基于双波束的天马望远镜主反射面面形快速测量

董健^{1,2*}, 刘庆会^{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 210023

*联系人, 董健, E-mail: triumphdj@126.com; 刘庆会, E-mail: liuqh@shao.ac.cn

收稿日期: 2020-04-01; 接受日期: 2020-06-30; 网络出版日期: 2020-12-16

国家重点研发计划(编号: 2018YFA0404702)和国家自然科学基金(编号: 11503070, U1631119, 11590780, 11590781, 11590784)资助项目

摘要 天马望远镜的主反射面受重力、热等因素的影响会发生大尺度形变. 主动反射面是补偿大尺度形变, 保证望远镜电性能最有效的手段. 对主反射面形变的快速测量是主动反射面高效率工作的核心问题. 目前的测量耗时约为20 min, 耗时较多. 本文提出了一种基于双波束的相位恢复法, 此方法基于双波束的天线方向图具有相似性和重叠性的特点, 在保证测量信噪比的同时, 通过减少扫描区域来缩短测量时间. 与单波束测量相比, 可将测量时间缩短1/2以上, 提高了观测时间利用率. 通过测量两个波束的一组部分聚焦和两组部分离焦天线方向图, 再经过最小二乘数据处理得到大尺度形变. 在天马望远镜对重力和热形变的实测表明, 本方法可在8 min内测量得到不同情况下的主反射面面形, 测量精度可达55 μm . 此方法有效地改善了望远镜波束, 提高了望远镜效率, 可应用于其他具有多波束接收系统的大型射电望远镜.

关键词 天马望远镜, 主动反射面, 多波束, 快速测量, 重力和热变形

PACS: 95.55.Jz, 61.05.jp, 62.20.F-, 07.57.Kp, 06.30.Bp

1 引言

大口径射电望远镜的主反射面受重力、热等因素的影响会发生大尺度形变, 从而导致望远镜在高频段的性能降低. 为了提高望远镜在高频段的观测效率, 美国GBT (Green Bank Telescope)、意大利SRT (Sardinia Radio Telescope)、墨西哥LMT (Large Millimeter Telescope)、天马望远镜等先进的大口径射电望远镜均采用可调节的主动反射面以修正大尺度形变^[1-5]. 其中大尺度形变的高精度、快速测量是主动反射面高

效率工作的核心问题.

目前, 主反射面大尺度形变的测量均采用相位恢复法^[6]. 相位恢复法利用射电源作为信号源, 通过测量一幅聚焦和两幅离焦天线方向图, 再通过数据处理即可得到主反射面形变. Nikolic等人^[7,8]在GBT望远镜上利用双波束差分的方法, 耗时约25 min, 获得了大尺度形变. Dong等人^[9,10]在天马望远镜上利用单波束, 耗时约18 min, 测量大尺度形变, 成功获得了天马望远镜主反射面的重力形变模型和热形变. 目前, 相位恢复法耗时较多是由于: 使用单波束或双波束差分测量天线方

引用格式: 董健, 刘庆会. 基于双波束的天马望远镜主反射面面形快速测量. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 029503

Dong J, Liu Q H. Fast measurement of primary reflector for the Tianma telescope based on two beams (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2021, 51: 029503, doi: 10.1360/SSPMA-2020-0109

向图时, 为了覆盖完整的波束需要扫描较大的区域, 但在扫描时又需要维持较慢的扫描速度以保证测量数据的信噪比. 由于主反射面形变随着时间在变化, 测量结果只能反映测量前后一段时间内的平均形变, 耗时较多会降低测量精度, 也会占用较多的观测时间. 因此缩短测量时间对于提高观测效率具有重要意义.

本文提出一种基于双波束的面形快速测量方法. 此方法基于双波束的天线方向图具有相似性和重叠性的特点, 在保证测量信噪比的同时, 通过减少扫描区域来缩短测量时间. 在天马望远镜的实测表明, 本方法对重力 and 热导致的大尺度形变测量具有有效性.

2 双波束相位恢复全息测量

2.1 测量原理

对于射电望远镜来说, 双波束的馈源位于焦平面上, 间隔较近. 天马望远镜Q波段的双馈源间隔70 mm, 相应地, 望远镜两个波束的指向间隔约为4个半功率波束宽度. 根据某一个实测的主反射面形变计算得到的两个波束的聚焦和离焦天线方向图, 如图1所示, 可见两个波束的天线方向图具有相似性和重叠性的特点. 同时, 我们在天马望远镜也进行了实测, 验证了此结论. 因此通过沿着俯仰方向扫描较小的区域(红色线之间区域所示), 可同时测量得到两个波束的部分天线方向图, 得到完整的波束信息.

具体来说, 射电望远镜的主反射面大尺度形变可采用低阶Zernike多项式来表示:

$$\phi(r, \psi) = \sum_{n=1}^{n=\max} \sum_{l=-n, -n+2, \dots, n} a_{n,l} Z_{n,l}(r, \psi), \quad (1)$$

其中 $Z_{n,l}(r, \psi)$ 为Zernike多项式, r 为口径面上的点与中心的距离, ψ 为极坐标的极角, $a_{n,l}$ 为Zernike多项式系数, 为求解的量. 离焦通过沿着光轴方向移动副反射面来实现. 离焦时的口径面相位差采用式(2)计算^[11,12].

$$\delta(r, \psi, df, dz) = dz \times (\cos\theta_r + \cos\psi_r) - df \times \sin\theta_r \times \cos(\psi - \psi_0), \quad (2)$$

其中 dz 为副反射面轴向位移(向远离主面方向位移为正), θ_r 为卡氏焦点到副反射面的光线与光轴的夹角, ψ_r 为副反射面到主面的光线与光轴的夹角, df 为馈源相对于卡氏焦点的径向位移, ψ_0 为此位移与坐标轴的夹角.

口径面照明的归一化幅度采用 $I(r)$ 表示, 其计算公式为

$$I(r) = \exp\left[-\frac{\sigma}{20} \times \ln 10 \times \frac{\theta_r^2}{\theta_{r\max}^2}\right], \quad (3)$$

其中 θ_m , σ 是常数, 分别为 $\theta_{r\max}$ 最大值、以dB为单位的边缘锥化度.

天线的口径场与远场的关系如下式所示:

$$f(u, v) = \iint_s I_m(r) \exp\left\{-j[\phi(r, \psi) + \delta(r, \psi, df, dz)] \frac{2\pi}{\lambda}\right\} \times \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda}(ux + vy)\right) \frac{dx dy}{\lambda}, \quad (4)$$

图1 (网络版彩图)根据某一个实测的主反射面形变计算得到的两个波束的聚焦和离焦天线方向图. (a)–(c) 聚焦、7 mm离焦和–7 mm离焦的天线方向图. 其中绿色、蓝色分别代表波束1和波束2. 望远镜沿着俯仰方向扫描较小的红色线之间的区域, 即可同时测量得到两个波束的部分天线方向图

Figure 1 (Color online) The calculated in-focus and defocus beams based on a measured reflector deformation. (a)–(c) The in-focus beams, 7 mm de-focus beams, and –7 mm defocus beams respectively. Beam 1 is shown in green, while beam 2 is shown in blue. When the telescope scans along the elevation direction in a small area limited by the two red lines, the parts of patterns of two beams can be measured simultaneously.

其中 I_m 为口径场幅度、 λ 为测量波长. 天线方向图为 $T(u, v)$:

$$T(u, v) = |f(u, v)|^2. \quad (5)$$

测量得到的双波束天线方向图集合为 $\{O_k^t(u, v), t = 1, 2, 3, k = 1, 2\}$, t 表示测量的聚焦和离焦天线方向图序号, k 表示对应的两个波束序号. 对 $O_k^t(u, v)$ 进行处理, 求解系数 $a_{n,t}$. 数据处理算法如下:

(1) 网格化口径面, 采样间隔为 $\frac{D}{N} \times 3$, 其中 D 为望远镜直径, N 为格点数(建议选取数值为 64, 128 或 192, 与扫描范围有关). 然后根据式(2)和(3), 计算聚焦和离焦条件下的每个格点的相位差和口径面照明.

(2) 设置 Zernike 多项式系数为 5 阶. 设置变量 $a_{n,t}$, I_{m1} 和 I_{m2} (其中 I_{m1} , I_{m2} 分别为波束 1、波束 2 的口径场幅度)的初值. 设置最小二乘拟合函数的门限值.

(3) 采用式(4)和(5), 计算得到两个波束的聚焦和离焦天线方向图集合为 $C_k^t(u, v)$.

(4) 从文件中读取观测数据 $O_k^t(u, v)$. 根据 $O_k^t(u, v)$ 的位置值, 对 $C_k^t(u, v)$ 进行高斯加权插值处理. 具体选取 $C_k^t(u, v)$ 中对应位置周围的 9 个相素值, 根据二维高斯函数进行加权, 得到 $Cgau_k^t(u, v)$, 并计算 $O_k^t(u, v)$ 与 $Cgau_k^t(u, v)$ 差值的均方根.

(5) 对此均方根采用最小二乘拟合函数拟合, 达到门限值时输出 $a_{n,t}$, I_{m1} 和 I_{m2} , 否则更新 $a_{n,t}$, I_{m1} 和 I_{m2} , 并跳转到式(3).

2.2 观测过程

双波束沿着方位方向排列, 沿着俯仰方向扫描可同时测量得到两个波束的天线方向图. 具体来说, 共需测量 3 幅天线方向图, 其中一幅为聚焦, 另两幅为离焦天线方向图. 其中离焦通过沿着轴向移动副反射面 $\pm 6 \text{ mm}$ 和 $\pm 7 \text{ mm}$ 来实现. 选择强流量射电源, 在 40 GHz 频率上进行观测, 观测带宽为 500 MHz. 沿着俯仰方向进行 OTF (On-The-Fly) 扫描, 数据采集终端每 0.3 s 采集一次数据. 每次扫描由 9 列构成, 每列长度为 140", 列间隔为 12" (不大于波束宽度的 1/2), 扫描速度为 25"/s, 其中 5 s 用于望远镜的转弯. 因此, 每幅图的扫描时间约为 2.3 min. 三幅图总耗时约为 8 min. 观测完成后对每

个波束的天线方向图进行预处理, 包括合并天线和终端的数据, 沿着俯仰方向移除基线等^[13,14]. 典型的双波束观测数据如图 2 所示, 而单波束观测数据如图 3 所示, 可以看出单波束观测时需要扫描较大的区域以覆盖完整的波束, 导致观测时间较长.

3 实验测量和分析

首先, 进行重力形变测量. 在晴朗的夜晚, 采用射电源 3C84, 利用双波束测量 72° 仰角的重力形变. 测量结果如图 4(a) 所示, 按照式(6)计算, 照明加权 RMS 为 420 μm . 将测量结果应用于主动面, 再进行测量, 得到的残余形变如图 4(b) 所示, 照明加权 RMS 为 80 μm .

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1,2,\dots,m} \Delta n_i^2 I_i^2}{\sum_{i=1,2,\dots,m} I_i^2}}, \quad (6)$$

其中, Δn_i 为第 i 点的法向误差, I_i 为该点的口径面照明. 由于两次测量的误差为独立分布的, 因此测量误差为 $80/\sqrt{2} = 55 \mu\text{m}$. 同时我们比较了应用测量结果前后的波束, 如图 5 所示. 波束有明显的改善, 旁瓣消失, 效率提升 60%. 由于重力形变具有可重复性, 我们将本次测量结果与前期采用单波束测量的结果进行比较^[9], 两次测量结果一致. 但是采用双波束的测量时间与采用单波束的测量时间相比, 缩短了 1/2 以上. 可见采用双波束测量可显著提高观测效率.

接着, 我们在白天进行测量, 采用射电源为 3C84, 观测时望远镜和太阳之间的方位夹角为 197°. 测量结果如图 6(a) 所示, 照明加权 RMS 为 479 μm . 通过主动面系统修正后, 再进行测量, 得到的残余形变减小为 136 μm , 如图 6(b) 所示. 应用测量结果前后的波束对比如图 7 所示, 效率提升 65%, 旁瓣消失, 波束有明显改善. 可见本方法可有效测量热形变, 但是热变形与重力形变不同, 不具有可重复性, 因此修正后的形变残余量略大. 从测量结果可知, 当望远镜背架被太阳照射时的形变量较大, 与重力形变相当. 因此在白天进行高频观测时, 需避免望远镜背架被太阳照射. 如果不可避免, 则需要修正热变形, 以保持望远镜的性能. 与采用单波束的测量相比, 测量时间缩短 1/2 以上, 修正后的形变残余量也有所减小^[10].

图 2 (网络版彩图)上方为在40 GHz的观测天线方向图, 下方为根据5阶Zernike系数拟合得到的天线方向图. (a)–(c) 测量的聚焦、7 mm离焦和–7 mm离焦的天线方向图. 其中绿色、蓝色分别代表波束1和波束2. (d)–(f)为由数据处理算法拟合得到的波束

Figure 2 (Color online) The observed antenna patterns of 40 GHz are shown in top row. The fitting antenna patterns using Zernike polynomials up to fifth order are shown in bottom row. (a)–(c) The in-focus beams, 7 mm de-focus beams, and –7 mm defocus beams, respectively. Beam 1 is shown in green, while beam 2 is shown in blue. (d)–(f) The fitting patterns using the data reduction algorithm.

图 3 (网络版彩图)上方为单波束观测时在40 GHz的天线方向图, 下方为根据5阶Zernike系数拟合得到的天线方向图. (a)–(c) 测量的聚焦、7 mm离焦和–7 mm离焦的天线方向图. (d)–(f) 由数据处理算法拟合得到的对应波束

Figure 3 (Color online) The antenna patterns of 40 GHz with the single beam observation are shown in top row. The fitting antenna patterns using Zernike polynomials up to fifth order are shown in bottom row. (a)–(c) The in-focus beams, 7 mm de-focus beams, and –7 mm defocus beams, respectively. (d)–(f) The fitting patterns using the data reduction algorithm.

图 4 (网络版彩图)对重力形变测量的闭环检测. (a) 72° 仰角的重力形变测量结果, 照明加权RMS为 $420\ \mu\text{m}$. (b) 采用形变测量结果的形变残差, 照明加权RMS减小到 $80\ \mu\text{m}$

Figure 4 (Color online) Closure check of gravitational deformation measurement. (a) The measurement result of gravitational deformations at 72° . The illumination-weighted RMS was $420\ \mu\text{m}$. (b) The residual deformation after applying the deformation adjustment. The illumination-weighted RMS was reduced to $80\ \mu\text{m}$.

图 5 (网络版彩图)对 72° 仰角重力形变修正前后的波束. (a) 重力形变修正前的波束; (b) 重力形变修正后的波束

Figure 5 (Color online) The beam shape before and after applying the corrections of gravitational deformations at 72° . (a) The beam shape before applying the corrections of gravitational deformations. (b) The beam shape after applying the corrections of gravitational deformations.

图 6 (网络版彩图)热形变测量的闭环检测. (a) 主反射面被太阳加热时的温度形变测量结果, 照明加权RMS为 $479\ \mu\text{m}$. (b) 采用形变调整后的形变残差, 照明加权RMS减小到 $136\ \mu\text{m}$

Figure 6 (Color online) Closure check of thermal deformation measurement. (a) The measurement result of thermal deformations when the primary reflector was heated by the sun. The illumination-weighted RMS was $479\ \mu\text{m}$. (b) The residual deformation after applying the deformation adjustment. The illumination-weighted RMS was reduced to $136\ \mu\text{m}$.

图 7 (网络版彩图)主反射面被太阳加热时,热形变修正前后的波束. (a) 热形变修正前的波束; (b) 热形变修正后的波束

Figure 7 (Color online) The beam shape before and after applying the corrections of thermal deformations when the primary reflector heated by the sun. (a) The beam shape before applying the corrections of thermal deformations. (b) The beam shape after applying the corrections of thermal deformations.

4 结论

本文提出一种基于双波束的大型射电望远镜主反射面形变的快速测量方法. 此方法基于相位恢复全息测量原理, 结合双波束的天线方向图具有相似性和重叠性的特点, 在保证测量信噪比的同时, 通过减少扫描区域来缩短测量时间. 与单波束测量相比, 可将测量时间缩短1/2以上, 显著提高了观测效率. 在天马望

远镜对重力和热形变的实测表明, 本方法可在8 min内测量得到典型情况下的各种主反射面面形, 测量精度可达55 μm , 有效地改善了天线波束, 提高了天线效率. 此方法通过扩展后, 可应用于其他具有三波束、四波束等接收系统的大型射电望远镜, 可进一步缩短测量时间. 本方法可在大型射电望远镜面型测量方面具有广泛的应用前景.

参考文献

- 1 Prestage R M. The green bank telescope. In: *Proceedings of Ground-based and Airborne Telescopes*. New York: SPIE, 2006. 626712
- 2 Bolli P, Orlati A, Stringhetti L, et al. Sardinia radio telescope: General description, technical commissioning and first light. *J Astron Instrum*, 2015, 04: 1550008, arXiv: [1603.06134](https://arxiv.org/abs/1603.06134)
- 3 Smith D R, Souccar K, Magaña C A, et al. Performance testing of the LMT/GTM primary surface actuators. In: *Proceedings of Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation*. New York: SPIE, 2014. 91512C
- 4 Li J, Shen Z Q, Wang J, et al. TMRT observations of carbon-chain molecules in Serpens South 1a. *Astrophys J*, 2016, 824: 136, arXiv: [1604.06795](https://arxiv.org/abs/1604.06795)
- 5 Greve A, Kramer C, Wild W. The beam pattern of the IRAM 30 m telescopes. *Astron Astrophys Suppl Ser*, 1998, 133: 271–284
- 6 Morris D. Phase retrieval in the radio holography of reflector antennas and radio telescopes. *IEEE Trans Antennas Propag*, 1985, 33: 749–755
- 7 Nikolic B, Hills R E, Richer J S. Measurement of antenna surfaces from in- and out-of-focus beam maps using astronomical sources. *Astron Astrophys*, 2007, 465: 679–683
- 8 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
- 9 Dong J, Zhong W Y, Wang J Q, et al. Correcting gravitational deformation at the Tianma radio telescope. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2018, 66: 2044–2048
- 10 Dong J, Fu L, Liu Q, et al. Measuring and analyzing thermal deformations of the primary reflector of the Tianma radio telescope. *Exp Astron*, 2018, 45: 397–410
- 11 Butler B J. Requirements for subreflector and feed positioning for ALMA antennas. 2003-12-09. Available: <http://www.alma.nrao.edu/memos/html-memos/alma479/memo479.pdf>

- 12 Cheng J Q. Principle and Design of Astronomical Telescope (in Chinese). Nanjing: Nanjing University Press, 2020. 328 [程景全. 天文望远镜原理和设计. 南京: 南京大学出版社, 2020. 328]
- 13 Dong J, Mufakharov T, Liu Q H, et al. Continuum observing system of the Tianma radio telescope (in Chinese). Prog Astron, 2019, 34: 203–209 [董健, Mufakharov T, 刘庆会, 等. 天马望远镜连续谱观测系统. 天文学进展, 2019, 34: 203–209]
- 14 Sun J X, Lu D R, Yang J, et al. Spectral line on-the-fly observing system of the Delingha 13.7 m telescope (in Chinese). Acta Astron Sin, 2018, 59: 26–37 [孙继先, 逯登荣, 杨戟, 等. 德令哈13.7 m望远镜谱线OTF观测系统. 天文学报, 2018, 59: 26–37]

Fast measurement of primary reflector for the Tianma telescope based on two beams

DONG Jian^{1,2*} & LIU QingHui^{1,2*}

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

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

Primary reflector of a large radio telescope deforms considerably due to gravitational, thermal, and other effects. An active surface system alleviates these large-scale deformations and improves the electrical performance of the telescope. The fast reflector measurement is the major challenge for active-systems to work efficiently. Currently, the measurement takes approximately 20 min, which is a substantial amount of time. A phase-retrieval holography method based on two beams is proposed. The method employs the principle of overlap and similarity of the two beams and reduces the scanning area to shorten the observation time. Moreover, this method maintains the signal-to-noise ratio of the measured data. The time is reduced by half when compared with the single beam observation. The maximum time required for each measurement is below 8 min, and the achieved accuracy is approximately 55 μm . We performed several measurements to ensure the accuracy of the proposed method at the Tianma telescope. The proposed method successfully corrected gravitational and thermal deformations. Furthermore, it improved the aperture efficiency. We recommend that the proposed method can be used in other large radio telescopes that have multibeam systems.

Tianma telescope, active surface, multibeam, fast measurement, gravitational and thermal deformations

PACS: 95.55.Jz, 61.05.jp, 62.20.F-, 07.57.Kp, 06.30.Bp

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0109](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0109)