基于干涉全息法测量射电望远镜主面重力变形和副面位姿

王锦清^{1,2,3*}, 赵融冰^{1,2,3}, 虞林峰^{1,2,3}, 江永琛^{1,2,3}, 蒋甬斌^{1,2,3}, 付丽^{1,2,3}, 张娟^{1,2,3},
芮萍^{1,2,3}, 董健^{1,2,3}, 苟伟^{1,2,3}, 夏博^{1,2,3}, 沈志强^{1,2,3}, 刘庆会^{1,2,3}, 范庆元^{1,2,3}, 郑为民^{1,2,3}

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;

3. 上海市空间导航与定位技术重点实验室 上海 200030

*联系人, E-mail: jqwang@shao.ac.cn

收稿日期: 2019-04-10; 接受日期: 2019-05-06; 网络出版日期: 2019-08-29

国家重点研发计划(编号: 2018YFA0404702)、基于可变形副面的射电望远镜补偿算法与技术研究(编号: A030802)、风致大型卡氏天线静态和动态响应分析(编号: U1631114)和中国科学院关键技术人才项目资助

摘要 本文围绕天马65 m (TM65 m)射电望远镜主面重力变形和副面位姿展开实测研究. 论文先概述了主面测量的方法, 主要讨论了基于微波全息法的测量方法和天线扫描方法, 然后论述了采用Very Long Baseline Interferometer (VLBI)测量65 m主面各俯仰角的重力变形, 对测量误差进行了评估, 进而构建了重力模型, 并与仿真结果进行了比较, 两者变化趋势一致. 同时, 推导并仿真了主焦馈源、副面位姿偏移和口径面相位的解析关系, 然后基于该解析关系和VLBI测量得到的口径面相位数据, 并采用最小二乘法解算得了实际TM65 m副面位姿随俯仰的变化情况, 该测量结果在三维方向上与传统基于主动副面的幅度扫描法结果一致性强, 该方法为测量副面位姿提供了不同于传统法的可行途径.

关键词 射电望远镜, 重力变形, 副面, 模型, 微波全息

PACS: 06.30.Bp, 08.87.+v, 07.05.Fb, 07.57.Hm

1 概述

大型射电望远镜的重力变形历来是科技人员关注的问题, 主要涉及主面重力变形和副面支撑重力变形两个方面, 前者表现为主面精度随俯仰角变化, 后者表现为主副面的准直关系随俯仰角发生变化, 这些变

化均导致天线效率的下降. 当前, 在射电望远镜设计阶段主要采用有限元分析法, 可以仿真得到主副面的重力模型, 在建成验收阶段主要采用经纬仪、摄影法等光学手段对面形精度和主副面准直关系进行评估, 而主面重力模型的实测构建则比较困难, 一般只能在有限的几个俯仰位置进行光学方法测量, 然后进行内

引用格式: 王锦清, 赵融冰, 虞林峰, 等. 基于干涉全息法测量射电望远镜主面重力变形和副面位姿. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49: 109501
Wang J Q, Zhao R B, Yu L F, et al. Main reflector gravity deformation and sub-reflector position measurement for radio telescope based on interferometer (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2019, 49: 109501, doi: [10.1360/SSPMA-2019-0118](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2019-0118)

插处理.

为了测量大型射电望远镜的面形, 科技人员应用了经纬仪测量、摄影测量、微波全息测量等方法^[1,2]. 其中只有微波全息法是采用射电信号进行面形测量, 重力模型构建, 与上述工业测量法相比, 该方法有如下优势: (1) 可以借用现有的低噪声接收链路系统, 只要天气和观测时间允许, 均可开展测量工作; (2) 在天线全仰角位置进行测量, 增加模型的准确性; (3) 全局性测量, 把天线主面、副面、指向作为整体进行测量评估, 以天线效率性能作为评价指标. 这对于测量的可靠性、实用性以及低成本都是合理的选择.

采用微波全息法测量主面精度, 该测量方法具有精度高、速度快、测量成本低的优点^[3], 这一方法为国际上多个射电望远镜所采用^[4-6]. 在天马65 m望远镜(TM65 m)上测量^[7], 一个俯仰角度的变形测量时间约为30 min, 跟着一颗强射电源从升起落到, 即可以得到高低俯仰情况下主面的重力变形规律. 当然, 这种测量方法的实现基础是天线跟踪控制系统、微波接收链路都已经具备, 因此适合成熟台站以及常规检查中采用.

微波全息测量得到口径面相位分布, 该信息中还包含了副面位姿变化导致的口径面相位整体倾斜等变化规律, 通过仿真和实测我们分离了该信息, 并与基于主动副面的幅度扫描法结果进行了比较, 两者结果一致. 这为测量高低俯仰角度上的副面位姿提供了额外的方法, 这对于不具备主动副面的射电望远镜具有很重要的实际诊断意义, 因为当前国内外的大部分射电望远镜不具备主动副面, 因此无法采用幅度扫描法准确测量任意俯仰角上的副面的位姿变化, 而微波全息法则可以.

2 基于VLBI干涉全息扫描方法

为了开展各俯仰角上的面形快速测量, 进而构建重力模型, 让上海天马65 m和佘山25 m天线组成Very Long Baseline Interferometer (VLBI)干涉对, 两天线距离6 km左右, 由于25 m相对65 m而言其重力变形较小, 因此以25 m为参考天线, 以强射电源为观测源, 在几米口径分辨率上进行快速扫描, 在每5°左右间隔的俯仰角上进行面形测量成图, 最后建立主面重力模型. 在此测量过程中, 由于一次完整的测量需要半小时左右,

在此时间内射电源的俯仰变化在5°左右, 因此主面本身在变化, 如何检测这个变化量? 我们认为选择合适的扫描方式可以发现这个连续变化过程, 图1给出的6个扫描示例, 天线扫描始终采用辐射扫描方式, 每次穿越目标, 并且每次扫描角按固定方向旋转, 周而复始, 在解算成图过程中始终可以选取一组完整的扫描数据, 如图中的6个扫描即为一组完整的数据, 由于圆周对称, 两组数据的差异可以控制到只差一个扫描列(约1 min), 其余数据全部重叠, 而1 min左右的时间内射电源的俯仰变化是非常小的, 由此导致的重力变化差异也很小, 因此这种扫描方法可以探测到主面的连续变化过程, 在指向良好的情况下, 可以连续得到10°–85°范围内主面面形的变化过程, 这种扫描方式的另外一个优点是每两个扫描都可以得到指向偏差量, 从后处理中发现由此导致的面形差异, 也可以实时修正指向偏差. 然而, 采用该扫描方法时, 中心处和远离中心处位置上空间采样间隔不等, 因此对格点化带来了一定影响, 尤其在远离中心处的有效数据采样间隔大于一个波束时, 将引入失真, 如何解决这个问题? 目前我们认为可以通过选择适当的扫描数量和扫描范围角来避免、弱化这个问题. 如图2的等间隔扫描方式也可以被采用, 以验证采用强射电源进行全息测量的可行性, 因为这种扫描方式格点化较成熟, 并且我们已经有较好的实测经验^[7].

3 测量误差理论分析

观测采用3C84强射电源, 其角径很小, 在20毫角秒左右, 流量很强, 其上海地区的观测仰角范围可

图1 辐射扫描方式

Figure 1 Cross scan pattern.

图 2 (网络版彩图)等间隔扫描方式
Figure 2 (Color online) Raster scan pattern.

以达到 80° , 非常有利于测量射电望远镜高低俯仰上的重力变形. 65 m和25 m射电望远镜的距离约6 km, 其在8.4 GHz频段上的射电流量为28 Jy左右. 采用该射电源进行VLBI测量时, 其互相关信噪比可以表示如下^[8]:

$$\text{SNR} = S \cdot \frac{q\pi}{8k} D_1 D_2 \cdot \sqrt{\frac{\eta_1 \eta_2}{T_1 T_2}} \cdot \sqrt{2BT},$$

其中, S 为源在观测基线上的流量, 取27 Jy; q 为量化、相关损失, 这里假设0.5; k 为波尔兹曼常数 $1.3806505 \times 10^{-23}$; $\eta_1 \eta_2$ 为两天线效率, 分别假设为0.6和0.5; $D_1 D_2$ 为两天线口径, 分别为65 m和25 m; $T_1 T_2$ 为两天线系统

噪声温度, 分别为30和50 K; B 为观测带宽, 采用16 MHz; T 为积分时间, 采用1 s.

通过代入参数计算得到理论信噪比为54.1 dB (507), 在65 m天线上, 可以采用 $N=30$ 列扫描(口径分辨率: 2.1 m), 其测量精度误差可以通过信噪比进行评估^[3]: $0.082N \cdot \lambda / \text{SNR(O)} = 0.17 \text{ mm}$ (波长 $\lambda=3.6 \text{ cm}$).

4 天实测过程和结果分析

采用由TM65 m和SH25 m天线构成的VLBI干涉对, 见图3, 65 m天线采用辐射扫描法围绕3C84作扫描, 扫描的参数设置如下: 扫描列数30; 扫描范围 0.58° ; 扫描时间45 s; 扫描速率 $46.1''/\text{s}$; 扫描夹角 6° . 实时得到的自相关幅度、互相关幅度和相位见图4, 可以看到互相关幅度的动态范围可以达到50 dB以上, 与理论一致.

对上述收集的一组远场幅度和相位数据作数据校准处理, 校准点即为穿越源时的幅度和相位, 然后对两次穿越点之间的幅度和相位作线性内插和与原始数据作差处理, 在此过程中还需对校准点数据解卷绕处理, 避免相位整周期的跳动. 在获得校准数据后, 需要对该数据进行格点化处理, 之后通过逆傅里叶变换可以得到口径面幅度和相位^[9], 其中口径面相位即包含了面形误差和副面位姿变化导致的倾斜项, 通过最小二乘拟合可以分离出副面位姿, 并最终给出主面变形项. 通过测量一系列的口径面相位, 即可得到不同俯仰角

图 3 (网络版彩图)65 m和25 m射电望远镜构成的VLBI干涉
Figure 3 (Color online) Interferometer by 65 m and 25 m radio telescopes.

图 4 (网络版彩图)自相关幅度、互相关幅度和相位. (a) 65 m扫描幅度; (b) 25 m跟踪幅度; (c) 互相关幅度; (d)互相关相位
Figure 4 (Color online) Auto correlation and cross correlation amplitude and phase. (a) Amplitude of 65 m, (b) amplitude of 25 m; (c) cross amplitude; (d) cross phase.

度上的重力变形模型. 图5给出了高低俯仰位置上, 仿真面形和实测面形在相同尺度上的对比图, 可以看到仿真得到的面形变化趋势与实测一致, 但是实测的变形量大于仿真量, 大约是仿真的两倍. 在得到一系列实测口径面相位值后, 可以对每块面板的四角位移(即促动器布置的位置)采用最小二乘拟合, 得到调整模型, 当前采用了如下的方程拟合^[10]:

$$\Delta(i) = P(0)_i + P(1)_i \sin EL + P(2)_i \cos EL,$$

其中 EL 为每个俯仰的角度, Δ 为观测变化量, $P(0)$, $P(1)$ 和 $P(2)$ 为拟合参数, i 为促动器序号, 其在主面上的分布见图6. 最后我们给出了1104个面板交接处(促动器所在位置)位移模型的拟合误差情况, 见图7, 图中给出了调整量所在的圈数和在该圈上的节点序号, 可以看到随着促动器位置远离中心, 拟合的误差逐渐变大, 在靠近中心区域, 拟合误差基本在0.1 mm (RMS), 当促动器位置进入第12圈面板时, 模型拟合误差约0.2 mm (RMS), 这属于正常现象, 因为抛物面天线口径面能量分布的锥度因素, 越靠边沿能量越低, 测量误差也越大. 第12圈后还出现了异常数据, 见图7中的尖峰数据, 通过数据追踪我们发现这些位置都

位于第12圈、第13圈和第14圈的辐射梁的球面波辐射位置, 因为在这些位置, 由于副面撑腿的缘故, 天线收集到的能量分布不正常导致了这些区域面形测量异常^[9]. 因此对于正常区域的数据, 模型都能准确拟合.

5 基于全息口径面相位求解副面位姿

为了分离副面的位置偏移, 我们采用主焦、卡塞格林和格里高利副面偏移求解方法^[11], 表1给出了各种偏移量计算方法, 表中 ΔX , ΔY , ΔZ 为口径面上各点相位值, λ 是工作波长, θ 是主面一点与主焦点连线和光轴的夹角, ϕ 对应这点在口径平面内的转角(以水平线为参考), θ_f 为副面反射光线和光轴夹角. 表1给出了3种天线结构口径面相位和位置偏移的关系.

这里以65 m口径天线为例, 仿真频率: 22.3 GHz, 图8给出了主焦馈源轴向和横向平移后得到的口径面相位情况, 图9则给出了卡焦馈源轴向和横向平移后导致的口径面相位情况, 图10和11分别给出了副面平移和转角导致的口径面相位变化规律. 通过10 mm平移

和 1° 副面转角分别仿真, 可以得到如下的结论: 副面转角引起的相位变化最剧烈; 然后依次是: 主焦横向平移、副面横向平移、馈源横向平移、副面轴向平移、馈源轴向平移; 在相同的口径面相位偏移情况下, 推算出的副面偏移比主焦更大些.

依据表1的参数关系, 对上述各个俯仰角上的全息测量得到的口径面相位数据进行最小二乘拟合, 得到在每个俯仰角上副面的位姿信息, 见图12, 同时我们给出了采用传统的基于主动副面步进的角度扫描

法^[12]得到的位姿曲线, 可以看到两者在聚焦的Z方向和重力Y方向, 两种方法一致性很好, 在高低俯仰角上差异略大, 这主要是因为低俯仰角上, 由于地面噪声干扰等因素导致测量误差较大, 而在 70° 以上高俯仰处, 由于方位扫描速度很大, 导致两种测量方法的测量误差均加大, 因此一致性变差了. 这一方法的成功实施, 为日后检测固定式副面的大型射电望远镜聚焦情况, 即在高低俯仰上的副面或馈源的偏移情况提供了射电法实测手段.

图 5 (网络版彩图)各俯仰角上(最左侧数字显示)面形变化仿真(左图)和实测(右图), 彩尺单位: mm

Figure 5 (Color online) Simulation (left) and test (right) of the reflector's deformation at different elevations.

图 6 (网络版彩图)促动器在天线面上的分布序号, 每圈按逆时针顺序排列
Figure 6 (Color online) The sequence of the actuators is in clockwise for every ring.

图 7 (网络版彩图)面板交接处(促动器位置)位移模型的拟合误差, 上图对12圈以外的促动器调整量进行了展开
Figure 7 (Color online) The error of the models for each actuator's position. The adjustments of the actuators outside ring 12th are shown in up picture.

表 1 馈源和副面平移与口径面相位的关系

Table 1 The relationship between the offset of feed (sub-reflector) and aperture phase

平移模式	主焦模式	卡塞格林或格里高利模式
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 8 (网络版彩图)主焦馈源轴向平移10 mm (a); 横向平移10 mm (b)
Figure 8 (Color online) Primary focus mode feed offset in axis 10 mm (a) and in lateral 10 mm (b).

图 9 (网络版彩图)卡焦馈源轴向平移10 mm (a); 横向平移10 mm (b)
Figure 9 (Color online) Cassegrain focus mode feed offset in axis 10 mm (a) and in lateral 10 mm (b).

图 10 (网络版彩图)副面轴向平移10 mm (a); 横向平移10 mm (b)
Figure 10 (Color online) Cassegrain sub-reflector offset in axis 10 mm (a) and in lateral 10 mm (b).

图 11 (网络版彩图)副面转角 1° (a), 0.1° (b)
Figure 11 (Color online) Cassegrain sub-reflector rotation in 1° (a) and 0.1° (b).

图 12 (网络版彩图)采用口径面相位得到的副面位置 and 传统幅度测量法得到的副面位置模型比较

Figure 12 (Color online) Model of the sub-reflector resolved by amplitude and aperture phase.

6 讨论与总结

本文主要论述了基于 VLBI 的微波全息法测量大型射电望远镜的重力变形和副面位姿。以强射电源为参考信号, 采用了辐射扫描法可以获得远场二维幅度和相位方向图, 并反演得到各个俯仰角的口径面

相位, 对主面位置的位移量进行模型拟合提取, 最终得到了描述重力变形规律的方程参数。在获得口径面相位后用最小二乘法分离了副面位姿信息并与传统方法比较, 两者一致度高。该方法为检测主面重力变形和副面位姿变化提供了不同于传统手段的额外方法。

参考文献

- 1 Serra G, Bolli P, Busonera G, et al. Microwave holography system for the sardinia radio telescope. *Proc SPIE*, 2012, 8444: 84445W
- 2 Li Z C, Li G Y, Wu X P. Review of accuracy measuring technology of antenna's surface (in Chinese). *Bull Survey Mapping*, 2003, 6: 17–18 [李宗春, 李广云, 吴晓平. 天线反射面精度测量技术述评. *测绘通报*, 2003, 6: 17–18]
- 3 Rochblatt D J. Systems Analysis for DSN Microwave Antenna Holography. TDA Progress Report 42-96, National Aeronautics and Space Administration. 1988
- 4 Rochblatt D J, Rahmat-Samii Y. Effects of measurement errors on microwave antenna holography. *IEEE Trans Anten Propag*, 1991, 39: 933–942
- 5 Rahmat-Samii Y. Surface diagnosis of large reflector antennas using microwave holographic metrology: An iterative approach. *Radio Sci*, 1984, 19: 1205–1217
- 6 Baars J W M, Lucas R, Mangum J G, et al. Near-field radio holography of large reflector antennas. *IEEE Antennas Propag Mag*, 2007, 49: 24–41, arXiv: 0710.4244
- 7 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 [王锦清, 左秀婷, Michael K, 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]
- 8 Li J L, Qian Z H. VLBI Technique for Deep Space Exploration (in Chinese). Beijing: Science Press, 2012 [李金岭, 钱志瀚. 甚长基线干涉测量技术在深空探测中的应用. 北京: 科学出版社, 2012]
- 9 Wang J Q. Research on High Accuracy Calibration Method for Microwave Holographic Measurement and Key Technologies of Ka Band Receiving (in Chinese). Dissertation for Dcotoral Degree. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013 [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]
- 10 Imbriale W A, Britcliffe M J, Brenner M. Gravity Deformation Measurement of NASA's Deep Space Network 70-meter Reflector Antennas. IPN Progress Report 42-147. National Aeronautics and Space Administration, 2001
- 11 Butler B J. Requirements for Subreflector and Feed Positioning for ALMA Antennas. Technical Report, ALMA Memo No 479. 2003
- 12 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]

Main reflector gravity deformation and sub-reflector position measurement for radio telescope based on interferometer

WANG JinQing^{1,2,3*}, ZHAO RongBing^{1,2,3}, YU LinFeng^{1,2,3}, JIANG YongChen^{1,2,3},
JIANG YongBin^{1,2,3}, FU Li^{1,2,3}, ZHANG Juan^{1,2,3}, RUI Ping^{1,2,3}, DONG Jian^{1,2,3},
GOU Wei^{1,2,3}, XIA Bo^{1,2,3}, SHEN ZhiQiang^{1,2,3}, LIU QingHui^{1,2,3},
FAN QinYuan^{1,2,3} & ZHENG WeiMin^{1,2,3}

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

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

³ Shanghai Key Laboratory of Space Navigation and Position Techniques, Shanghai 200030, China

This paper focuses on the measurement of the main reflector gravity deformation and sub-reflector position change on Tianma 65 m (TM65 m) radio telescope. Firstly the paper summarizes the methods of principal measurement. Microwave holography and cross scan pattern are discussed. Then the gravity deformation of the main reflector over the entire elevation measured by VLBI method is described. The measurement accuracy is also estimated. At last, the gravity model is constructed and compared with the simulation. They agree with each other. The formulas along with the simulation give a description between the offsets of feed, sub-reflector and the aperture phase. The sub-reflector position of TM65 m is obtained by the least square method that applied on the aperture phase and the formulas. The sub-reflector positions measured are consistent with that of the traditional amplitude method in X , Y and Z directions. This method provides a different way to measure the position model of the sub-reflector.

radio telescope, gravity deformation, sub-reflector, model, microwave holography

PACS: 06.30.Bp, 08.87.+v, 07.05.Fb, 07.57.Hm

doi: [10.1360/SSPMA-2019-0118](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2019-0118)