论文

TM65 m射电望远镜面形微波全息测量

王锦清^{1,2*}, 左秀婷^{1,2}, MICHAEL Kesteven¹, 赵融冰^{1,2}, 虞林峰^{1,2}, 蒋甬斌^{1,2}, 苟伟^{1,2},
江永琛^{1,2}, 郭文^{1,2}

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 210008

* 联系人, E-mail: jqwang@shao.ac.cn

收稿日期: 2016-10-05; 接受日期: 2016-12-01; 网络出版日期: 2017-06-14

地面和空间频标稳定传输关键技术研究基金(编号: 11303076)和大型射电望远镜重力模型构建关键技术研究基金(编号: U1531135)资助

摘要 微波全息法是一种用于大型天线面形测量和调整的有效手段, 本文先简单介绍了微波全息法的技术发展情况, 接着针对天马65 m射电望远镜, 仿真了面形误差和副面偏移算法. 然后给出了在最佳俯仰角53°上, 65 m面板实测和调整情况, 通过多次调整, 65 m面形精度达到了0.28 mm, 重复测量误差0.13 mm. 最后在俯仰角45°–60°上采用Ka波段对天线效率进行了测量, 比较分析了主动面面形调整前后的性能改善情况, 在Ka波段上效率由原来的37%改善到约56%, 与理论预测相符.

关键词 微波全息法, 天线效率, 射电天文, 面形误差, 测量

PACS: 06.30.Bp, 07.87.+v, 07.05.Fb, 07.57.Hm

射电天文和深空技术的发展需要高精度天线面形, 尤其是大型厘米波、毫米波天线的建立, 使射电全息法得到了发展并走向成熟. 与常规工业测量方法相比, 该方法的特点是精度高、自动化程度高、对天线的姿态无特殊要求, 是一种与接收系统微波性能融为一体的测量手段.

微波全息测量有两种类型, 即相位恢复法(Phase Retrieve)和相位相关法(Phase Correlate)或叫干涉仪(Interferometer)法, 两者的基本原理相同, 但在相位获取方法上有一定差异, 前者不需要参考信号, 在测得远场幅度特性的情况下, 通过天线的辐射模型导出相位特性, 测量过程中需要信噪比非常高的信号源, 这在

20世纪70、80年代出现的全息测量中使用较多, 这种全息法适合口径分辨率较低的场合使用^[1], 关于相位恢复法的详细情况可以参考文献[2–5]. 相位相关法需要一面参考天线跟踪信号源的变化, 用互相关的处理手段获得相位信息, 理论和实践证明它比相位恢复法更有效, 目前对于毫米波天线的最好测量精度是2006年在智利阿塔卡马大型毫米波天线阵(Atacama Large Millimeter Array, ALMA) 12 m口径毫米波天线上实现的, 获得的面形精度为20 μm , 其测量误差在10 μm 以下^[6], 当然这个结果是采用近场实现的, 目前对于口径相对较小的毫米频段天线, 在没有毫米频段卫星信号源时采用人工发射源测量^[5], 而大口径厘米频段天线

引用格式: 王锦清, 左秀婷, MICHAEL Kesteven, 等. TM65 m射电望远镜面形微波全息测量. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47: 099502
Wang J Q, Zuo X T, Michael K, et al. TM65 m radio telescope microwave holography (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2017, 47: 099502,
doi: [10.1360/SSPMA2016-00415](https://doi.org/10.1360/SSPMA2016-00415)

普遍都采用远场测量, 因为厘米频段可用的卫星十分丰富, 采用这一方法进行测量的知名射电望远镜有美国的绿岸望远镜 (Green Bank Telescope, GBT)、深空网天线、波恩100 m等. 本文后面讨论的TM65 m射电望远镜的面形测量正是基于相位相关法实现的.

近年来, 国内的大型抛物面天线纷纷建起, 目前我国具有的大型抛物面天线有上海25 m、65 m、乌鲁木齐25 m、北京50 m、昆明40 m射电望远镜, 深空站喀什35 m、佳木斯66 m天线, 以及刚建成的500 m球面口径望远镜(Five Hundred Meter Aperture Spherical Telescope, FAST). 这些大天线的建成促使一批国内学者去研究和实践微波全息测量这一技术^[7,8].

TM65 m是65 m口径全实面射电望远镜, 配备了副面6杆机构, 用于解决副面支撑由于高低俯仰上重力变形导致的散焦问题. 它同时配备了主动面系统, 用于补偿高低俯仰角上由于主面重力变形导致的效率下降, 总体上采用3步走的方针: 第1步, 在最佳俯仰角53°上, 采用卫星全息法把面形误差从开始的0.6 mm提升到0.3 mm, 并验证效率提升效果; 第2步, 在前一步最佳面形的基础上, 加载天线厂家提供的有限元仿真模型(Finite Element Method, FEM), 并在多个俯仰角上验证效率提升情况; 第3步, 在多个俯仰角上采用射电源全息法, 构建全俯仰角范围内的重力模型, 与前一步的FEM模型比较, 并验证实测模型的有效性. 本文工作主要集中于第1步, 先进行了微波全息测量的

原理仿真, 然后主要报告了65 m最佳俯仰角(53°)上面板精度的实测和调整情况, 最后对面板调整后天线的性能改善情况进行了验证实测. 在这个过程中对副面位姿引起的口径面相位偏移和测量精度进行了仿真分析和实测.

1 理论描述

1.1 面形精度与效率(增益)损失的关系

一架性能优异的射电望远镜通常要求面形精度好于工作波长的1/20^[9], 对于面形精度为 δ (mm)的抛物面天线, 该面形误差对效率的影响与波长关系可简单表示为 $\eta=\exp[-(4\pi\delta/\lambda)^2]$ ^[9]. 在K频段22 GHz以上, 随着面形误差的加大, 增益下降剧烈. 当前65 m的设计目标是, 在主动面启动之前, 面形精度约为0.58 mm均方根(Root Mean Square, RMS), 主动面启动后, 主面精度在最佳俯仰角上可以达到0.3 mm (RMS). 因此在主动面启动后, 理论上Ka波段(32 GHz)约有2 dB的增益改善, Q波段约有4 dB增益改善. 表1给出了天马65 m (TM65 m)射电望远镜上最高5个频段的设计效率, 可以看到, 面形精度从0.6 mm提升到0.3 mm, 在Ku, K, Ka和Q波段将分别带来1.1, 1.2, 1.6和2.5倍效率提升.

1.2 全息测量方法描述

微波全息法是抛物面天线面形检测的一个重要方

表1 TM65 m若干波段设计效率
Table 1 Efficiency design for some bands of TM65 m

设计效率	波段				
	X (8.4 GHz)	Ku (15 GHz)	K (22 GHz)	Ka (32 GHz)	Q (43 GHz)
口径面效率 η_1	0.84	0.86	0.87	0.84	0.87
副面截获效率 η_2	0.99	0.99	0.98	0.99	0.99
副面及支撑遮挡 η_3	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88
反射损耗效率 η_4	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
面形误差效率	0.6 mm	0.87	0.74	0.52	0.31
$\eta_5=\exp[-(4\pi\delta/\lambda)^2]$	0.3 mm	0.97	0.93	0.85	0.75
馈源插损 η_6	0.94	0.94	0.93	0.93	0.96
交叉极化效率 η_7	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
相位误差效率 η_8	0.96	0.98	0.98	0.96	0.98
主面截获效率 η_9	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
天线总效率	0.6 mm	0.62	0.49	0.33	0.21
$\eta=\eta_1\eta_2\eta_3\eta_4\eta_5\eta_6\eta_7\eta_8\eta_9$	0.3 mm	0.65	0.62	0.54	0.52

法, 全息测量的理论基础是, 抛物面天线的口径场和远场存在二维傅里叶变换关系以及对于理想抛物面, 从焦点到口径平面的光程距离相等. 然而在现实情况下, 天线面不会是完全理想的抛物面, 所以口径平面上的相位也必然不相等, 在信号波长已知的情况下, 通过检测这个相位差, 理论上就可以确定天线面与理想抛物面之间的微小差别.

对于面形天线的远场辐射 $T(u, v)$ 和微小表面形变 ε 的关系, 可以得到如下的数学关系式^[10]:

$$\varepsilon(x, y) = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{1 + \frac{X^2 + Y^2}{4f^2}} \times \text{Phase}\{e^{i4\pi f/\lambda} \text{FFT}^{-1}[T(u, v)]\}, \quad (1)$$

其中, $\text{FFT}^{-1}[\]$ 指二维逆傅里叶变换, $\text{phase}\{\}$ 指取相位值, X, Y 分别是抛物面上的坐标值, f 是抛物面天线的等效焦距, λ 是测量信号的波长.

2 功能仿真

本文采用远场和口径场的二维傅里叶关系^[11], 仿真了远场扫描波瓣数对口径分辨率的影响, 比较了不同卷积核函数对面形恢复的影响, 仿真了馈源、副面偏移对口径面相位分布的影响, 并采用边沿最差评估法对全息测量的误差进行评估^[12].

2.1 面形恢复仿真

下面对上海65 m射电望远镜的面形恢复算法做

了仿真, 输入参数如下: 信号波长 $\lambda=0.1315$ m (2.281 GHz); 天线口径 $D=65$ m; 天线中心孔直径 $d=6.5$ m; 卡塞格林天线等效焦距 $f=142.625$ m, 馈源半锥角 $\theta_m=13^\circ$.

在理想的抛物面上设置了三圈凸起, 凸起的量和位置分布见表2.

其远场的构建运用了严格的解析算法, 即对口径场电流分布 $\tilde{J}(x', y')$ 做二维傅里叶变换后得到 $T(u, v)$, 并且对于 $\tilde{J}(x', y')$, 我们作如下分布假设:

$$\left| \tilde{J}(x', y') \right| = B + C \left[1 - \left(\frac{\rho'}{a} \right)^2 \right]^P, \quad (2)$$

其中, $B+C=1, P=2, B = 1 / \sqrt{10}$.

图1给出了口径面上照明分布、几何面形、远场辐射幅度方向图和相位方向图, 可以看到面形的畸变导致的相位方向图差异巨大, 幅度方向图主要表现为主瓣展宽和旁瓣电平升高. 仿真过程中, 在得到图1中

表2 仿真设置凸起位置和凸起量

Figure 2 Simulation protruding position and the amount of protrusion

位置	凸起量
$20\lambda < r < 50\lambda$	0
$50\lambda < r < 70\lambda$	0.05λ
$70\lambda < r < 100\lambda$	0
$100\lambda < r < 130\lambda$	0.1λ
$130\lambda < r < 160\lambda$	0
$160\lambda < r < 180\lambda$	0.2λ
$180\lambda < r < D/2$	0

图1 (网络版彩图) (a) 口径面幅度分布; (b) 仿真抛物面上三环凸起; (c) 理想和凸起面形的幅度方向图; (d) 理想和凸起面形的相位方向图. k 表示采样因子, D 是天线口径, θ 为半波束宽度

Figure 1 (Color online) (a) Amplitude distribution; (b) three ring projections on parabolic; (c) ideal and actual shape of the farfield amplitude; (d) ideal and actual shape of the farfield phase. k is the sample factor, D is the Antenna aperture, θ is the half-power beamwidth.

的实际方向图后,通过逆傅里叶变换,可以恢复面形,为了弱化作逆傅里叶变换时的数据截断效应,可以采用不同卷积核函数对远场数据进行复数卷积,全息中采用的卷积核函数分别为球谐函数(Sphere)、指数函数(Exp)、矩形窗函数(Pill-Box)、sinc函数以及指数函数与sinc函数的乘积(exp-sinc),它们的傅里叶变换如图2所示,可以看到球谐函数的旁瓣抑制制度最佳,达到60 dB,以该函数作为卷积核与远场数据进行乘积,然后做逆傅里叶变换,可以弱化由于采样数据截断导致的频谱能量泄漏.为了进一步评估核函数的优劣,分别采用0.1和0.05 m分辨率进行仿真,采用不同的卷积核,对前述三环凸起的远场数据进行面形恢复处理并切片,如图3所示,可以看到,在相同分辨率下,实际采用的指数函数和球谐函数,恢复得到的面形凸起陡峭,凸起范围内平坦,更逼近仿真输入情况,矩形窗的凸起虽然最陡峭,但是在凸起范围内引入了明显的振荡.

远场扫描波瓣的个数最终影响到面形恢复后的分辨率,两者存在如下关系:

$$B_n = \frac{D}{4.88 \cdot RA} k, \quad (3)$$

其中, B_n 为扫描波瓣个数, D 为口径面直径, RA 为口径分辨率, k 为采样因子(0.5–0.8), 此处取0.55, 表3给出了扫描波瓣数和口径分辨率的样例关系, 采用指数函数exp作为卷积核函数, 分别用0.05, 0.1, 0.2和0.4 m分辨率进行了仿真, 结果如图4所示, 最后给出了0.05 m分辨率情况下, 面形恢复二维图(图5), 与表2中的输入比较, 可以看到两者一致, 这说明了算法的准确性.

2.2 馈源和副面位置偏移仿真与实测

为了分离馈源或副面的位置偏置引起的口径面相位误差, 分别对主焦和卡塞格林幅面偏移进行了仿真求解^[13], 表4中 ΔX , ΔY , ΔZ 为口径面上各点相位值, θ 是主面一点与主焦点连线和中心光轴的夹角; θ_f 是副面一点与卡焦点连线和光轴的夹角; ϕ 对应这点在口径平面内的转角, f 是焦距. 在实际的数据处理时, 在得到口径面相位后采用最小二乘法对口径面上全部相位值进行拟合, 求解偏移量 δ_x , δ_y 和 δ_z . 仿真时设置口径65 m, 副面直径6.5 m, 卡焦放大率 $M=6.8573$, 主焦到副面定点距离1.8948, 仿真频率22.3 GHz.

图2 (网络版彩图)不同卷积核函数的傅里叶变换

Figure 2 (Color online) Fourier transform of different convolution kernel function.

图3 (网络版彩图)采用不同卷积核函数得到的恢复面形. (a) 0.1 m分辨率; (b) 0.05 m分辨率

Figure 3 (Color online) Surface shape recovery by different convolution kernel. (a) 0.1 m resolution; (b) 0.05 m resolution.

表3 扫描波瓣数与口径分辨率

Table 3 Beam scanned and aperture resolution

扫描波瓣个数	口径面分辨率 (m)
144	0.05
72	0.1
36	0.2
18	0.4

通过在X, Y和Z 3个方向上分别对卡焦馈源和副面平移10 mm进行仿真, 分析其引起的口径面相位偏移情况, 图6给出了卡焦馈源轴向和横向平移10 mm, 以及副面轴向和横向平移10 mm的情况. 根据相位偏

图 4 (网络版彩图)不同分辨率下面形恢复沿半径剖面
Figure 4 (Color online) Surface shape recovery with different resolutions.

移的剧烈情况,可以得到如下结论:在相同偏移量情况下,主焦馈源横向平移对口径面相位影响最为剧烈,然后依次是副面横向平移、卡焦馈源横向平移、副面轴向平移、卡焦馈源轴向平移(表5).

图 5 (网络版彩图)面形恢复二维图(彩尺单位: mm)
Figure 5 (Color online) Two-dimensional surface shape recovery (unit: mm).

表 4 馈源和副面平移引起的口径面相位偏移

Table 4 Aperture phase shift due to feed and sub-reflector offset

平移方向	主焦模式	卡塞格林模式
馈源轴向平移 δ_z	$\delta_z = \frac{2\pi}{\lambda}(1 - \cos\theta)\Delta Z$	$\delta_z = \frac{2\pi}{\lambda}(1 - \cos\theta_f)\Delta Z$
馈源横向平移 δ_x	$\delta_x = \frac{2\pi}{\lambda}\sin\theta\cos\phi \cdot \Delta X$	$\delta_x = \frac{2\pi}{\lambda}\sin\theta_f\cos\phi \cdot \Delta X$
副面轴向平移 δ_z	—	$\delta_z = \frac{2\pi}{\lambda}[(1 - \cos\theta) + (1 - \cos\theta_f)]\Delta Z$
副面横向平移 δ_x	—	$\delta_x = \frac{2\pi}{\lambda}(\sin\theta - \sin\theta_f) \cdot \Delta X$

图 6 (网络版彩图)卡焦馈源轴向平移10 mm (a); 横向平移10 mm (b); 副面轴向平移10 mm (c); 横向平移10 mm (d)
Figure 6 (Color online) Cassegrain focus feed axial offset 10 mm (a); lateral offset 10 mm (b); sub-reflector axial offset 10 mm (c); laterally offset 10 mm (d).

为了验证口径相位拟合方法的准确性, 构建了副面 X 、 Y 和 Z 向平移的模型(表4), 然后对口径面相位进行解算副面 X 、 Y 和 Z 向偏移, 并采用幅度扫描法^[14]进行对比, 幅度扫描法—即在每个方向上步进副面位置, 然后扫描目标源, 通过检测幅度最大值得到最佳 X 、 Y 和 Z , 目标源采用53°俯仰上亚洲四号同步卫星, 两种方法的实测结果见表6, 可见口径面相位解算得到的副面偏移和采用幅度扫描法得到的结果一致性良好, X 和 Y 差异约为11%, Z 向差异8%.

3 TM65 m面形误差实测

3.1 天线扫描参数和实测描述

采用1.8 m天线与65 m天线组成连线干涉仪, 系统构成见文献^[15], 选用亚洲四号卫星Ku频段信标12.25 GHz作为实测信号, 该星在TM65 m上的俯仰角度约为53°, 由此可以得到扫描参数的设置见表7. 天线围绕卫星进行65列的俯仰扫描, 由此形成的口径分辨率为1 m, 扫描间隔与波束宽度接近, 并需要实测略作调整, 如果该值的设置不恰当会导致采样的混叠, 从而导致最终天线面形恢复在左右边沿失真. 扫描速度和扫描宽度在很大程度上与观测时间长短直接相关, 扫描速度过慢会导致观测时间很长而无法容忍, 扫描过快会导致有效采样数据丢失, 常用的最快扫描速度是每秒

不超过半个扫描间隔. 扫描宽度的设置与口径分辨率相关, 它基本是扫描间隔与扫描列数的乘积(并考虑 $\cos\theta$ 因子). 按目前0.016°/s的速度扫描和1.3°扫描范围, 每列的扫描时间约是82 s, 再加上校准和天线跟踪稳定时间, 估计一列的观测时间约100 s, 由此知道整个65列观测时间约1 h 50 min. 每列俯仰扫描前, 方位先作一定的偏移, 然后俯仰从低往高扫, 扫描列数依次左右展开, 每次扫描到达最高俯仰位置后, 天线指向卫星(Boresight, 观测校准), 用作校准处理. 同时, 为了校准接收链路的相位起伏, 让1.8 m参考天线尽量靠近65 m测量天线, 目前两者的中心距离约30 m, 以削弱大气抖动的差异. 另外, 在布置本振电缆和中频电缆的时候, 尽量让参考天线和65 m测量天线走相同的路径, 以最大程度消除接收链路的温度效应导致的相位起伏差异. 此外, 采用对测量天线和参考天线同时注入靠近卫星信号的校准信号, 然后对连线干涉仪校准信号和卫星信号的双差分相位进行后续相位处理, 具体的相位校准方法论述请参考文献^[16].

3.2 面形测量和调整

TM65 m通过1104个促动器调整主面面形, 通过测量→主动面调整→测量→主动面调整…, 这种反复迭代方法, 使面形逐渐逼近理想状态, 面形的改善过程

表5 主焦和卡焦处馈源、副面偏移引起的口径面相位偏差

Figure 5 Aperture phase shift caused by primary and Cassegrain focus feed, sub-reflector

平移距离 (mm)	主焦引起相位偏差 (°)		卡焦引起相位偏差 (°)			
	馈源轴向	馈源横向	副面轴向	副面横向	馈源轴向	馈源横向
10	210	537	22	413	7	125

表6 相位拟合法与幅度扫描法得到的副面偏移(单位: mm)

Table 6 Sub-reflector offset got by phase fitting and amplitude sweeping

方法	X 向偏移	Y 向偏移	Z 向偏移
口径面相位拟合法	-0.656	-5.165	-0.100
幅度扫描法	-0.589	-4.794	-0.108

表7 扫描参数设置

Table 7 Scans parameter setting

扫描速度 (°/s)	扫描间隔 (°)	扫描列数	扫描宽度 (°)	校准时间 (s)	指向校准间隔 (scan)
0.016	0.033	65	1.3	5	10

如图7所示, 面形RMS从0.58 mm逐渐提升到了0.28 mm, 图中扣除了副面和撑腿的遮挡部分. 由于天气和风等环境因素对测量的影响, 每次调整主面后, 需要进行验证测量. 经过多次测量和调整, 最终获得的面形误差如图8所示, 可以看到3次独立的测量结果一致, 在测量过程中放置了3个下陷标志位置, 见图8中下方和左侧蓝色部位.

在调整面板过程中, 将视单块面板为刚体, 调整量解算采用二维线性拟合, 即先在口径范围内搜索到单块面板内对应的网格点数据, 然后对该组数据进行二维最小二乘法拟合, 给出 X 和 Y 两个方向的倾斜角和固定偏置量, 然后根据单块面板的尺寸归算出4个角的调整量, 对于相邻4块(或3块)面板采用平均值的方式输出触动器调整量. 由于采用了促动器调整, 即一个促动器带动相邻的4块(或3块)面板进行整体调整, 有两种情况需要注意: 首先, 促动器与面板的连接是螺栓与螺母压接在一起的, 并没有压力传感器告知用户连接是否松动, 而实践表明, 在面板反复促动中, 松动是容易发生的, 在这种情况下调整将失效. 其次, 4块(或3块)面板的拼接如果不平整, 那么无论如何调整, 都无法达到理想的目标. 因此, 在面板安装初期, 检查并调平4块面板的拼接处, 定期检查面板与促动器的松动情况是十分必要的.

表8给出了3次测量的面形误差统计, 可以看到65 m口径范围内, 面形精度均达到了0.3 mm, 随着统计半径的缩小, 面形精度越来越高, 在58 m以内, 面形精度基本达到了0.25 mm. 外圈面板测量精度的下降主要由2个原因导致: 首先, 65 m天线的照明函数在边沿下

图7 (网络版彩图)主动面逐次调整后面形误差测量(彩尺单位: mm)

Figure 7 (Color online) Surface error measurement after actuators adjusted (unit: mm).

图8 (网络版彩图)主动面调整后, 最终面形精度RMS=0.28 mm (彩尺单位: mm)

Figure 8 (Color online) The final surface accuracy after active surface adjustment, RMS=0.28 mm (unit: mm).

表8 面形误差统计
Table 8 Surface error statistics

面形误差 (mm)					观测时间(UT)	天气, 气温, 风速
统计口径 65 m	统计口径 63 m	统计口径 60 m	统计口径 58 m	统计口径 56 m		
0.274	0.267	0.257	0.251	0.243	16y1m19 09:16-11:40	多云, 2℃, 西北风微风
0.278	0.270	0.263	0.260	0.255	16y1m19 14:44-17:06	多云, 1℃, 西北风微风
0.288	0.281	0.273	0.263	0.256	16y1m27 11:24-13:54	晴, 3℃, 东风微风

降10 dB, 由于信噪比的下降, 测量精度会有所降低; 其次, 背架的外沿受环境影响更大, 每次测量持续时间长于2 h, 在多次测量过程中, 很难保证完全一致. 因此, 多次测量, 面形的外沿一致性相对会差些.

3.3 误差分析与实测

全息测量的误差与信号信噪比(Signal Noise Ratio, SNR)成反比, 与扫描列数 N 成正比, 并且与半张角 ψ (主面上一点与焦点连线 and 光轴的夹角) 有关系, 在口径面幅度均匀分布的情况下, 误差表达式为 $e = \frac{N\lambda}{4\cos(1/2\psi)\pi \cdot \text{SNR}}$, 对于65 m天线 ψ 最大 76° , 由于 $\cos(1/2\psi)$ 因子的存在, 中央处的测量精度最高, 随着半张角的增大, 测量误差会有所增大, 在边沿处测量误差约是中央处的1.3倍.

图9给出了65 m口径面在不同扫描列数情况下, 不同的信噪比对应的在口径面边沿处, 即 ψ 最大 76° 时的测量误差, 可以看到, 采用64列扫描, 要达到0.1 mm的测量精度, 需要的理论信标比需要达到65 dB.

图10给出了实测远场扫描过程中互相关幅度情况, 其有效信号的动态达到70 dB以上, 因此, 其单次测量的误差约在0.1 mm是有把握的.

从另外一个角度考虑, 如果只是为了诊断面形情况是否正常或重力变形(而不是为了输出单块面板调整量), 通常可以选择低分辨率进行扫描测试, 如 $N=32$, 口面分辨率约为2 m, 这样可以获得更高的测量精度, 并且由于扫描列数的减少同样导致扫描宽度的减小, 可以节省大量的测量时间.

在实际测量过程中, 准确实测评估单次的测量误差是比较困难的, 因为除了上述信噪比因素外, 测量系统不稳定因素、天线随机指向偏差、环境因素(如大气、风和温度)对测量的结果影响同样很大. 准确分离这些因素的误差贡献是不易的. 但是可以把误差来源分为两类, 一类是外部空间链路带来的, 另一类是接收系统自身的. 先通过多次测量评估重复测量误差, 这个误差将是接收链路、环境因素的总体误差贡献, 然后同时对测量天线和参考天线注入接近卫星频点的信号, 通过检测注入信号的相位变化, 可以分离接收设备链路的相位误差和空间链路的相位误差, 并以此判断测量条件是否满足.

图11给出了上述3次测量的重复精度, 即把口径面

图9 (网络版彩图)信噪比和测量误差的理论关系

Figure 9 (Color online) SNR and measurement error in theory.

图10 (网络版彩图)远场扫描得到的互相关幅度(彩尺单位: dB)

Figure 10 (Color online) Far-field scanned cross-correlation amplitude (unit: dB).

图11 (网络版彩图)3次测量RMS分布

Figure 11 (Color online) RMS distribution of three times' measurements.

上每一点的3次统计得到的RMS在口径面上进行绘制, 它体现了每个点位3次测量的重复测量误差, 图12为在笛卡尔坐标系下RMS在各个扇区上的切片. 表9给出

图 12 (网络版彩图)3次测量RMS切片
Figure 12 (Color online) Slice of the measurement RMS distribution.

表 9 测量误差随口径大小的统计
Table 9 Repeated measurement error vs the range of the aperture

统计口径 (m)	测量误差RMS (mm)
65	0.132
63	0.121
60	0.113
58	0.109
56	0.106
53	0.099
50	0.093

了随着口径面大小不同统计得到的重复测量误差, 可以看到, 在全口径范围内重复测量精度可以达到 0.14 mm, 在 60 m 以内, 测量精度基本可以达到 0.1 mm, 这与理论推算一致.

3.4 效率测试验证

为了验证调整后主面在最佳仰角 53° 上的性能, 选择晴朗的天气, 在 Ka 波段进行实测验证, 测量频率 31.15 GHz, 带宽 20 MHz, 标准流量射电源采用 DR21, 流量模型 $S=26.70-5.62\lg(f_{\text{GHz}})$ ^[17], 评估天线效率的方法参考文献[18]. 为了避免高低俯仰主面重力变形因素导致的效率下降, 测量的俯仰范围限制在 45°–60° 以内. 同时为了避免天气因素导致的 Ka 大气差异和指向偏差, 采用了交替测量, 即在同一方位俯仰位置, 分别设置主面模型启用和关闭两种状态, 在每个状态上测量天线效率. 为了避免主面模型加载前后对指向误差带来一定影响, 在每个俯仰位置点测试时都进行了实时指向修正, 然后测量主面模型加载后的效率 η_1 , 和主面模型关闭时测得的效率 η_0 , 结果如图 13 所示, 可以看到最佳仰角 53° 上, 主面启动之前的效率约为 37%, 主动面启动后效率约为 56%, 改善比例为 1.5. 随着俯

仰的降低, 效率改善逐渐弱化, 这主要由于高低俯仰上主面重力变形所致. 理论上, 在工作频率 31.15 GHz 上, 当主面精度 0.58 mm 时, 效率预计为 36%, 当提升到 0.3 mm 时, 最佳俯仰角上效率为 57%(表 1), 实测效率比对结果如图 13 所示, 与理论一致. 而在俯仰 45° 以下, 60° 以上, 由于重力变形的缘故, 效率开始有所下降. 此外测量过程中, 测试误差也会有一定的贡献, 由于对指向进行了实时修正, 误差主要来源于 Ka 波段大气引起的功率起伏和指向残差, 由此导致的误差估计在 5%. 图 14 给出了主动面启动前后, 在俯仰 53° 附近, 天线方位扫描 DR21 得到的线性功率图, 在平基线处理后, 可以看到在主面启动后, 扫描信号功率约提高为原来的 1.5 倍. 采用短时交替开启和关闭主面模型, 功率数据采用方位扫描得到, 可以尽量弱化指向误差、大气起伏等因素导致的影响.

4 讨论与小结

本文主要报告了基于微波全息法对 TM65 m 射电

图 13 (网络版彩图)主动面启动前后效率比对
Figure 13 (Color online) Antenna efficiency before and after active surface model loaded.

图 14 主面模型启动前后方位扫描得到的线性功率
Figure 14 Power by azimuth sweeping on active surface model on and off.

望远镜在最佳俯仰角 53° 上开展的面形测量和调整情况, 并对口径分辨率、卷积窗函数以及副面偏移导致的口径面相位进行了仿真和实测. 结果表明, 当前65 m天线面精度在最佳俯仰角面形误差好于0.3 mm, 重复测量误差0.13 mm. 为了分离测量过程中的系统误差, 采用了注入校准信号的方法分离接收系统和环

境因素引起的相位误差. 最后采用交替开启和关闭主动面模型, 测量天线效率的改善情况, 在Ka频段上效率由37%提升到了56%, 验证了最佳俯仰角主面调整模型的有效性和准确性. 对于其他俯仰角度上通过主动面补偿重力变形得到的测量结果将在以后的相关论文进行报道.

参考文献

- Rochblatt D J. Systems Analysis for DSN Microwave Antenna Holography. TDA Progress Report, Jet Propulsion Laboratory, 1988. 42–96
- Morris D. Phase retrieval in the radio holography of reflector antennas and radio telescopes. *IEEE Trans Antennas Propag*, 1985, 33: 749–755
- Morris D, Baars J W M, Hein H, et al. Radio- holographic reflector measurement of the 30-m millimeter radio telescope at 22 GHz with a cosmic signal source. *Astron Astrophys*, 1988, 203: 399–406
- Morris D, Hein H, Steppe H, et al. Phase retrieval radio holography in the Fresnel region-tests on the 30 M telescope at 86 GHz. *Microwaves Antennas Propagat* lee Proce H, 1988, 135: 61–64
- Nikolic B, Richer J, Hills R E. Phase retrieval measurements of antenna surfaces using astronomical sources. In: *Proceedings of General Assembly of URSI. Maastricht*, 2002
- Baars J W M, Lucas R, Mangum J G, et al. Near-field radio holography of large reflector antennas. *IEEE Antenn Propag Mag*, 2007, 49: 24–41, arXiv: 0710.4244
- Han F, Lv J, Wu W D, et al. The first radio holography measurement for the 13.7 m telescope of Purple Mountain Observatory (in Chinese). *Acta Astron Sin*, 1994, 35: 209–214 [韩涛, 吕静, 吴文达, 等. 紫金山天文台13.7米射电望远镜天线表面精度的首次射电全息测量. *天文学报*, 1994, 35: 209–214]
- Yin X H, Xu Z C, Han F, et al. A new real-time holographic system for the surface diagnosis of the large reflector antennas (in Chinese). *Chin J Radio Sci*, 2000, 15: 229–231 [殷兴辉, 徐之材, 韩涛, 等. 大型天线表面精度实时检测. *电波科学学报*, 2000, 15: 229–231]
- Ruze J. Antenna tolerance theory—A review. *Proc IEEE*, 1966, 54: 633–640
- Rochblatt D J. A Microwave Holography Methodology for Diagnostics and Performance Improvement for Large Reflector Antennas. TDA Progress Report, Jet Propulsion Laboratory, 1992. 42–108
- Rahmat-Samii Y. Microwave holography of large reflector antennas—Simulation algorithms. *IEEE Trans Antennas Propag*, 1985, 33: 1194–1203
- Rochblatt D J, Rahmat-Samii Y. Effects of measurement errors on microwave antenna holography. *IEEE Trans Antennas Propag*, 1991, 39: 933–942
- Bryan J. Requirements for subreflector and feed positioning for ALMA antennas. Reprot, National Radio Astronomy Observatory, ALMA Memo, 2003. 479
- Wang J Q, Yu L F, Zhao R B, et al. Sub-reflector model depending on elevations and performance evaluation for TM65 m radio telescope (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2014, 44: 1232–1240 [王锦清, 虞林峰, 赵融冰, 等. TM65 m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]
- Wang J Q, Yu L F, Fan Q Y. Holography measurement for parabolic antenna and the results analysis (in Chinese). *Ann Shanghai Astron Observ Chin Acad Sci*, 2011, 1: 136–146 [王锦清, 虞林峰, 范庆元, 等. 抛物面天线微波全息测量及结果分析. *上海天文台年刊*, 2011, 1: 136–146]
- Wang J Q. Research on High Accuracy Calibration Method for Microwave Holographic Measurement and Key Technologies of Ka Band Receiving (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013. 46–58 [王锦清. 微波全息测量高精度校准方法及Ka频段接收关键技术研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大学, 2013. 46–58]
- Ulich B L. Millimeter-wavelength continuum calibration sources. *Astron J*, 1981, 86: 1619–1626
- Wang J Q, Zhao R B, Yu L F, et al. Antenna performance measurements at L, S, C, and X bands for the TM65 m radio telescope (in Chinese). *Acta Astron Sin*, 2015, 56: 278–294 [王锦清, 赵融冰, 虞林峰, 等. TM65 m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]

TM65 m radio telescope microwave holography

WANG JinQing^{1,2*}, ZUO XiuTing^{1,2}, MICHAEL Kesteven¹, ZHAO RongBing^{1,2},
YU LinFeng^{1,2}, JIANG YongBin^{1,2}, GOU Wei^{1,2}, JIANG YongChen^{1,2} & GUO Wen^{1,2}

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

² Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

Microwave holography is a valuable technique used in the diagnostics and adjustment of large antennas. A brief outline of the technique is given first. Then detail simulations for surface deviation and sub-reflector offsets solving method that applied on the TianMa 65 m are described. After several rounds of adjustments, a reflector surface accuracy 0.28 mm and repeated measurement error 0.13 mm were achieved for the TM65 antenna. At last the antenna efficiency on Ka band was measured at elevations between 45 and 60 degrees. The efficiency improved from 37% to 56% when the active surface model is loaded that is consistent with the theoretical predictions.

microwave holography, antenna efficiency, radio astronomy, surface deviation, measurement

PACS: 06.30.Bp, 07.87.+v, 07.05.Fb, 07.57.Hm

doi: [10.1360/SSPMA2016-00415](https://doi.org/10.1360/SSPMA2016-00415)