal antenna efficiency and pointing accuracy across the full range of elevation angles. This study focuses on the Shigatse 40-meter radio telescope (RKZ40m), systematically analyzing how sub-reflector adjustments influence antenna gain and beam pointing. We developed a novel scanning-based method to establish a unified tracking model for sub-reflector positioning in both the Z- and Y-axis directions, specifically designed for RKZ40m's unique adjustment mechanism. The model was implemented using real-time measurement data from the telescope's enhanced correlator system and sub-reflector control computer, with results cross-validated against finite element simulations. Comprehensive performance tests, conducted by comparing system performance with and without the sub-reflector model, demonstrate significant improvements in antenna efficiency, particularly at extreme elevation angles. In the X-band operational mode, the implemented model achieves and sustains antenna efficiency above 70% throughout the entire elevation range, representing a substantial enhancement to the telescope's observational capabilities.

radio telescope, correlator, sub-reflector model, pointing, antenna efficiency

PACS: 95.55.Jz, 84.40.Ba, 06.30.Bp, 07.05.Fb

doi: [10.1360/SSPMA-2025-0317](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2025-0317)