

基于多波束相位恢复的射电望远镜主反射面 动态形变的快速测量

董健, 许志强, 孙云霞, 刘庆会

中国科学院上海天文台, 上海 200030

摘要 为快速测量射电望远镜主反射面的动态形变, 提高高频观测效率, 利用多波束天线方向图具有相似性和重叠性的特征, 基于相位恢复法提出了一种快速测量方法。首先将各波束的部分聚焦和离焦天线方向图减去其相对于中心位置的指向偏差, 然后拼接为中心波束的完整聚焦和离焦天线方向图; 接着采用 Levenberg-Marquardt 算法最小化该拼接天线方向图和理论天线方向图的残差, 计算出反映主反射面动态形变成分的低阶 Zernike 多项式系数, 从而获得主反射面的动态形变。基于 7 波束 Q 波段的数值仿真实验表明, 该方法能够在 5 min 内以 $55 \mu\text{m}$ 的测量精度测得射电望远镜主反射面的动态形变, 且具有较好的抗噪声、抗幅度波动等优点, 可应用于 90 GHz 以下的天文观测。

关键词 测量; 射电望远镜; 多波束; 相位恢复法; 动态形变

中图分类号 O436; P111.44

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0612005

Fast Measurement of Primary Reflector Dynamic Deformation of Radio Telescope Based on Multibeam and Phase Retrieval

Dong Jian, Xu Zhiqiang, Sun Yunxia, Liu Qinghui

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

Abstract A fast method to measure the primary surface dynamic deformation of a radio telescope for improving high-frequency observation efficiency is proposed based on the similarity and overlap of the multibeam patterns, and the phase retrieval method. Firstly, the pointing offsets relative to the center are subtracted from a part of in-focus and defocus patterns of each beam, and these patterns are spliced to construct a group of complete in-focus and defocus patterns of the center beam. Secondly, the sum of squared residuals by which the splicing patterns differ from the theoretical ones is minimized based on Levenberg-Marquardt algorithm, to calculate the coefficients of Zernike polynomials, and the primary reflector dynamic deformation is retrieved. The numerical simulation experiment based on the 7-beam Q-band shows that the proposed method can retrieve the primary reflector dynamic deformation of the radio telescope in 5 min with the measurement accuracy of $55 \mu\text{m}$, with the advantages of anti-noise and anti-fluctuation, and can be applied for the astronomical observations below 90 GHz.

Key words measurement; radio telescope; multibeam; phase retrieval; dynamic deformation

OCIS codes 120.6660; 090.2910; 110.6770; 200.4560

1 引 言

受多种因素的影响, 大口径射电望远镜的主反射面会发生形变, 影响望远镜的性能。主反射面的形变主要分为 2 类: 由面板制造和装配误差等时不变因素造成的静态形变以及由重力和温度

等时变因素引起的动态形变。静态形变通过人工调节即可修正; 动态形变在观测中发生变化, 无法人工调节, 而且动态形变的形变量也较大, 会极大地降低望远镜的高频观测效率。为此, 美国绿岸射电望远镜 (GBT)^[1]、意大利撒丁岛射电望远镜 (SRT)^[2]、墨西哥大型毫米波望远镜 (LMT)^[3]、

收稿日期: 2018-01-05; **收到修改稿日期:** 2018-02-07

基金项目: 国家自然科学基金(11503070, U1631119, 11711530204)、中国科学院青年创新促进会(2018305)

作者简介: 董健(1982—), 男, 博士, 高级工程师, 硕士生导师, 主要从事射电望远镜主反射面相关技术方面的研究。

E-mail: dongjian@shao.ac.cn

上海天马望远镜^[4]等先进的大口径射电望远镜均采用可自动调节的主动反射面,以修正动态形变。测量动态形变是主反射面高效率工作的核心问题。

相位恢复法是一种通过测量光场强度来恢复入射相位信息的技术,在电子显微成像、相位测量、波前分析和图像加密等领域都有着广泛的应用^[5]。针对射电望远镜,国内外学者提出了一系列基于相位恢复法的动态形变测量方法。例如,Morris^[6]和韩溥^[7]分别在毫米波段射电天文研究所(IRAM)30 m望远镜和德令哈13.7 m望远镜上利用单波束对动态形变进行了测量,耗时约为3 h。Nikolic等^[8-9]和Bach等^[10]分别在GBT和Effelsberg望远镜上利用双波束差分方法获得了动态形变,耗时约为20 min。本课题组在天马望远镜上利用Q波段的单波束测得了动态形变,耗时约为15 min。目前,动态形变的测量耗时较长,从15 min到3 h不等。这主要是因为采用单波束或双波束测量天线方向图时,为确保覆盖完整的波束,需要扫描较大区域,但同时又需要保持较慢的扫描速度以保证测量数据的信噪比,从而导致测量耗时较长。由于动态形变随时间变化,测量结果只能反映测量前后一段时间内的平均形变,且耗时较长易导致测量精度降低,进而影响主反射面的工作效率。

随着多波束技术的快速发展,为提高天文观测成图效率,各大望远镜已配备或计划配备多波束系统,例如,GBT(K波段7波束、W波段64波束)和SRT^[11](K波段7波束)等。在扫描速度不变的条件下,采用多波束能够缩小望远镜的扫描区域,从而缩短天线方向图的测量时间,实现快速测量。目前各大望远镜生产商正在研究如何将多波束应用于动态形变的测量中。例如,GBT在W波段64波束的动态形变测量实验中,通过加权法来合成天线方向图,再通过相位恢复得到动态形变,将测量时间缩短至15 min^[12]。本研究结合多波束和相位恢复法,采用波束天线方向图拼接法提出了一种动态形变快速测量方法,可在5 min内测得动态形变。该方法首先将较小区域中的各波束的部分聚焦和离焦天线方向图拼接合成为一个中心波束的完整聚焦和离焦天线方向图,再采用Levenberg-Marquardt(LM)算法^[13]最小化合成天线方向图和理论天线方向图的残差,计算出反映动态形变成分的低阶Zernike多项式系数,从而获得动态形变。

2 测量原理

多波束馈源位于焦平面上,间隔较近,因此多波束的天线方向图在结构上具有相似性和重叠性。如图1(a)所示,仅对一个较小的区域进行扫描,再将各波束的天线方向图在此扫描区域中的部分区域进行拼接,即可合成为一个较大区域的完整的天线方向图,如图1(b)所示,最后对该拼接天线方向图进行相位恢复,即可求解形变。

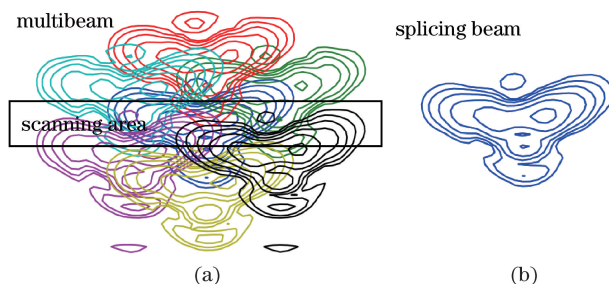


图1 采用等高线绘制的(a)多波束天线方向图及(b)拼接的天线方向图

Fig. 1 (a) Multibeam patterns and

(b) splicing beam pattern plotted in contour

具体来说,射电望远镜的动态形变 $\phi(x, y)$ 具有空间大尺度的特点,可采用低阶Zernike多项式^[14]来表示,即

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

式中: $Z_{n,l}(x, y)$ 为Zernike多项式; $a_{n,l}$ 为Zernike多项式系数; $l = -n, -n+2, \dots, n$ 。

相位恢复法需要测量1幅聚焦、2幅离焦天线方向图,离焦通过沿着光轴方向移动副反射面来实现。离焦时的口径面光程差采用 $m(x, y, dz)$ 表示,其中 dz 为副反射面移动距离。对于标准抛物面天线,离焦的光程差可采用光程差公式^[15]进行计算。对于赋形天线,可将其视为多个标准抛物面天线的组合,进而用来计算光程差^[16]。口径面的归一化幅度由馈源的边缘锥化度和天线形状决定,用 $I(x, y)$ 表示。

天线的口径场与远场之间存在二维傅里叶变换关系^[17],即

$$f(u, v) = \mathcal{F}\{g(x, y)\}, \quad (2)$$

其中

$$g(x, y) = I_0 I(x, y) \exp\left\{-i\left[\phi(x, y) + m(x, y, dz)\right] \frac{2\pi}{\lambda}\right\}, \quad (3)$$

式中: $f(u, v)$ 为天线远场; $g(x, y)$ 为口径场; I_0 为

口径面幅度峰值; λ 为测量波长。天线方向图为 $T(u, v)$, 即

$$T(u, v) = |f(u, v)|^2. \quad (4)$$

共需计算 1 幅聚焦、2 幅离焦天线方向图, 用 $T^t(u, v)$ 表示 ($t=1, 2, 3$)。

测量得到的各波束天线方向图集合为 $\{O'_k(u, v)\}$, $t=1, 2, 3; k=1, 2, 3, \dots\}$, k 表示对应的多波束。将 $O'_k(u, v)$ 分别减去其相对于中心波束的指向偏差 P_k 后, 拼接合成为单个波束的天线方向图 $X^t(u, v)$ 。依

据 $X^t(u, v)$ 中的位置信息对 $T^t(u, v)$ 进行高斯插值, 得到理论波束 $P^t(u, v)$ 。

相位恢复的评价函数 e_f 定义为拼接合成的天线方向图和计算的天线方向图的差值的平方和, 即

$$e_f = \sum_{t=1}^3 |P^t(u, v) - X^t(u, v)|^2. \quad (5)$$

至此, 问题转换为求解使 e_f 值最小的 Zernike 多项式系数 $a_{n,l}$, 流程如图 2 所示。本研究采用 LM 算法作为核心来求解形变。

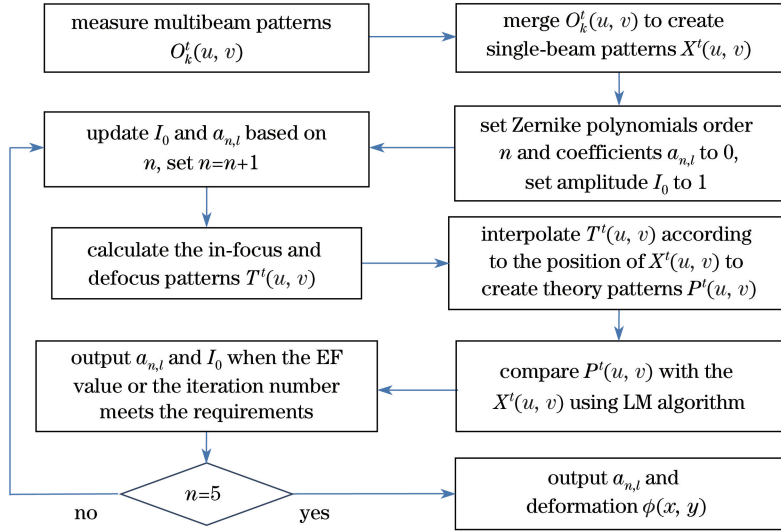


图 2 快速测量法流程图

Fig. 2 Flow chart of fast measurement method

3 数值模拟与分析

3.1 测量建模

在数值仿真中, 设置测量波长为 7.5 mm, 副反射面离焦 7 mm。仿真测量实验的示意图如图 3 所示, 由多波束接收机、天线、中频传输和数据终端 4 个部分组成。

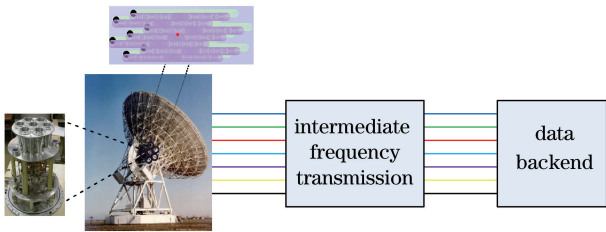


图 3 仿真测量实验的示意图

Fig. 3 Simulation measurement diagram

目前, 天马望远镜已配备双波束 Q 波段接收机。基于此波段, 已进行重力形变和温度形变的测量, 主反射面采用测量结果后, 天线效率显著提高。在此数值模拟中, 基于天马望远镜的双波束 Q 波段和国际大型射电望远镜多波束馈源的配置情况来仿

真天马望远镜 7 波束 (B1、B2、B3、B4、B5、B6、B7) Q 波段。仿真的 7 波束馈源的几何位置如图 4 所示, 7 波束呈正六边形放置, 波束 1 的馈源位于中心, 其余 6 个波束馈源位于正六边形的顶点, 各波束馈源中心间距为 70.0 mm, 馈源口径大小为 50.0 mm。馈源照明呈高斯分布, 锥化度为 -16.5 dB。经过计算, 各波束相对于波束 1 的方位和俯仰指向偏差如表 1 所示。

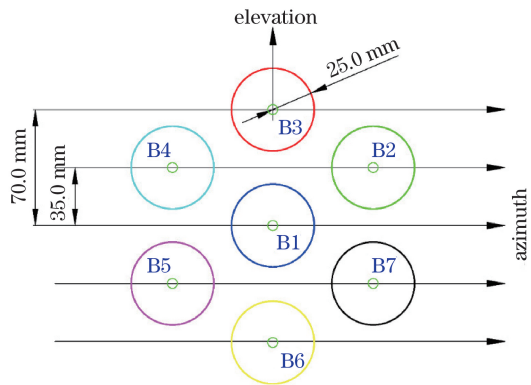


图 4 7 波束 Q 波段馈源配置图

Fig. 4 7 beam Q-band feed configuration diagram

表 1 各波束的天线方向图相对于中心的指向偏移

Table 1 Offset of each beam pattern relative to the center

Beam number	Azimuth offset / (")	Elevation offset / (")
B1	0	0
B2	74.70	43.13
B3	0	86.26
B4	-74.70	43.13
B5	-74.70	-43.13
B6	0	-86.26
B7	74.70	-43.13

在测量时,采用方位和俯仰坐标系下的 OTF 栅格扫描来测量天线方向图^[18]。对于单波束测量,在天马望远镜实测时,选择的扫描区域为 175"×200",行间隔为 12.5",共需扫描 17 行。为保证测量

数据的信噪比,行扫描速度为 25 (")/s。由于大型望远镜的惯性作用,每行预留 10 s,用于望远镜的加速和减速,因此单幅天线方向图测量时间约为 5 min,则 3 幅天线方向图测量的总时间约为 15 min。对于 7 波束测量,可将扫描区域压缩至 175"×50",行间隔为 12.5",仅需扫描 5 行,即可覆盖天线方向图的各个部分。在其他观测参数不变的条件,单幅天线方向图测量时间约为 1.5 min,则 3 幅天线方向图测量的总时间约为 5 min。

本研究将天马望远镜在 3 种典型情况(30°仰角的重力形变、70°仰角的重力形变、某一时刻的温度形变,它们的加权均方根误差分别为 440, 402, 381 μm)下的实测主反射面动态形变进行仿真,如图 5 所示,以检验本方法的正确性和通用性。

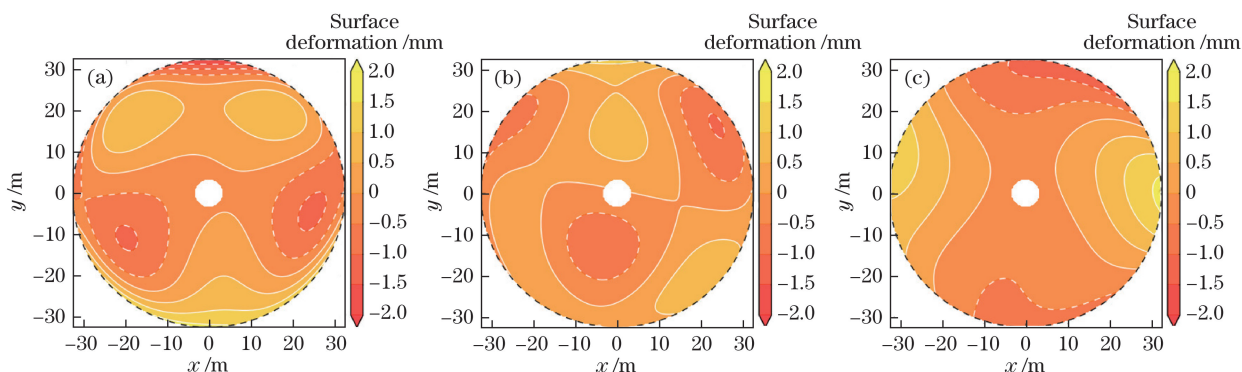


图 5 3 种典型情况下的动态形变仿真。(a) 30°仰角的重力形变;(b) 70°仰角的重力形变;(c) 某一时刻的温度形变

Fig. 5 Input deformation simulation under three typical conditions. (a) Gravitational deformation at 30°; (b) gravitational deformation at 70°; (c) thermal deformation at a given time

采用离散傅里叶变换,并结合光程差公式绘制上述 3 种情况下的聚焦和离焦天线方向图,如图 6 所示。从图 6 可知,多波束的天线方向图在去除指向偏差后具有相似性和重叠性的特征。随后将按照上述方法处理这 3 种典型情况下的天线方向图。

3.2 相位恢复的模拟结果与分析

首先,将图 6 中的天线方向图进行拼接,拼接合成的天线方向图如图 7 所示,可见合成波束与中心波束的天线方向图具有相似性。

接着,考察在无噪声条件下上述 3 种情况形变的恢复情况,结果如图 8 所示,测量数据如表 2 所示。从仿真结果可知,本方法能够恢复形变,平均测量精度约为 38 μm。

在上述仿真中,均假设天线方向图没有噪声,但在实际测量时,由于大气、设备等因素的影响,测量的天线方向图中存在噪声,为此在图 6 中的天线方向图中引入高斯白噪声(引入噪声后的天线方向图

表 2 无噪声时 3 种情况下的仿真结果

Table 2 Simulation results without noise under three typical conditions

Deformation type	Retrieval weighted root mean square / μm	Residual weighted root mean square / μm
Gravitational deformation at 30°	434	32
Gravitational deformation at 70°	396	38
Thermal deformation	381	43

峰值信噪比为 150:1),再进行拼接和相位恢复。恢复结果如图 9 所示,测量数据如表 3 所示。从仿真结果可知,本方法能够恢复形变,平均测量精度约为 40 μm,与没有噪声时的测量精度基本相当,表明本方法具有较好的抗噪声性能。在实际测量时,可选择较强流量的射电源作为信号源,易使天线方向图的峰值信噪比达到 150:1,可见本方法具有较高的实用性。

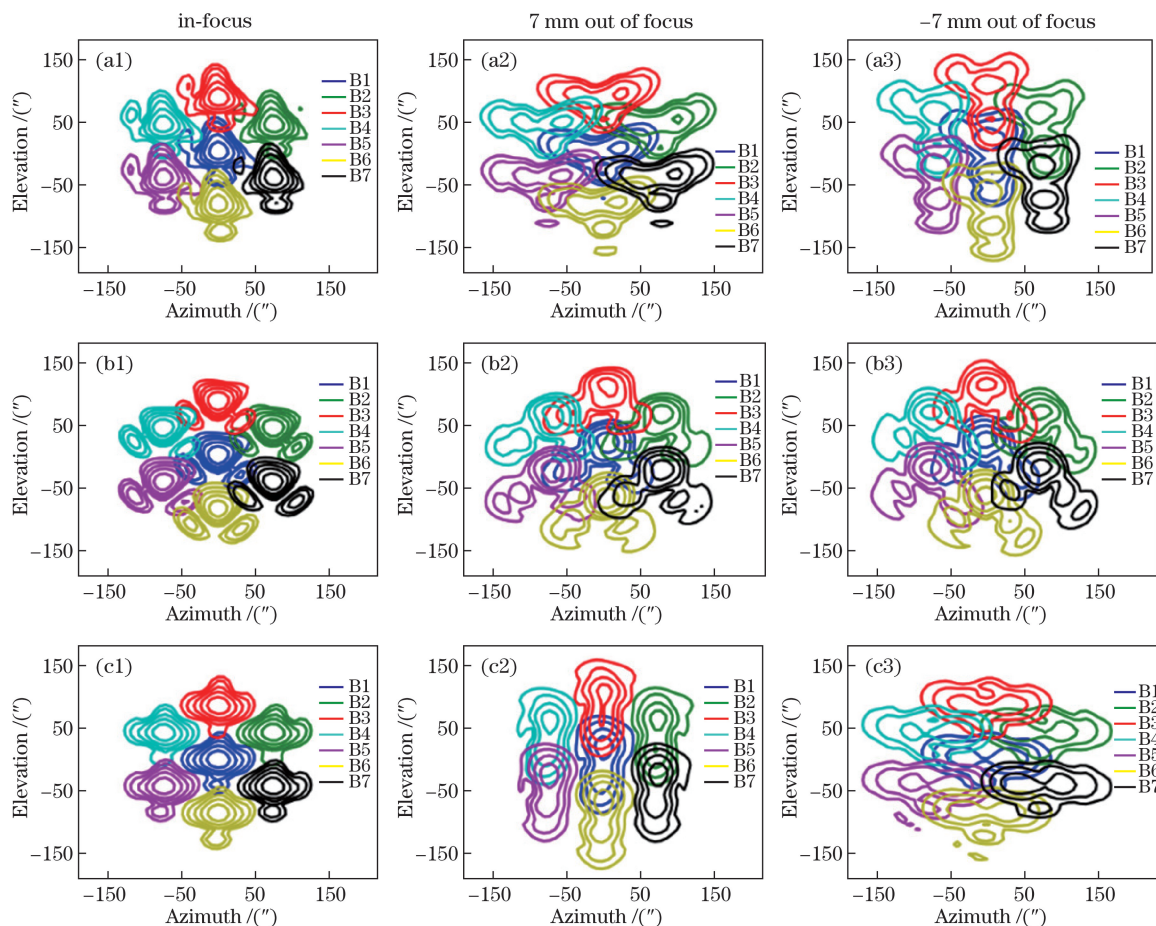


图 6 3 种典型情况下计算的天线方向图。(a) 30°仰角的重力形变；(b) 70°仰角的重力形变；(c) 某一时刻的温度形变

Fig. 6 Calculated patterns under three typical conditions. (a) Gravitational deformation at 30°;
(b) gravitational deformation at 70°; (c) thermal deformation at a given time

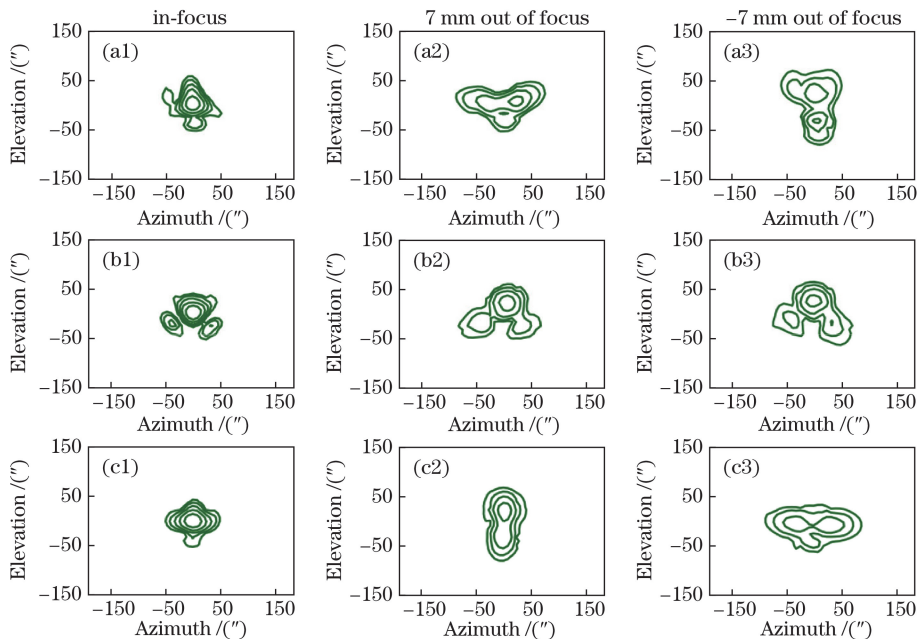


图 7 3 种典型情况下的拼接天线方向图。(a) 30°仰角的重力形变；(b) 70°仰角的重力形变；(c) 某一时刻的温度形变

Fig. 7 Splicing patterns under three typical conditions. (a) Gravitational deformation at 30°;
(b) gravitational deformation at 70°; (c) thermal deformation at a given time

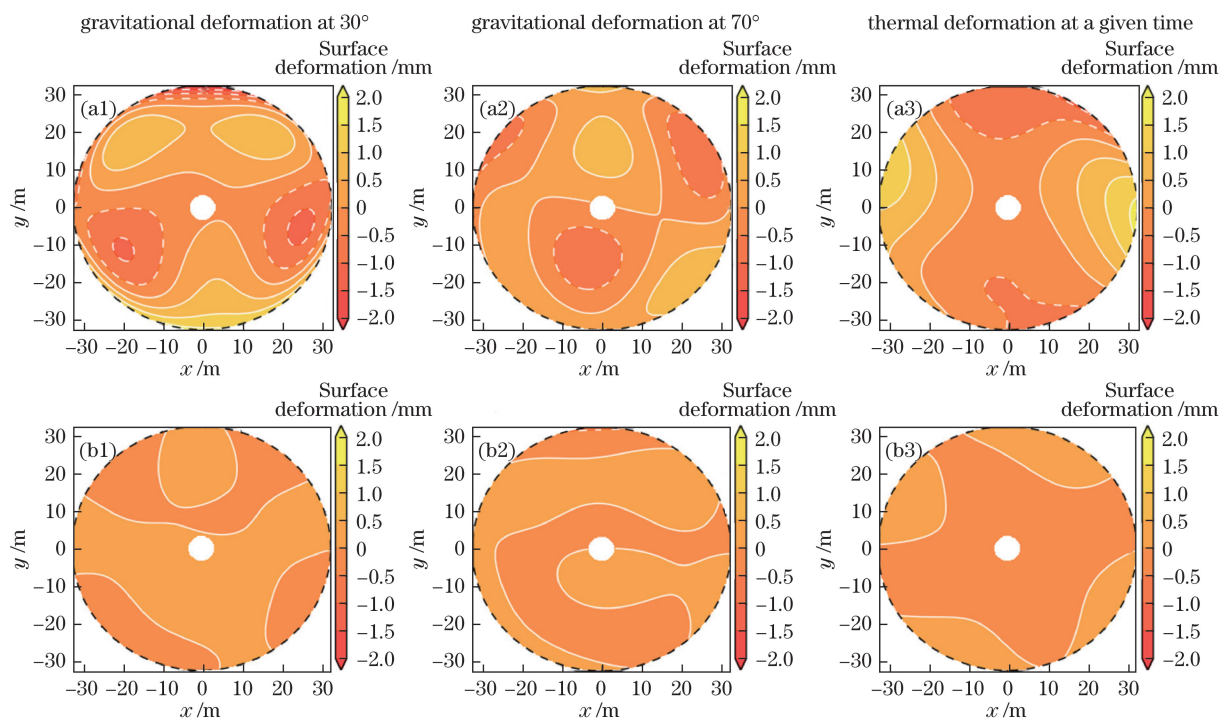


图 8 无噪声时 3 种典型情况下的(a)形变恢复和(b)形变残差

Fig. 8 (a) Retrieval deformation and (b) residual deformation without noise under three typical conditions

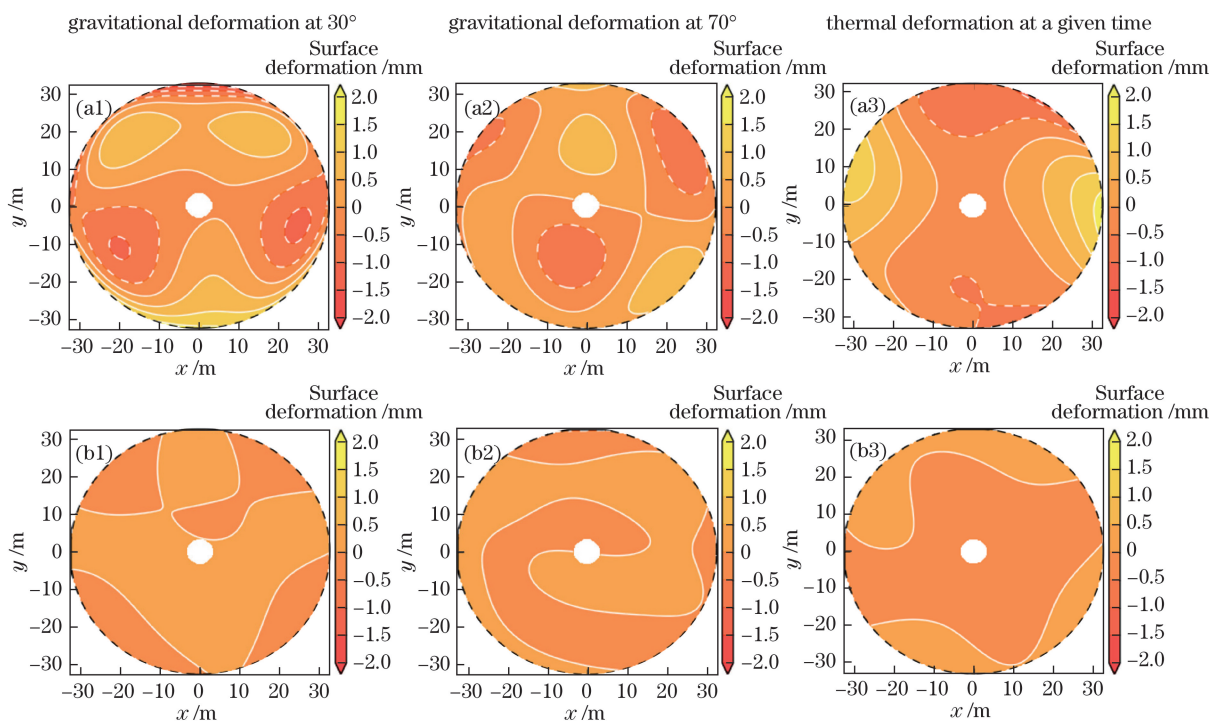


图 9 信噪比为 150:1 时 3 种典型情况下的(a)形变恢复和(b)形变残差恢复结果

Fig. 9 (a) Retrieval deformation and (b) residual deformation with signal-to-noise of 150:1 under three typical conditions

3.3 误差分析

在上述仿真中,均假设望远镜没有指向误差。在实际观测时,受望远镜伺服驱动精度、码盘精度和

风等因素的影响,望远镜的指向具有误差。为此,在 30°仰角重力形变的天线方向图中引入指向的高斯白噪声,引入高斯白噪声后的测量误差如表 4 所示。

表 3 信噪比为 150:1 时 3 种典型情况下的仿真结果

Table 3 Simulation results with signal-to-noise of 150:1 under three typical conditions

Deformation type	Retrieval weighted root mean square / μm	Residual weighted root mean square / μm
Gravitational deformation at 30°	432	35
Gravitational deformation at 70°	395	40
Thermal deformation	380	45

表 4 指向误差引起的测量误差

Table 4 Measurement error induced by pointing error

Pointing error /($''$)	Weighted root mean square / μm
1	35
3	45
5	70
7	105
8	180

由仿真结果可知,指向误差对测量结果影响较大。射电望远镜的伺服驱动和码盘的误差可控制在 $2''$ 之内;射电望远镜的高频观测一般选择在无风或者微风条件下进行,所以风引起的误差可控制在 $2''$ 之内,综合指向误差约为 $3''$,因此包含指向误差的测量误差约为 $45 \mu\text{m}$ 。

在上述仿真中,假设多波束对射电源信号的接收是完全一致的,但是由于各波束对应的链路的增益有所不同,并且发生变化,导致接收信号的幅度发生不同程度的波动。为此,在 30° 仰角重力形变的天线方向图中引入幅度的高斯白噪声,引入高斯白噪声后的测量误差如表 5 所示。

表 5 幅度波动引起的测量误差

Table 5 Measurement error induced by amplitude fluctuation

Amplitude fluctuation /%	Weighted root mean square / μm
5	35
10	40
15	45
20	60
25	70

从仿真结果可知,幅度波动对测量结果影响较小。通过高精度定标校准,链路增益的波动可控制在 10% 以内,因此包含幅度波动的测量误差约为 $40 \mu\text{m}$ 。

在实际观测时,测量误差受上述多种误差的综合影响,为此本研究探讨了综合测量误差。实测天

线方向图的平均信噪比约为 150:1,平均指向随机误差量约为 $3''$,平均幅度变化量约为 10%,故平均测量误差约为 $55 \mu\text{m}$,这表明在 40 GHz 观测频率上,此方法可实现约 $165 \mu\text{m}$ 的测量精度(3 倍方差)。射电天文观测要求望远镜主反射面形精度需小于观测波长的 5%,因此本方法可应用于 90 GHz 以下的天文观测。

4 结 论

本研究提出一种基于多波束相位恢复的射电望远镜主反射面动态形变的快速测量方法。基于 7 波束 Q 波段的数值仿真实验表明,该方法对 3 种典型情况(30° 仰角和 70° 仰角的重力形变、某一时刻的温度形变)下的主反射面形变都有较好的恢复结果,并具有较好的抗噪声、抗幅度波动等优点。在 3 种典型情况下,该方法测量时间约为 5 min,平均测量精度可达 $55 \mu\text{m}$,可应用于 90 GHz 以下的射电天文观测。下一步研究工作将利用实测数据来分析该方法的性能。

参 考 文 献

- [1] Prestage R M. The green bank telescope[C]. Proceedings of SPIE, 2006, 6267: 626712.
- [2] Tofani G, Alvito G, Ambrosini R, *et al.* Status of the sardinia radio telescope project[C]. Proceedings of SPIE, 2008, 7012: 70120F.
- [3] Souccar K, Wallace G, Grosslein R, *et al.* The architecture of the active surface control system of the Large Millimeter telescope[C]. Proceedings of SPIE, 2014, 9151: 91512J.
- [4] Dong J, Jin H L, Ye Q, *et al.* The active surface control system for the Tian Ma Telescope[C]. Proceedings of SPIE, 2016, 9913: 991306.
- [5] Chen S, Li C W, Zhang S J. Phase retrieval based on the Talbot effect of Ronchi grating[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(4): 0405001.
陈升, 李常伟, 张思炯. 基于 Ronchi 光栅 Talbot 效应的相位恢复[J]. 光学学报, 2018, 38(4): 0405001.
- [6] Morris D, Bremer M, Butin G, *et al.* Surface adjustment of the IRAM 30 m radio telescope[J]. IET Microwaves Antennas & Propagation, 2009, 3(1): 99-108.
- [7] Han F, Lü J, Wu W D, *et al.* The first radio holography measurement for the 13.7 m telescope of purple mountain observatory[J]. Acta Astronomica Sinica, 1994, 35(2): 209-215.
韩溥, 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[J]. 天文

- 学报, 1994, 35(2): 209-215.
- [8] Nikolic B, Hills R E, Richer J S, *et al.* Measurement of antenna surfaces from in-and out-of-focus beam maps using astronomical sources[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2007, 465(2): 679-683.
- [9] Nikolic B, Prestage R M, Balser D S, *et al.* Out-of-focus holography at the green bank telescope[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2007, 465(2): 685-693.
- [10] Bach U. Out of focus holography at effelsberg[C]// *Proceedings of the 12th European VLBI Network Symposium and Users Meeting (EVN 2014)*. 7-10 October 2014. Cagliari, Italy. id. 36. [2018-02-07]. <http://pos.sissa.it/cgi-bin/reader/conf.cgi?confid=230>.
- [11] Bolli P, Orlati A, Stringhetti L, *et al.* Sardinia radio telescope[J]. *Journal of Astronomical Instrumentation*, 2015, 4(3/4): 1550008.
- [12] Dicker S R, Korngut P M, Mason B, *et al.* MUSTANG: 90 GHz science with the green bank telescope[C]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7020: 702005.
- [13] Zhang B, Zou Z, Chen S J, *et al.* Fabric image registration based on affine transform and Levenberg-Marquardt algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(1): 0133002.
- 张彪, 邹哲, 陈书界, 等. 基于仿射变换与 Levenberg-Marquardt 算法的织物图像配准[J]. *光学学报*, 2017, 37(1): 0133002.
- [14] Chen L X, Hu X C, Han K, *et al.* Improvement method for fitting high-frequency phase by Zernike polynomials[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(3): 0314001.
- 陈丽霞, 胡小川, 韩开, 等. Zernike 多项式对空间高频相位拟合的改进方法[J]. *光学学报*, 2016, 36(3): 0314001.
- [15] Ruze J. Antenna tolerance theory: a review[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1966, 54(4): 633-640.
- [16] Leng G J, Wang W, Duan B Y, *et al.* Sub-reflector real-time compensation for main-reflector deformation of shaped Cassegrain antenna[J]. *System Engineering and Electronics*, 2011, 33(5): 996-1000.
- 冷国俊, 王伟, 段宝岩, 等. 赋形卡氏天线主面变形的副面实时补偿[J]. *系统工程与电子技术*, 2011, 33(5): 996-1000.
- [17] Rochblatt D J, Seidel B L. Microwave antenna holography[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*, 1992, 40(6): 1294-1300.
- [18] Mangum J G, Emerson D T, Greisen E W. Theon-the-fly imaging technique[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2007, 474(2): 679-687.