

# 基于主动反射面主动形变的相位恢复 全息法研究\*

王志桥<sup>1,2</sup> 陈卯蒸<sup>1</sup> 裴鑫<sup>1†</sup> 王军<sup>1,3</sup>

(1 中国科学院新疆天文台 乌鲁木齐 830011)

(2 新疆大学物理科学与技术学院 乌鲁木齐 830046)

(3 中国科学院大学 北京 100049)

**摘要** 大口径射电望远镜的表面精度是影响天线性能的重要因素之一,受面板加工、安装以及重力、温度和风载的影响,极大地限制了天线的观测效率.基于较副面六连杆更加精确可控的主动面技术,首次采用泽尼克(Zernike)多项式表示连续变化的主动形变相位因子,通过调整主动面获取远场幅值,即可检测表面误差.通过建立数值仿真模型,计算了任意表面形变的恢复误差,并研究了在多种连续主动面变化下的表面形变恢复效果.结果表明此方法可以稳定精准地检测表面形变,从而有效提高射电望远镜的观测效率.

**关键词** 望远镜, 方法: 数据分析, 物理数据及处理

中图分类号: P111; 文献标识码: A

## 1 引言

大口径反射面天线是射电天文观测和深空探测的关键设备之一.然而,反射面的表面精度却限制了天线的观测效率.表面精度不仅受到面板制造和装配精度的影响,而且也受到自身重力、温度、风载等准实时性因素的影响<sup>[1-3]</sup>.为了检测天线反射面表面形变,先后出现了经纬仪测量、全站仪测量、激光跟踪测量、摄影测量等检测技术<sup>[4]</sup>,但由于这些方法在测量过程中,存在测量时间长、操作复杂而且只能在特定的天线姿态下进行测量等缺点,因此,不能满足现代大口径天线的应用需求.微波全息法<sup>[5-8]</sup>具有测量精度高、测量效果全面和测量费用低等优点,在天线表面检测中获得了广泛应用.

相位恢复全息法<sup>[9-10]</sup>属于微波全息法的一类,其原理是利用远场和口径场之间存在的快速傅里叶变换关系(Fast Fourier Transform, 缩写为FFT),通过测量天线远场幅值分布恢复出口径场的相位分布,进而推导出对应的反射面表面形变.由于此方法只需多次测量天线的远场方向图幅值,就可以检测反射面表面的形变,因此不需要额外设备就可以实现测量.在天线表面检测的相位恢复算法中, Misell算法是

2017-03-01收到原稿, 2017-04-01收到修改稿

\*国家重点基础研究发展计划(2015CB857100), 中国科学院天文台站设备更新及重大仪器设备运行专项经费, 国家自然科学基金项目(11403091、11253001、U1431230)资助

†peixin@xao.ac.cn

在Gerchbergh-Saxton (简称GS)算法的基础上提出的<sup>[11]</sup>, 随后被用在了很多天线的表面形变检测中并取得了不错的效果<sup>[12-13]</sup>. 为了快速精确地调整主反射面, 新型大口径反射面天线相继采用了基于促动器调节的主动面控制系统, 这也使得天线面板的调整变得更加快速、便捷. 目前, 世界上使用主动面系统的望远镜中, 比较典型的有美国GBT (Green Bank Telescope) 100 m、上海天马(简称TM) 65 m和贵州FAST (Five hundred meter Aperture Spherical radio Telescope) 500 m, 正在筹建中的新疆QTT (QiTai radio Telescope) 110 m也将采用主动面控制系统. 随之, 一种基于主动面的相位恢复方法<sup>[14]</sup>被提出, 文献[14]中针对反射面环形形变做了仿真分析, 为将来进一步研究表面形变的检测方法提出了一种新的思路.

在Misell算法中, 天线远场幅值的测量需要移动馈源或者副面, 获取在聚焦和离焦状态下的远场方向图幅值, 而主动面检测方法的优点是在天线聚焦时, 通过利用促动器调整面板形状直接测量算法所需要的远场方向图幅值, 这样不仅测量时间短、可以满足实时测量的要求, 而且每次测量促动器的调节量也可以灵活变化, 减小系统误差带来的影响. 在文献[14]中提到了由促动器和副面移动引入的误差, 如上海TM 65 m的六联杆副面定位精度为 $50 \mu\text{m}$ <sup>[15-16]</sup>, 而它的促动器定位精度高达 $15 \mu\text{m}$ , 美国GBT 100 m的促动器定位精度也达到了 $25 \mu\text{m}$ . 通常情况下, 主反射面上促动器的定位精度要高于副面定位精度, 这样通过调整主动面测量的远场数据将会更准确, 使得获取的远场数据也能更真实地反映反射面表面形变情况.

本文首次研究了基于主动反射面连续主动形变的相位恢复全息法, 通过数值仿真验证了该方法的可行性. 文中首先根据主动面相位恢复全息法的原理, 详细地分析了主动面测量方法; 随后, 用泽尼克(Zernike)多项式和高斯函数分别表示口径场的相位和幅值, 以此建立天线仿真模型, 通过数值仿真恢复天线随机表面形变, 计算恢复精度; 最后, 研究了在不同主动面变化下, 随机表面形变恢复的形变结果和恢复稳定性.

## 2 主动面相位恢复方法原理

主动面相位恢复方法的基本原理是利用远场分布与口径场分布之间存在的傅里叶变换关系, 通过测量天线的远场方向图幅值, 用恢复算法在远场和口径场之间反复迭代, 逐步逼近口径场真实分布, 进而恢复出带有误差信息的口径场相位分布, 最后利用口径场相位与反射面面形之间的几何关系, 推导出反射面表面的形变.

天线的远场方向图包含反射面表面的误差信息, 因此, 面板发生变化时, 天线的远场方向图也将发生变化. 文献[17]表明天线表面变形在天线离焦时比聚焦时更加明显, 同理, 根据射线追踪法, 天线主动反射面发生变化时, 相比于主动面不动时, 表面误差信息将变得更明显, 远场方向图数据变化也将更显著, 这也使得迭代过程中算法的收敛速度更快, 恢复精度更高. 同样主动面变化时, 口径场分布也会发生变化, 其中口径场幅值变化可以忽略, 而相位变化却很明显. 主动面形变量和口径面主动相位因子之间的数学关系为<sup>[18]</sup>:

$$\delta = 4\pi \frac{\epsilon}{\lambda} \left( 1 + \frac{x^2 + y^2}{4F^2} \right)^{-1/2}, \quad (1)$$

式中,  $\delta$ 表示口径场相位分布,  $\epsilon$ 表示在反射面法线方向的主动面形变量,  $F$ 表示焦距,  $\lambda$ 表

示波长,  $x$ 和 $y$ 是反射面的平面投影坐标.

天线的远场幅值分布可以通过扫描信号源获得, 主动面相位恢复法要求在迭代过程中至少测量两次远场方向图幅值. 在测量第1幅远场方向图幅值时, 要求主动反射面保持不动, 扫描信号源获得远场幅值数据; 而在测量第2幅远场方向图幅值时, 需要通过促动器调整主动反射面, 随后扫描信号源获得远场数据. 在调整主动面时, 可以利用促动器灵活地添加主动面形变, 并根据促动器的移动距离推算出主动形变量分布, 随后利用主动形变量与口径场相位之间的数学关系计算出口径面的主动形变相位因子. 在获得远场幅值数据和主动面主动形变相位因子之后就可以通过图1中的迭代算法, 恢复出口径场的相位分布, 推算出反射面表面的形变误差.

图1为主动面方法流程图, 此算法在迭代过程中使用了3幅远场幅值分布, 分别为 $\mathbf{A}_{m1}$ 、 $\mathbf{A}_{m2}$ 和 $\mathbf{A}_{m3}$ , 其中 $\mathbf{A}_{m1}$ 为没有添加主动面形变时的远场幅值分布,  $\mathbf{A}_{m2}$ 和 $\mathbf{A}_{m3}$ 分别为第1次添加主动面形变和第2次添加主动面形变时的远场幅值分布.

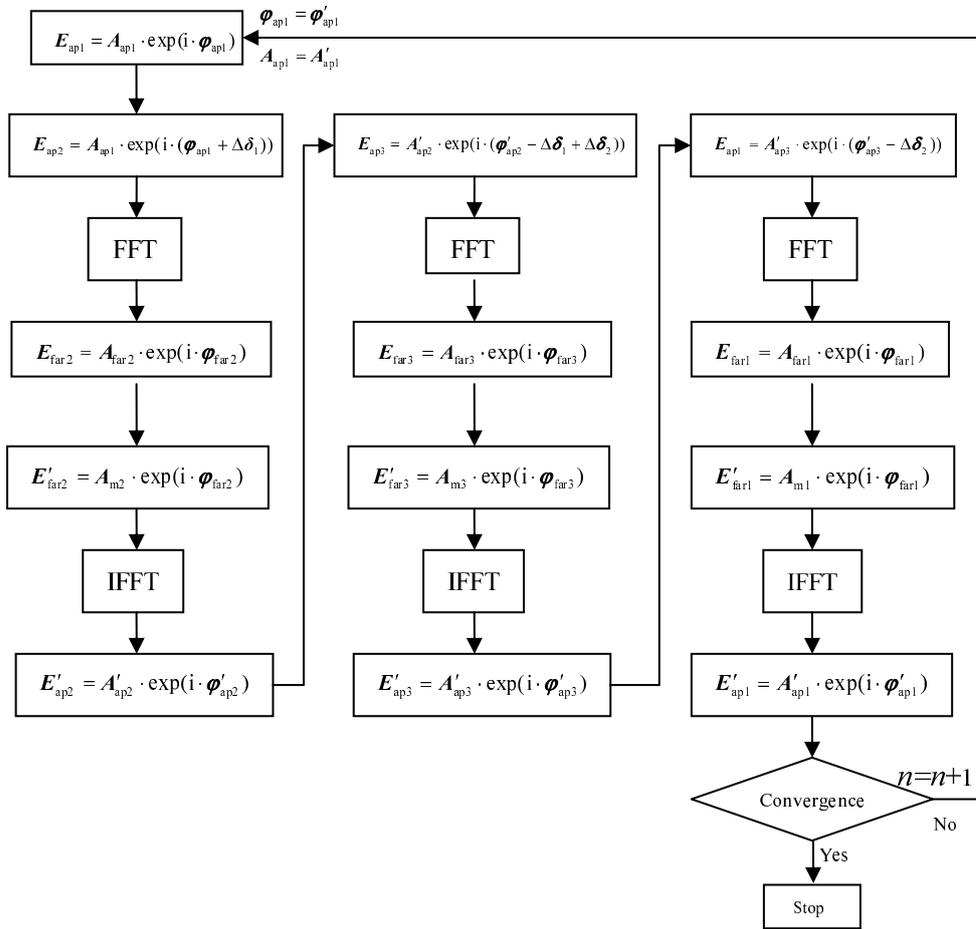


图 1 主动面方法流程图, 变量说明见正文

Fig. 1 Flowchart of the active surface method, see the context for the definition of variables

该算法在第1次迭代开始时,需要先仿真理想的口径场初始分布函数 $\mathbf{E}_{\text{ap}1}$ ,其中初始分布函数的振幅 $\mathbf{A}_{\text{ap}1}$ 用高斯函数表示,初始相位 $\varphi_{\text{ap}1}$ 用全零矩阵表示.迭代开始后,通过添加主动形变相位因子 $\Delta\delta_1$ ,构建出第1次调整主动面后的口径场相位分布 $\mathbf{E}_{\text{ap}2}$ ,由2维傅里叶变换关系计算出远场分布 $\mathbf{E}_{\text{far}2}$ .接着用观测远场幅值 $\mathbf{A}_{\text{m}2}$ 替换远场分布 $\mathbf{E}_{\text{far}2}$ 的幅值 $\mathbf{A}_{\text{far}2}$ ,并保留其相位 $\varphi_{\text{far}2}$ ,以此构建出新的远场分布 $\mathbf{E}'_{\text{far}2}$ .在2维逆傅里叶变换的作用下,获得第1次调整主动面后新产生的口径场分布 $\mathbf{E}'_{\text{ap}2}$ .接下来通过消去主动形变相位因子 $\Delta\delta_1$ ,添加第2次主动形变相位因子 $\Delta\delta_2$ ,构建出第2次调整主动面后的口径场分布 $\mathbf{E}_{\text{ap}3}$ .按照流程图重复第1次调整主动面后的步骤,即傅里叶变换、远场幅值替换、逆傅里叶变换,获得第2次调整主动面后新产生的口径场分布 $\mathbf{E}'_{\text{ap}3}$ .再接下来通过消去第2次添加的主动形变相位因子 $\Delta\delta_2$ ,构建出主动面在没有调整时的口径场分布 $\mathbf{E}_{\text{ap}1}$ ,继续重复傅里叶变换、远场幅值替换、逆傅里叶变换等步骤,获得没有调整主动面时新产生的口径场分布 $\mathbf{E}'_{\text{ap}1}$ ,并保留相位 $\varphi'_{\text{ap}1}$ .此时,算法完成了一次完整的迭代.为了获得理想的恢复结果,在每次迭代结束时计算迭代后的远场幅值 $\mathbf{A}_{\text{far}1}$ 与观测远场幅值 $\mathbf{A}_{\text{m}1}$ 之间的均方根(Root Mean Square, 简称RMS),如果满足预设收敛条件,则迭代停止,此时获得的口径场相位分布 $\varphi'_{\text{ap}1}$ 就是最终恢复的带有面板畸变的相位分布.反之,继续迭代直到满足预设收敛条件或者达到设定的最大迭代次数.收敛准则定义的远场幅值RMS表达式如(2)式:

$$\text{RMS}_{\text{far}}(k) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{k_{\text{max}}} (|\mathbf{A}_{\text{far}1}(k)| - |\mathbf{A}_{\text{m}1}|)^2}{m \times n}}, \quad (2)$$

其中,  $|\mathbf{A}_{\text{far}1}(k)|$ 为迭代过程中获得的远场幅值,  $|\mathbf{A}_{\text{m}1}|$ 为观测的远场幅值,  $m$ 和 $n$ 分别为测量天线远场方向图幅值时在俯仰和方位方向上扫描的点数.

若前后两次迭代的 $\text{RMS}_{\text{far}}(k)$ 之差小于预设收敛值 $L$ ,则认为迭代满足收敛条件,停止迭代,否则继续迭代,直到满足收敛条件.

### 3 仿真模型与结果分析

用相位恢复全息法检测天线表面形变时,只需要测量天线的远场方向图幅值,因此在仿真时,最重要的就是通过仿真天线模型获得天线的远场分布幅值.

#### 3.1 远场仿真模型

以标准卡塞格伦反射面天线为仿真模型,由于反射面与口径场之间可以相互转化,为了方便,直接建立因天线反射面变形而导致的口径场分布,并应用全息原理,通过快速傅里叶变换计算其对应的远场分布.仿真天线参数如表1所示,其中,  $D$ 是主面直径,  $D_s$ 是副面直径,  $f$ 是主面焦距,  $F$ 是等效焦距,  $E_T$ 是边缘锥度.

表 1 25 m 天线参数  
Table 1 Parameters of the 25 m antenna

$D/\text{m}$	$D_s/\text{m}$	$f/\text{m}$	$F/\text{m}$	$E_T/\text{db}$
25	3	8.75	78.75	-14

口径场分辨率的定义如(3)式所示:

$$dx = \frac{D}{K(N-1)}, \quad (3)$$

其中,  $D$ 为天线直径,  $K$ 为过采样系数,  $N$ 为远场采样点数. 在仿真中口径面积分辨率 $dx$ 为0.2 m.

口径场分布由幅值分布和相位分布构成, 仿真过程中, 前者用高斯函数建立分布, 而后者则采用3阶10项泽尼克多项式表示, 表达式分别如(4)-(5)式所示<sup>[17]</sup>, 其相对应的泽尼克系数见表2.

$$I(x, y) = I_0 \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{R^2} \sigma_r\right), \quad (4)$$

其中,  $I_0$ 为幅值的峰值,  $\sigma_r$ 为天线照明锥度.

$$\varphi(x, y) = \sum_{n=1}^{n_{\max}} \sum_{l=-n, -n+2, \dots, n} a_{n,l} Z_{n,l}(x, y), \quad (5)$$

其中,  $a_{n,l}$ 为泽尼克多项式系数,  $Z_{n,l}(x, y)$ 为泽尼克多项式. 由此建立的口径场相位分布和幅值分布如图2.

表2 口径场相位分布对应的泽尼克多项式系数

Table 2 Coefficients of Zernike polynomials corresponding to the phase distribution of aperture field

$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$	$a_9$	$a_{10}$
0.4	0.8	-0.1	-0.3	-0.2	0.7	-0.5	0.6	-0.2	0.1

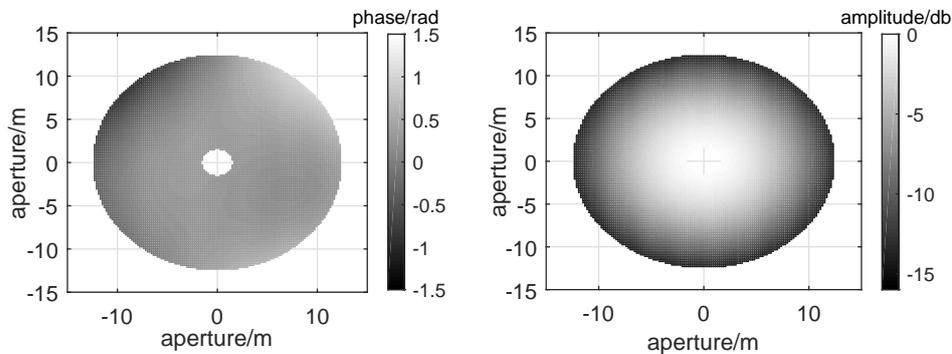


图2 口径场相位分布(左)和幅值分布(右)

Fig. 2 The phase distribution (left) and the amplitude distribution (right) of aperture field

利用促动器调整主动面面形, 可以获得不同的远场幅值分布. 根据(1)式, 当主动面发生变形时, 可计算出口径面对应的主动形变相位变化因子. 下面取一组3阶10项泽尼克多项式表示因主动面发生主动形变时, 口径场相位发生的正向主动变化因子, 而第2次调整主动面是以相同的变化量反向变化, 则可获得口径场相位反向主动变化因子, 此泽尼克系数见表3, 口径场主动变化因子如图3所示.

表 3 主动形变相位对应的泽尼克多项式系数  
 Table 3 Coefficients of Zernike polynomials corresponding to the phase by active deformation

deformation									
$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$	$a_9$	$a_{10}$
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1

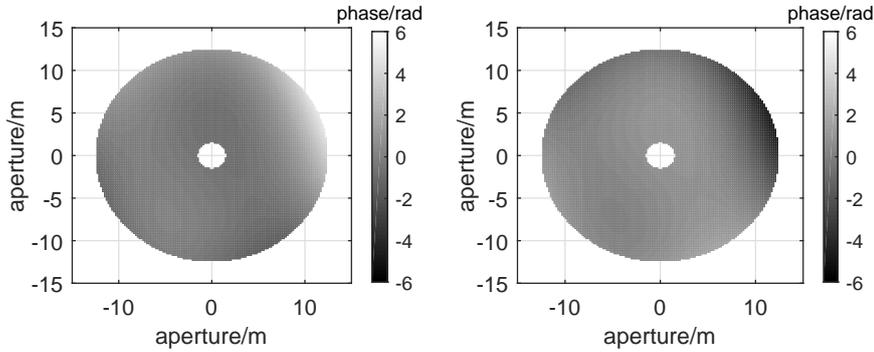


图 3 主动形变相位因子: 正向相位因子(左)和反向相位因子(右)

Fig. 3 The phase factor by active deformation: positive phase factor (left) and negative phase factor (right)

在仿真出口口径场分布和主动口径场相位变化因子之后, 通过离散快速傅里叶变换计算相应的远场分布, 其中远场幅值分布如图4所示.

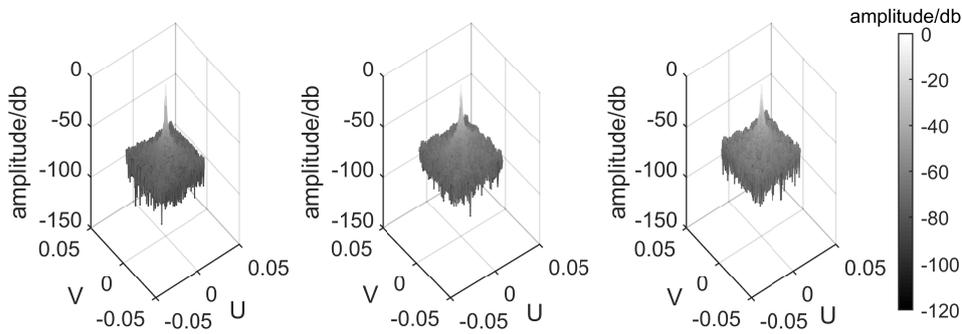


图 4 远场幅值分布: 主动面不动(左), 主动面正向变化(中), 主动面反向变化(右). UV平面是通过2维傅里叶变换得到的远场幅值分布平面.

Fig. 4 The amplitude of far field: on focus (left), positive deformation (middle), and negative deformation (right). The UV plane is the amplitude of far field obtained by two-dimension Fourier transform.

仿真出远场幅值分布和主动面相位变化因子后, 便可代入恢复算法, 恢复面形误差带来的相位误差.

### 3.2 仿真结果与分析

仿真时, 设定收敛条件:  $L = 10^{-8}$ , 即

$$\text{RMS}_{\text{far}}(k) - \text{RMS}_{\text{far}}(k - 1) < 10^{-8}. \tag{6}$$

口径场相位的RMS表达式为:

$$\text{RMS}_{\text{ap}}(k) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{k_{\max}} (|\varphi'_{\text{ap}1}(k)| - |\varphi_{\text{ap}0}|)^2}{m \times n}}, \quad (7)$$

其中 $\varphi_{\text{ap}0}$ 为设置的口径场相位.

以表2和表3的泽尼克系数分别表示口径场相位分布和口径场主动面相位变化因子, 将图3中表示的天线远场幅值数据代入图1所示的恢复算法进行恢复. 迭代结束后远场幅值以及口径场相位的RMS变化趋势和恢复的口径场相位分布如图5所示.

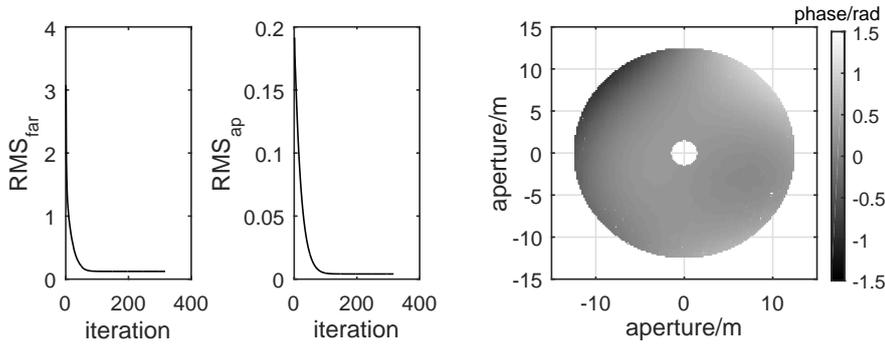


图5 远场幅值RMS和口径场相位RMS (左), 算法恢复相位分布(右)

Fig. 5 The amplitude RMS of far field and phase RMS of aperture field (left), and the retrieved phase distribution by algorithm (right)

此次恢复过程的迭代次数为317, 远场幅值RMS为0.123, 口径场相位RMS为0.0041 rad, 对应于反射面形变的恢复误差为 $4.25 \mu\text{m}$ , 恢复误差百分比为1.19%. 在迭代过程中只对数据进行了傅里叶正逆变换和远场数据替换, 因此迭代所用时间较短, 且恢复过程结束后远场幅值和口径场相位RMS均比较小, 说明结果非常接近真实值, 其恢复误差较小.

为了验证算法对不同形变的恢复效果, 以表3中的泽尼克系数表示口径场主动形变相位因子, 随机取12组泽尼克系数表示因表面变形而引起的不同口径场相位进行恢复, 最终恢复出各组对应的表面恢复误差RMS, 其分布如图6所示, 相应的12组泽尼克系数如表4所示.

图6中, 12组表面形变中的第12组恢复结果最好, 恢复误差为 $1.65 \mu\text{m}$ ; 第5组形变恢复误差较大, 但恢复的口径场相位RMS也只有0.0192, 对应的表面误差RMS为 $19.8 \mu\text{m}$ , 所占预设变形的7.6%. 其他各组恢复误差介于这两组之间, 整体看来, 恢复误差均小于 $20 \mu\text{m}$ , 恢复形变误差不超过8%, 12组数据恢复结果都相对稳定. 第5组恢复误差相对较大, 主要原因可能是口径面分辨率在一定程度上影响了泽尼克多项式的描述效果, 使一些区域的微小形变不能被有效分辨, 导致恢复误差相对过大.

为进一步研究在不同主动面变化下, 对不同反射面变形的恢复效果, 以表4中的12组泽尼克系数分别表示反射面变形引起的口径场相位分布, 随机取3组主动面变化相位因子, 恢复在每一组主动面变化因子下的12种表面形变, 以口径场恢复相位RMS为标准,

转化为对应的表面形变恢复误差RMS. 3组主动面变化相位因子用表5中的泽尼克系数表示, 其中 $a_1$ 为相位平移项, 调整 $a_1$ 不会影响相位的相对分布, 但是在调整主动面时, 会增加主动面的调节量, 所以将每一组系数的 $a_1$ 都取为0. 在3组主动面变化下, 表面形变恢复误差RMS分布如图7所示.

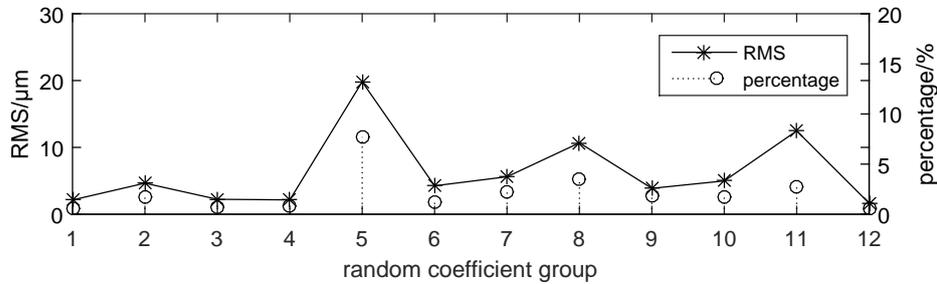


图 6 表面形变恢复误差RMS和百分比

Fig. 6 The retrieved error RMS and percentage of surface deformation

表 4 12组随机泽尼克多项式系数

Table 4 Twelve sets of random Zernike polynomial coefficients

	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$	$a_9$	$a_{10}$
1	0.3	-0.9	-0.4	0.7	0.1	-0.5	0.8	0.6	-0.3	-0.2
2	0.3	0.1	0.5	0.5	0.2	-0.5	0.2	0.5	0.5	0.4
3	0.2	0.3	0.4	0.6	0.1	-0.4	0.	0.6	-0.3	-0.2
4	0.5	-0.5	-0.6	-0.3	0.3	-0.1	0.3	-0.6	0.2	-0.4
5	0.3	0.5	-0.6	-0.1	0.4	-0.3	-0.2	-0.1	0.4	-0.6
6	0.4	0.8	-0.1	-0.3	-0.2	0.7	-0.5	0.6	-0.2	0.1
7	0.2	-0.6	0.3	-0.2	0.6	0.3	-0.1	-0.4	0.7	-0.3
8	-0.1	-0.2	0.3	-0.4	0.5	0.6	-0.7	-0.8	0.1	-0.1
9	0.4	-0.2	0.3	-0.4	0.5	0.3	-0.4	-0.2	0.5	-0.3
10	-0.1	-0.7	-0.1	0.2	0.4	-0.5	0.6	-0.1	-0.3	0.5
11	-0.2	0.8	-0.4	-0.5	0.1	-0.2	0.3	-0.6	0.1	0.2
12	0.1	0.4	-0.2	0.5	-0.3	-0.7	-0.2	0.1	-0.3	0.5

表 5 3组随机泽尼克多项式系数

Table 5 Three sets of random Zernike polynomial coefficients

	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$	$a_9$	$a_{10}$
1	0	0.4	0.6	0.8	0.2	0.5	0.6	0.4	0.8	0.5
2	0	-0.4	-0.6	-0.8	-0.2	-0.5	-0.6	-0.4	-0.8	-0.5
3	0	-0.8	0.3	0.9	0.1	0.7	-0.6	-0.2	0.5	-0.4

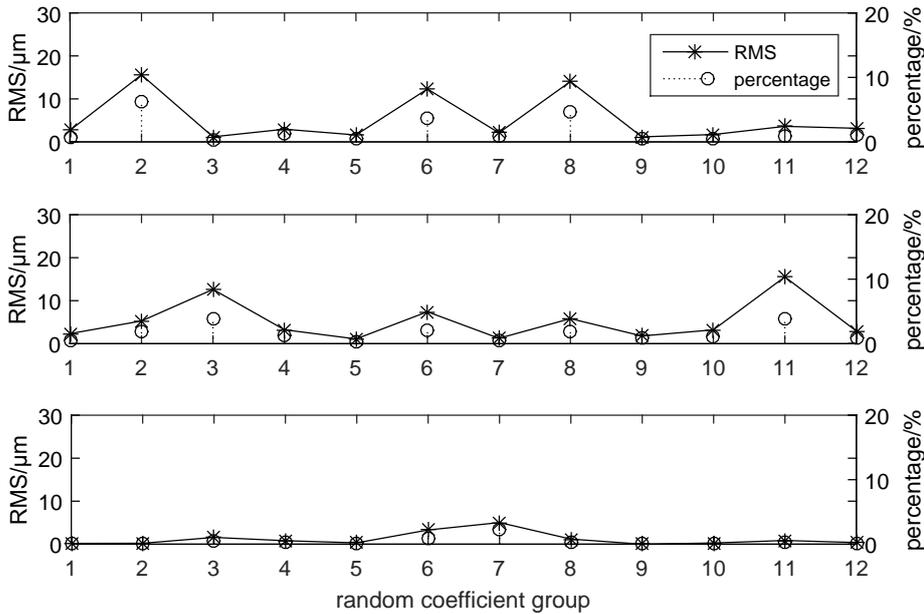


图 7 在3组不同的主动面变形下, 表面形变恢复误差RMS和百分比

Fig. 7 Under the three different sets of active deformations, the retrieved error RMS and percentage of surface deformation

图7的仿真是为了说明在不同的主动面下, 不同表面形变的恢复精度和恢复稳定性. 在3组主动面变化下, 每组表面形变恢复误差RMS均小于20 μm, 恢复效果较好, 且12组表面形变恢复误差RMS的均方差(Mean Square Error, 简称MSE)分别为5.17 μm、5.20 μm和1.17 μm. 整体恢复结果相对稳定, 但在第3组主动面变化因子下, 恢复精度和稳定性更好. 原因是泽尼克多项式在描述口径面相位时自身就带有一定的误差, 这些误差由泽尼克多项式自身决定, 在使用时将会不可避免地引入偏差, 所以在恢复过程中恢复误差会有一些波动, 也将导致主动面在不同的主动面形变下表面形变恢复误差RMS的均方差不同.

为研究泽尼克多项式项数对恢复精度的影响, 以表4中的12组10项泽尼克多项式系数为标准, 分别用6项、10项、15项、21项泽尼克多项式表示12组表面形变, 然后利用表5中的3组主动面变化相位因子, 研究在每组主动面变化下, 4种不同项数表示的12组面板形变恢复的稳定性. 具体的做法是, 6项泽尼克多项式的6项系数用表4中10项泽尼克多项式系数的前6项表示; 10项泽尼克多项式的系数就采用表4中的10项系数; 15项泽尼克多项式系数的前10项系数采用表4中的10项系数表示, 而后5项系数全设为0.01. 同理, 21项泽尼克多项式表示的12组面板形变, 每组形变的前10项系数依然用表4中的10项系数表示, 后11项系数全部设为0.01, 这样的做法使得在预置的面板形变不发生巨大变化的情况下, 对比了泽尼克多项式项数对该方法恢复结果的影响. 仿真采用了3组主动面变化因子, 分别计算了在每一组主动面变化下, 不同泽尼克多项式项数表示的12组表面形变的恢复误差RMS的均方差, 均方差分布如图8所示.

由图8可以看出, 在3组主动面下, 12组表面形变恢复误差RMS的均方差随着泽尼

克多项式项数的增加而减小,但是项数从6项增加到10项时,均方差减小的趋势比较明显,而增加到15项和21项时,均方差减小的趋势明显变得缓慢,所以我们在仿真中采用了10项泽尼克多项式描述口径场相位.仿真结果说明泽尼克多项式的系数确实可以影响面板的恢复误差,更直观的体现是针对不同面板变形其恢复稳定性增加了,与此同时,恢复过程的耗时也随着项数的增加而增加了,所以项数对恢复稳定性和耗时都有影响,选择时要权衡这两个因素.

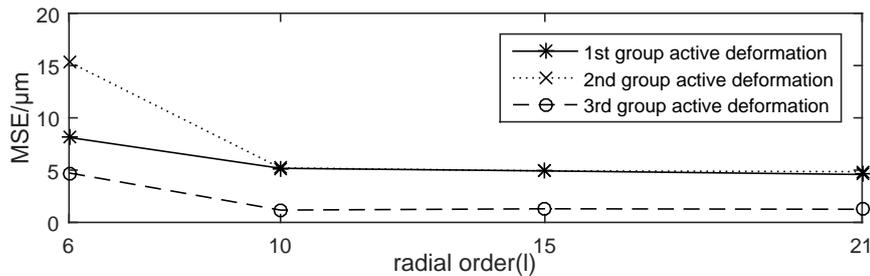


图 8 恢复误差(RMS)的均方差(MSE)

Fig. 8 The mean square error (MSE) of retrieved error (RMS)

基于以上仿真结果,表明基于主动反射面连续主动形变的相位恢复方法对任意的表面形变都可以恢复出来且恢复误差较小,同时,针对不同的连续主动面变化相位因子,也可以稳定地恢复出表面形变.在此方法中恢复误差主要来源于泽尼克多项式自身的误差、口径面积分辨率的大小以及泽尼克多项式项数的选择.鉴于此方法产生的随机误差,因此在实际检测表面形变时,可以利用连续主动面变化因子的多样性,更加精确地诊断出面板形变误差.

## 4 总结

本文研究了基于主动反射面连续主动形变的相位恢复全息法对随机面板形变的恢复误差,以及在多种连续主动面变化下,随机表面形变的恢复误差和稳定性,验证了此方法应用于天线面形检测的有效性和可行性.基于天线主动面系统,此方法有测量速度快、恢复精度高、便捷等优点,但是针对不同主动面形变因子,恢复精度也存在起伏性的问题,接下来我们将继续研究主动面恢复方法,为将来新疆QTT 110 m射电望远镜的技术预研创造条件.

**致谢** 感谢上海交通大学刘抗抗博士在相位恢复全息法方面给予的帮助和指导.

## 参考文献

- [1] 左营喜, 李阳, 孙继先, 等. 天文学报, 2011, 52: 152
- [2] Zuo Y X, Li Y, Sun J X, et al. ChA&A, 2011, 35: 439
- [3] 李干, 李宗春, 牟爱国. 天文学报, 2013, 54: 189
- [4] 李宗春, 李广云, 吴晓平. 测绘通报, 2003, 06: 16
- [5] Scott P F, Ryle M. MNRAS, 1977, 178: 539
- [6] Bennett J, Anderson A, McInnes P, et al. ITAP, 1976, 24: 295

- [7] Rochblatt D J. The Telecommunications and Data Acquisition Progress Report, 1992, 108: 235
- [8] Grahl B H, Godwin M P, Schoessow E P. A&A, 1986, 167: 390
- [9] Sali S. EIL, 1988, 24: 132
- [10] Fienup J R. ApOpt, 1982, 21: 2758
- [11] Misell D L. JPhD, 1973, 6: L6
- [12] Morris D. ITAP, 1985, 33: 749
- [13] Morris D, Bremer M, Butin G, et al. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2009, 3: 99
- [14] Liu K K, Ye Q, Meng G X. EIL, 2016, 52: 12
- [15] 孙正雄, 陈岚, 王锦清. 天文学报, 2016, 57: 102
- [16] 王锦清, 虞林峰, 赵融冰, 等. 中国科学G辑, 2014, 44: 1232
- [17] Nikolic B, Hills R E, Richer J S. A&A, 2007, 465: 679
- [18] Rahmat-Samii Y. RaSc, 1984, 19: 1205

## The Research of Phase Retrieval Holography Method Based on the Active Deformation of the Active Reflector Surface

WANG Zhi-qiao<sup>1,2</sup> CHEN Mao-zheng<sup>1</sup> PEI Xin<sup>1</sup> WANG Jun<sup>1,3</sup>

(1 *Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011*)

(2 *School of Physics and Technology, Xinjiang University, Urumqi 830046*)

(3 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*)

**ABSTRACT** The surface accuracy of a large reflector radio telescope is one of the important factors influencing the performance of the antenna. The effects of panel processing, installation, as well as gravity, temperature, and wind load, will greatly limit the observation efficiency of the antenna. Focused on the technology of active surface which is more accurately controllable than the minor reflector surface of six-pole, the continuous distribution of active deformation phase factor described by Zernike polynomials is adopted for the first time. Only getting the far field amplitude through adjusting the active surface, the surface error can be detected. By building the models of numerical simulation, the retrieval error of arbitrary surface deformation is calculated, and the retrieval results of surface deformation in a variety of continuous active surface deformation is also studied. It is indicated that this method can stably and accurately detect surface deformation, and can also improve the efficiency of radio telescope observations effectively.

**Key words** telescopes, methods: data analysis, physical data and processes