

文章编号: 0253-2239(2009)03-0575-07

# 复杂光瞳波前相位恢复算法与实验验证

毛 珩 王 潇 赵达尊

(北京理工大学 信息科学技术学院光电工程系, 北京 100081)

**摘要** 由美国喷气推进实验室提出的 MGS (modified G-S) 算法, 是一种基于迭代 FFT 变换的相位恢复波前传感方法。其中, 多离焦面的使用保证算法迭代解具有唯一性, 多种相位解包裹方法的引入使得算法既有很高的传感精度又有可观的传感动态范围。但当传感非连通域复杂光瞳时, 由于受瞳内遮挡区域的伪包裹相位值影响, 路径无关型解包裹算法失效, 从而导致 MGS 算法迭代失败。为此首先对 MGS 算法做了进一步细节优化, 在此基础上设计出一套普适于非连通域复杂光瞳的路径无关型解包裹算法流程, 它能根据光瞳实际遮挡排布自适应设定最优解包裹步骤和路径。通过搭建实验光路, 验证了该解包裹算法的可行性, 并结合干涉测量对改进 MGS 算法在非连通域复杂光瞳中的波前传感精度做了初步标定。

**关键词** 波前传感; 相位恢复; 相位解包裹; 复杂光瞳; 大动态范围

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092903.0575

## Experimental Validation and Phase Retrieval Algorithm of Complicated Pupil Wavefront

Mao Heng Wang Xiao Zhao Dazun

(Department of Opto-Electronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract** As a preferred wavefront sensing (WFS) method, the modified G-S (MGS) algorithm, which is classified as the iterative-transform algorithm of phase-diverse phase retrieval (PDPR), retrieves the phase distribution at pupil from some known point spread function (PSFs) at defocus planes. By using multiple diversities and proper phase unwrapping methods, this algorithm can produce unique phase estimation within a large dynamic range. But for non-connected pupil, the path-independent phase unwrapping inside MGS is invalid owing to fake value of the points located in obstructed areas of pupil. Some detailed modifications about MGS are given. Then, a modified path-independent phase unwrapping algorithm is proposed based on the principle of least difference phase transition (LDPT), which can automatically optimize unwrapping steps and paths according to the pupil structure. Experiments have been implemented for MGS, and the adaptability of the proposed phase unwrapping algorithm has been validated. Compared with the measurement of interferometer, the WFS accuracy of MGS algorithm is calibrated.

**Key words** wavefront sensing; phase retrieval; phase unwrapping; complicated pupil; large dynamic range

## 1 引 言

相位恢复 (Phase retrieval, PR) 是光波传播的一个求逆问题, 它通过测量光路中特征截面上的光场强度分布来恢复入射光波场的相位分布。最早的相位恢复算法是由剑桥大学学者 Gerchberg 和

Saxton 于 1972 提出的 G-S 算法<sup>[1]</sup>, 它是一种借助傅里叶变换求解的迭代变换算法。紧接着, D. L. Misell 在 1973 年提出利用成像系统两个离焦面的光强分布来唯一恢复瞳面相位分布的思路<sup>[2]</sup>。另一方面, 1976 至 1982 年 R. A. Gonsalves 提出基于参

收稿日期: 2008-06-17; 收到修改稿日期: 2008-09-17

基金项目: 教育部长江学者和创新团队发展计划项目 (IRT0606) 资助课题

作者简介: 毛 珩 (1980—), 男, 博士研究生, 主要从事新型自适应光学波前传感技术方面的研究。

E-mail: alexmaomao@bit.edu.cn

导师简介: 赵达尊 (1939—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事颜色科学、自适应光学、光电信息处理等方面的研究。

E-mail: zhdz@bit.edu.cn

数最优化理论的相位恢复算法<sup>[3~4]</sup>。此后, J. R. Fienup 将多种迭代变换算法同多种参数优化算法做了比较和仿真分析<sup>[5]</sup>。

以上两类相位恢复算法在后来美国学者研究 Hubble 望远镜系统失调像差时都取得了实质性的进展, 分别提出了改进 G-S(MGS)算法和多种参数优化算法<sup>[6~9]</sup>。随后, 美国喷气推进实验室(JPL)在探索下一代空间望远镜(NGST、JWST)的波前传感技术时, 又对 MGS 算法和参数优化算法做了深入研究和完善<sup>[10~11]</sup>。特别是 MGS 算法, 为了突破原有一个波长的测量动态范围, 加入了混合解包裹算法<sup>[12]</sup>。但是, 在对上述大动态 MGS 算法做了仿真研究之后, 发现迭代前期的收敛速度和方向并不十分理想, 还尚待优化。

进一步, 对于非连通域的复杂光瞳(本文中是指一个完整光瞳被光学系统的某些元件或支撑件部分遮挡的情形), 当 MGS 算法中使用路径无关型相位解包裹时, 由于受瞳内遮挡区域点的伪包裹相位值影响, 使得瞳内某些行或列上点的包裹相位无法正确展开, 最终导致算法迭代停滞和失败<sup>[13]</sup>。文献<sup>[13]</sup>提出了一种改进的路径无关型解包裹算法, 它能够有效保持各分块区域内部和相邻分块之间的相位连续性, 确保 MGS 算法迭代的持续收敛。但是, 该解包裹算法对于每种排布的复杂光瞳, 都需事先

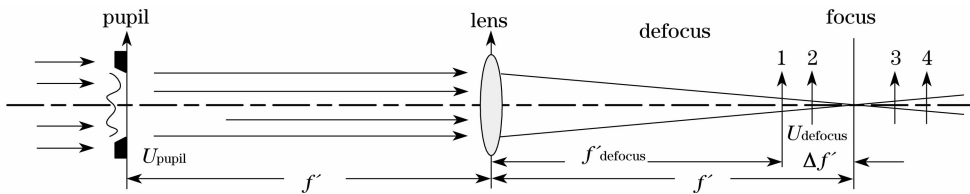


图 1 相位变更-相位恢复模型的光路实现

Fig. 1 Schematic of phase-diverse phase retrieval model

### 3 理想光瞳大动态范围 MGS 算法的若干改进

针对文献<sup>[12]</sup>中提出的理想光瞳大动态范围 MGS 算法尚存在的迭代前期耗时过长, 其收敛速度和收敛方向不理想等问题, 通过深入分析对算法迭代的一些细节做了改进:

1) 最小范数解包裹算法只在迭代早期各相位估计存在留数点时使用, 且必须每历经 4~5 次路径无关型解包裹算法后使用一次, 这样既能有效地抑制留数的再产生, 又不会过度减缓迭代估计的收敛速度。一旦检测到相位估计已无留数或留数点极少

根据光瞳瞳形函数人为参与设置适当的解包裹步骤和路径。

鉴于以上对 MGS 算法研究现状的分析, 本文首先对理想光瞳的大动态 MGS 算法提出了若干细节改进。随后, 延续文献<sup>[13]</sup>中解包裹算法思路, 针对各种不同遮挡排布的非连通域光瞳, 归纳出一套普适的相位解包裹算法流程, 能根据光瞳瞳形函数自适应设定最优解包裹方案。最后, 通过搭建原理实验光路, 分别验证了改进大动态 MGS 算法的可行性, 以及将提出的自适应解包裹算法流程植入 MGS 算法中完成复杂光瞳波前传感的可行性。

## 2 相位变更-相位恢复模型

不同于其它波前传感方法<sup>[14~15]</sup>, 相位恢复方法是一种基于焦面附近光强的间接波前传感技术, 它利用焦面光场与瞳面焦面光场之间的傅里叶变换关系逆解瞳面的波前分布。

为了在引入“离焦形式”的相位变更量后, 算法模型中各离焦面的离散采样间距能保持不变<sup>[16]</sup>, 本算法将根据图 1 所示光路建模。畸变光波射入瞳面后, 通过成像透镜在其后焦面上成像。当引入相位变更量(phase diversity)后, 瞳面光场  $U_{\text{pupil}}$  同离焦距离  $\Delta f'$  面的光场  $U_{\text{defocus}}(\Delta f')$  具有准确傅里叶变换关系。

时, 即表征算法可进入快速收敛期, 此时只需用路径无关型解包裹算法来完成相位估计中局部细节(较高空间频率成分)的收敛逼近。

2) 对原算法中设置的各离焦面相位估计的等权值分配进行了改进: 在实验中多探测一个离焦面(或焦面)作为参考光强面, 此面不参与 G-S 迭代, 仅用于分配权值。具体做法是使用其他各离焦面迭代出的相位计算该参考面的光强分布, 再通过与真实参考光强的相似性来动态地分配各离焦面数据的权值。这一改进在迭代前期能加速向真值的逼近速度, 而在迭代后期只需等权值分配即可。

3) 关于离焦面的优化选取, B. H. Dean<sup>[17]</sup>曾提出针对不同空间频率范围的传感对象选择光强对

比度最大的离焦面。从实际仿真数据中发现, 光强分布相对集中且有理想条纹对比度的离焦面在迭代初期产生的留数较少, 适合迭代初期的轮廓收敛; 光强分布相对分散且为多周期环状、对比度较低的条纹分布的离焦面在迭代初期产生留数较多, 适合迭代后期的局部细节收敛。因此, 在选取离焦面时应注意兼顾具有以上特点的各种点扩散函数(PSF)。

#### 4 非连通域复杂光瞳的大动态 MGS 算法

如前所述, 非连通域复杂光瞳出现在光学系统的光瞳被部分遮挡的情况中, 如图 2 所示, 这种情况在同轴反射系统中经常遇到。此时, 光瞳中各分块的内部和相邻分块之间的波前仍具有连续性。

若将理想光瞳的 MGS 算法(包含第 3 节的算法改进)应用在这类光瞳上, 原有的路径无关型解包裹算法会受到遮挡区域伪包裹相位值的影响, 导致解包裹失败。文献[13]中提出的最小差异相位过渡(LDPT)原则可以保证各分块间相位的连续性, 但相应的解包裹算法需要根据具体瞳形人为设置合适的解包裹步骤和路径。

为此提出一种能够根据光瞳瞳形函数自适应设

置解包裹流程的算法, 其核心思路是: 光瞳内的各分块区域(闭合区域)各自使用路径无关型解包裹, 随后借助 LDPT 原则获得各分块间的相位连续性。下面以图 1 所示的瞳形为例说明其流程和算法实现。

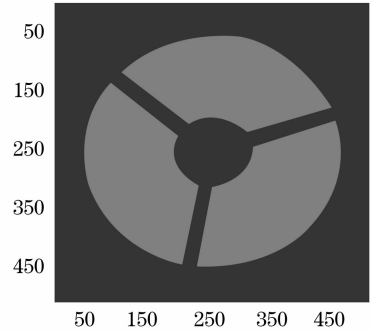


图 2 非连通域复杂光瞳图例

Fig. 2 Outline of non-connected pupil

步骤一: 根据瞳形函数矩阵(0-1 分布, 瞳内为 1, 瞳外为 0), 获取全孔径上所有边缘的轮廓点, 构成轮廓矩阵 Edge\_matrix, 如图 3(a)所示。

步骤二: 从 Edge\_matrix 中分别注册出各分块(i)的边缘轮廓矩阵 Segment\_Edge(i), 这里 i 为分块序号, 并通过各分块的边缘轮廓向内填充, 从而分别注册出各分块的瞳形函数 Segment\_Region(i), 如图 3(b)~(d)所示。

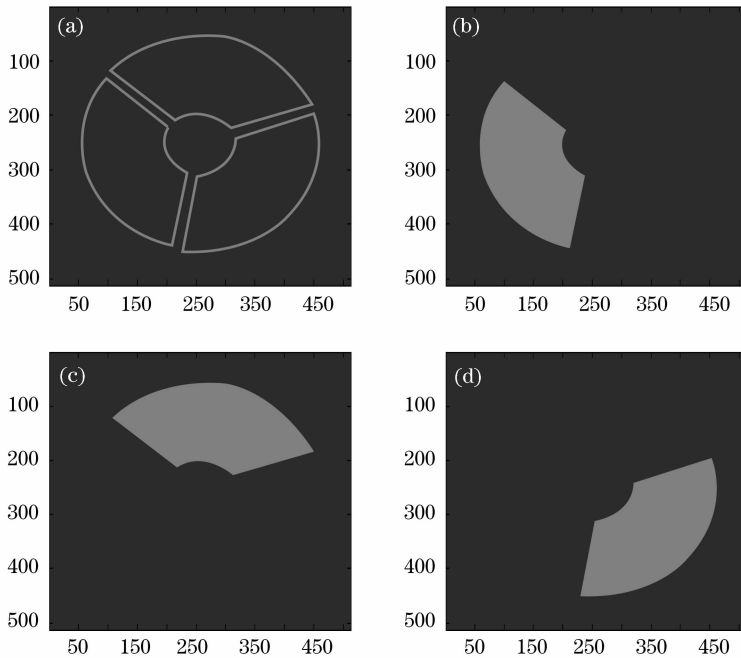


图 3 路径无关型解包裹改进算法的流程示意图(1)

Fig. 3 Modified path-independent phase unwrapping steps (1)

步骤三: 设置对各分块瞳形 Segment\_Region(i)使用的一维解包裹路径和起止方向。其中, 解包裹路

径描述从分块边缘点向分块内部区域是按照行向还是列向完成一维相位解包裹的, 特别地, 当无论是按

照行向或者列向都无法完全覆盖整个分块区域时,则需要分别按行向和列向完成解包裹,实现完全覆盖;而解包裹的起止方向则依据从全光瞳的中心向光瞳外围的原则设置。随后记录对各分块( $i$ )解包裹的设置:使用一个路径旗标  $\text{Flag}_1(i)$ (行向/列向/先行后列/先列后行)和一个起止方向旗标  $\text{Flag}_2(i)$ (向上/向下/向左/向右),见图 4 中各分块的粗箭头方向。

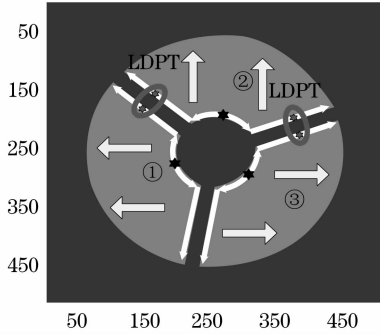


图 4 路径无关型解包裹改进算法的流程示意图(2)

Fig. 4 Modified path-independent phase unwrapping steps (2)

步骤四:在确定了各分块的一维解包裹路径和方向后,需要先对各行(各列)的起始点进行解包裹,因为各行(各列)的起始点在空间排布上紧密相连(见图 4 中各分块内侧边缘细线上的点),解包裹后它们的相位应该是连续的。

具体地,从各分块瞳形  $\text{Segment\_Region}(i)$  中获取各行(列)的起始点坐标,存储为坐标指针  $\text{Segment\_Pointer}(i)$ ,并依次提取出这些起始点的包裹相位值构成一维向量,完成一维解包裹,随后各自替代原有的包裹相位值。进一步,考虑到 MGS 迭代前期包裹相位中留数的大量存在,为尽可能避免留数在这个向量中的不利影响,该向量应采用从中心向两边的解包裹方案(见图 4 中各分块内侧边缘细线上的黑点和箭头方向)。

步骤五:根据  $\text{Flag}_1$ 、 $\text{Flag}_2$  和  $\text{Segment\_Pointer}(i)$ ,对各分块内所有点的包裹相位值完成行向或列向或既行向又列向的一维解包裹。

步骤六:根据 LDPT 原则实现各分块之间的相位连续性。具体地,将注册的第一个分块( $i=1$ )标记为起始分块,找到与之相邻的某一个分块标记为第二分块,分别取出这两个分块的边缘起始点坐标指针  $\text{Segment\_Pointer}(1)$  和  $\text{Segment\_Pointer}(2)$ ,由于这些起始点都位于各分块的内侧边缘线上,容易找到位于不同分块且距离最近的两个点的坐标。然后,对于这两点的解包裹值运用 LDPT 原则求出相位的跳变量,继而对第二分块的相位做整体平移,以实现与第一分块间的相位连续性。随后,找到与第二分块相邻的另一个分块标记为第三分块,重复以上步骤以达到第三分块与前两分块的相位连续,如此重复,直至所有分块均完成基于 LDPT 原则的相位连续,如图 4 中两椭圆圈所示。

至此,整个非连通域复杂光瞳的路径无关型解包裹算法完成。将其替换理想光瞳大动态 MGS 算法中原有的路径无关型解包裹算法,即得到适用于非连通域复杂光瞳的大动态 MGS 算法。

## 5 原理实验验证

图 5 为基于相位恢复算法的原理实验系统布局图,其中将 670 nm 半导体激光器(LD,含 CW 模式和 TTL 模式)的单模尾纤输出端固定于 FC/PC 型光纤调整架上作为点光源,整个系统采用透射式光路。点光源经透镜  $L_1$  准直,再经相位板(可移入/移出)引入畸变波前。该相位板紧贴一个位于透镜  $L_2$  前焦面并决定了入瞳位置的圆形光阑放置。当光波通过透镜  $L_2$  之后,选用 Andor 公司科学级背照 CCD 相机(像元尺寸  $13 \mu\text{m}$ , 16 bit, 半导体制冷  $-60^\circ$ , 读出噪声均方根在 2.5 MHz 像素读出速度下为  $10e^-$ )探测  $L_2$  后焦面及其附近的 PSF 分布,并由其同步控制 LD 的出光时序。此外,为获得实际瞳面的光强分布,使用透镜  $L_3$ (可移入/移出)实现瞳面与  $L_2$  后焦面的共轭。由于要求精确定位和复位,系统中使用了两台小行程、高精度的电动位移台,分别实现 CCD 的离焦面平移和透镜  $L_3$  的移入/移出。

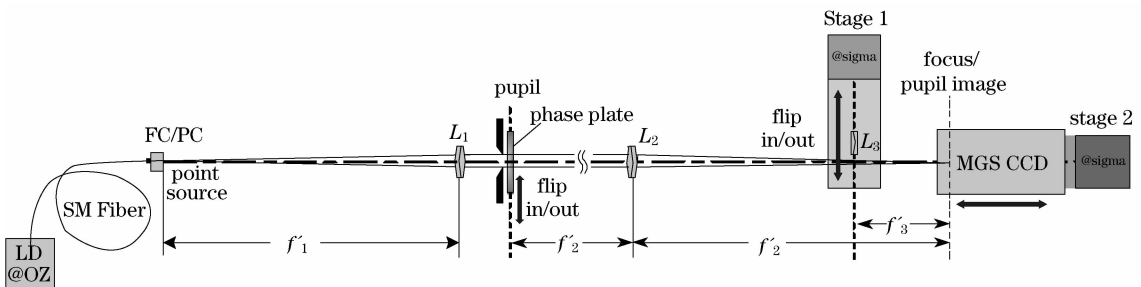


图 5 实验光路的系统布局

Fig. 5 Layout of experimental setup

在算法模型中,光瞳矩阵和离焦面光强矩阵大小均设为  $512 \times 512$ ,由光瞳通光口径、透镜  $L_2$  焦距和 FFT 变换关系可计算,相对  $13 \mu\text{m}$  的像空间采样间隔,光瞳矩阵中的实际采样间距约为  $0.05 \text{ mm}$ (光瞳径向上约 400 点),一般可满足被测波前的 Nyquist 采样要求。

### 5.1 实验步骤

步骤一,在不引入相位畸变(无相位板)的情况下,完成一次 MGS 算法所需的瞳面和多个离焦面(或焦面)光强测量,并使用 MGS 算法恢复出瞳面波前分布,完成整个实验光路的系统误差在瞳面上的标定。

步骤二,引入相位畸变,并在光瞳边缘处作方位标记,随后在不同时刻(重复地)完成 MGS 算法所需的各面光强测量,恢复出瞳面总的波前畸变量,从中扣除步骤一标定出的系统误差,获得被测相位板的波前畸变量。

步骤三,将相位板连同夹持模块整体从光路中取出,用 Zygo 干涉仪测量面形分布。为与步骤二的相位恢复数据匹配,需对 Zygo 干涉仪输出的测

量数据进行对心、缩放插值、修边、剔除整体倾斜(tip/tilt)、转换工作波长和方位角误差补偿等处理,以获得 MGS 算法传感与 Zygo 干涉测量之间的波前差异分布,评估传感精度。

### 5.2 理想光瞳的 MGS 算法实验结果

图 6 为使用一个未知相位板时的实验结果(图中灰度标尺单位均为波长):图 6(a)为 MGS 算法恢复出的被测波前分布,其 PV 为  $6.8858\lambda$ ,RMS 为  $1.6513\lambda$ ;图 6(b)为剔除了(a)中全口径倾斜量后的波前分布,其 PV 为  $1.9060\lambda$ ,RMS 为  $0.4056\lambda$ ;图 6(c)为 Zygo 干涉测量的波前分布,其中已剔除整体倾斜并校正了  $-1.125$  度的方位角误差,其 PV 为  $1.8684\lambda$ ,RMS 为  $0.4003\lambda$ ;图 6(d)为 MGS 传感结果(b)相对于 Zygo 测量结果(c)的波前差异分布,其 PV 为  $0.2347\lambda$ ,RMS 为  $0.0478\lambda$ ;图 6(e)为不同时刻重复测量后 MGS 传感出的一个任选结果,其 PV 为  $1.9080\lambda$ ,RMS 为  $0.4055\lambda$ ;图 6(f)为图 6(b)与图 6(e)的波前差异分布,其 PV 为  $0.0327\lambda$ ,RMS 为  $0.0047\lambda$ 。

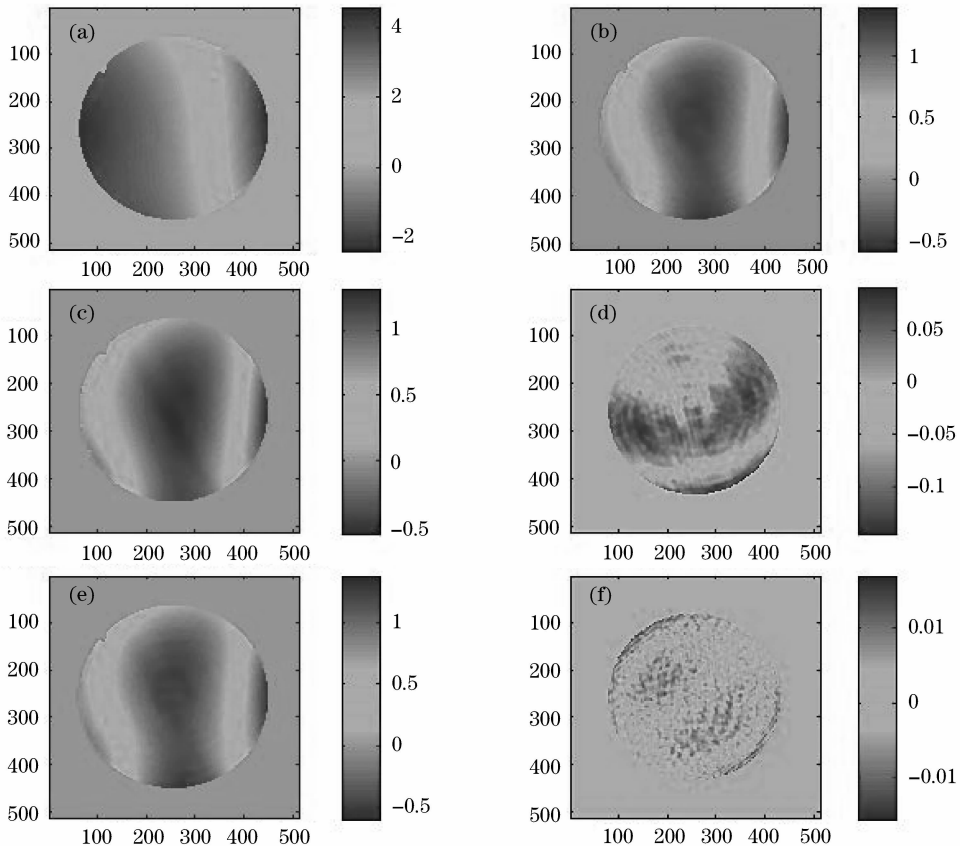


图 6 理想光瞳 MGS 算法的实验结果

Fig. 6 Experimental results of MGS on circular pupil

随后,对不同时刻测量数据的 MGS 传感结果(总共经历了 8 次不同时刻的重复测量)进行统计分析,数据如表 1 所示。首先,获得各传感结果相对于  $z_{\text{ygo}}$  测量结果的差异分布 PV 和 RMS 值(见表 1 中

“PV ( $z_{\text{ygo}}$ )”行和“RMS ( $z_{\text{ygo}}$ )”行);其次,计算出各传感结果的平均波面分布,由此获得各传感结果关于平均波面的误差分布 PV 和 RMS 值(见表 1 中“PV (Mean)”行和“RMS (Mean)”行)。

表 1 理想光瞳使用 MGS 算法的重复传感结果  
Table 1 Differences between repeated MGS sensing results

Differences / $\lambda$	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8
PV (Zygo)	0.2347	0.2442	0.2126	0.2304	0.2346	0.2187	0.2177	0.2192
RMS (Zygo)	0.0478	0.0491	0.0441	0.0477	0.0478	0.0454	0.0446	0.0453
PV (Mean)	0.0261	0.0411	0.0368	0.0192	0.0258	0.0234	0.0265	0.0304
RMS (Mean)	0.0034	0.0065	0.0052	0.0028	0.0033	0.0032	0.0038	0.0043

可见,对于该相位板样品,MGS 传感出的波前分布(包括倾斜模式)PV 值达到  $6.9\lambda$ ,MGS 算法的波前传感精度 RMS 值优于  $\lambda/20$ ,同时 MGS 算法传感的重复精度明显优于  $\lambda/100$ 。

### 5.3 非连通域复杂光瞳的 MGS 算法实验

使用如图 1 形状的光阑遮挡原有理想光瞳,构造出一个具体的非连通域复杂光瞳。换用另一个未知相位板,实验中拍摄的多个离焦光强数据如图 7 所示,其中灰度标尺为 CCD 输出数值。

其 MGS 算法传感和 Zygo 测试结果如图 8 所示,各图含义同于图 6。其中,某次 MGS 传感结果的波前分布 PV 为  $7.2282\lambda$ ,RMS 为  $1.7469\lambda$ ;剔除全口径倾斜后波前分布 PV 为  $3.9989\lambda$ ,RMS 为  $0.9851\lambda$ ;该次 MGS 传感结果相对于 Zygo 测量结果的差异分布 PV 为  $0.1932\lambda$ ,RMS 为  $0.0257\lambda$ ;该次 MGS 传感结果相对于另一次重复测量结果的波前差异分布 PV 为  $0.0322\lambda$ ,RMS 为  $0.0055\lambda$ 。同样,对 MGS 算法的重复传感结果也进行统计分析,

数据如表 2 所示(该样品总共经历了 6 次不同时刻的重复测量)。

可见,对于非连通域下的本样品,MGS 传感出的波前分布(包括倾斜模式)PV 值达到  $7.2\lambda$ ,MGS 算法的波前传感精度 RMS 值优于  $\lambda/30$ ,同时 MGS 算法传感的重复精度仍明显优于  $\lambda/100$ 。

实验中,还通过旋转或平移遮挡光阑来改变非连通域复杂光瞳的遮挡排布,以此验证本文提出的改进解包裹算法的自适应性。结果表明,这些情况下的 MGS 算法传感结果(精度和重复精度)均与图 8 和表 2 中所示一致。

分析图 6(d)和图 8(d)所示的 MGS 传感同  $z_{\text{zygo}}$  测量结果之间的波前误差分布,不难看出其中都存在着某些低阶误差。这些低阶模式误差完全被归入 MGS 算法的实际传感误差是不合理的,因为其中很大一部分应当属于待标定的、不随被测样品波前变化的 MGS 算法固有误差。对 MGS 波前传感误差各成份的剖析和分离工作将在今后深入展开。

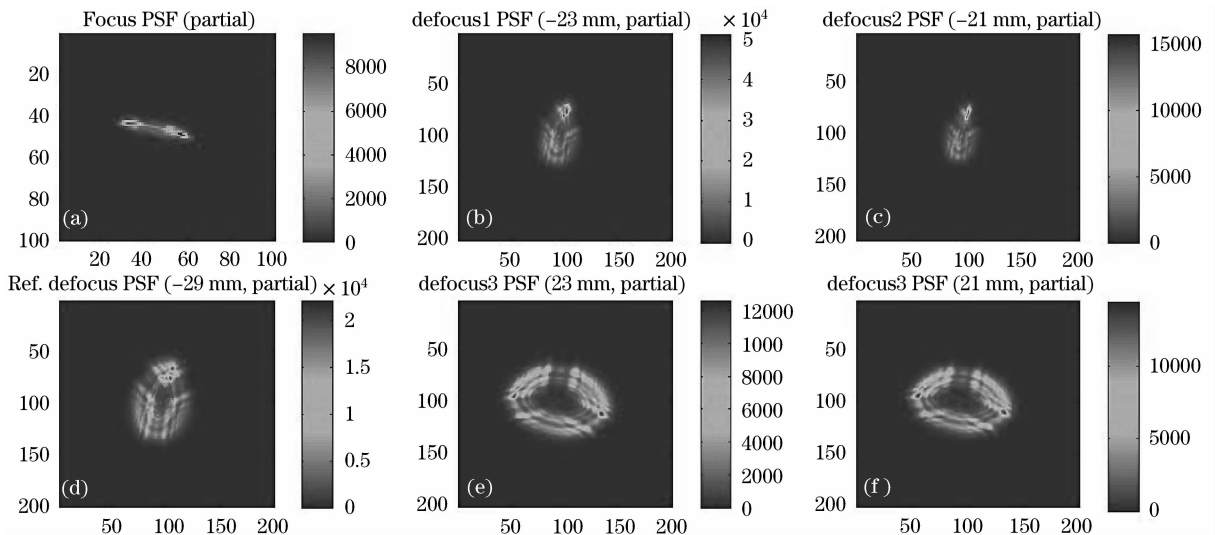


图 7 多个离焦面的光强分布

Fig. 7 Measured intensity distributions on different defocus planes

表 2 非连通复杂光瞳使用 MGS 算法的重复传感结果  
Table 2 Differences between repeated MGS sensing results

Differences / $\lambda$	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6
PV (Zygo)	0.1932	0.2130	0.1988	0.2017	0.1948	0.2067
RMS (Zygo)	0.0257	0.0265	0.0263	0.0259	0.0252	0.0260
PV (Mean)	0.0245	0.0282	0.0248	0.0195	0.0202	0.0184
RMS (Mean)	0.0037	0.0049	0.0028	0.0023	0.0021	0.0019

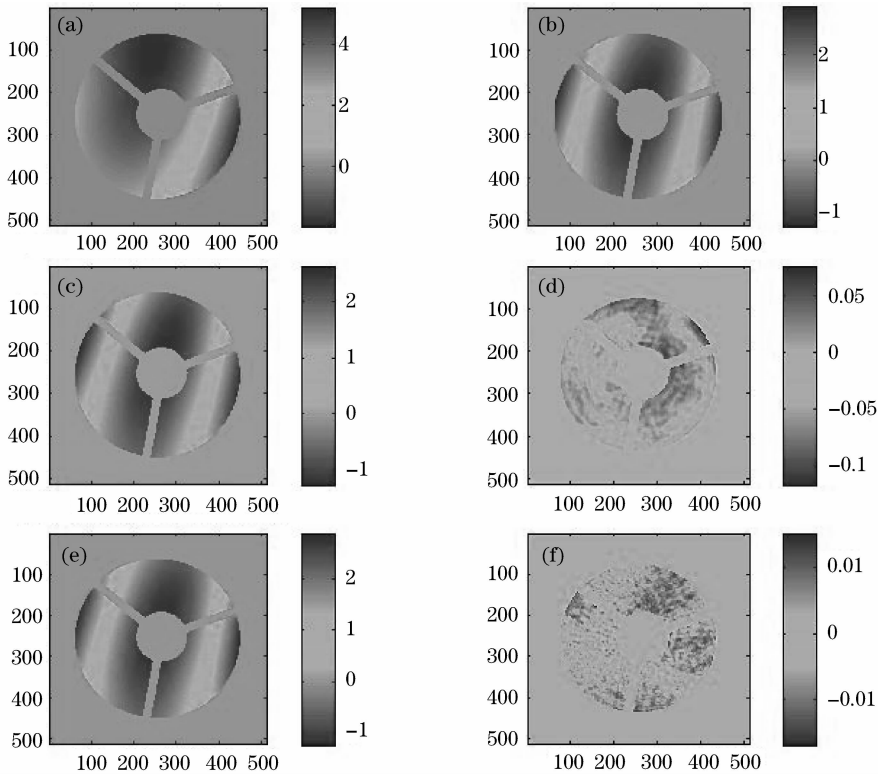


图 8 非连通域复杂光瞳 MGS 算法的实验结果

Fig. 8 Experimental results of MGS on non-connected pupil

## 6 结 论

文献[13]提出的路径独立型解包裹改进算法虽可用于不同遮挡排布的非连通域复杂光瞳,但不能自动设定解包裹路径,对每种排布都需人为干预。本文设计了一套具有普适性的路径独立型解包裹算法流程。之后,通过搭建原理实验光路,验证了该算法流程的自适应性。此外,通过实验得出结论,基于MGS算法的波前传感方法,无论对于圆光瞳还是非连通域的复杂光瞳,在优化其中的相位解包裹算法后,都能具有大动态范围(可达 $7\sim 8\lambda$ )、较高传感精度(优于 $\lambda/20$ )和高重复精度(优于 $\lambda/100$ )的优点。

## 参 考 文 献

- 1 R. W. Gerchberg, W. O. Saxton. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures [J]. *Optik*, 1972, **35**(2): 237~246
- 2 D. L. Misell. A method for the solution of the phase problem in electron microscopy[J]. *J. Phys.*, 1973, **6**: L6~L9
- 3 R. A. Gonsalves. Phase retrieval from modulus data [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1976, **66**(9): 961~964
- 4 R. A. Gonsalves. Phase retrieval and diversity in adaptive optics [J]. *Opt. Eng.*, 1982, **21**(5): 829~832
- 5 J. R. Fienup. Phase retrieval algorithms: a comparison [J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(15): 2758~2769
- 6 C. Roddier, F. Roddier. Combined approach to the Hubble Space Telescope wavefront distortion analysis [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(16): 2992~3008

- 7 J. R. Fienup. Phase-retrieval algorithms for a complicated optical system [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(10): 1737~1746
- 8 J. R. Fienup, J. C. Marron, T. J. Schulz, *et al.*. Hubble Space Telescope characterized by using phase retrieval algorithms [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(10): 1747~1767
- 9 D. C. Redding, P. Dumont, Jeff Yu. Hubble Space Telescope prescription retrieval [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(10): 1728~1736
- 10 D. C. Redding S. A. Basinger, A. E. Lowman *et al.*. Wavefront sensing and control for a Next Generation Space Telescope [C]. *SPIE*, 1998, **3356**: 758~772
- 11 D. S. Acton P. D. Atechesan, M. Cermak *et al.*. James Webb Space Telescope wavefront sensing and control algorithms [C]. *SPIE*, 2004, **5487**: 887~896
- 12 D. Cohen, D. C. Redding. NGST high dynamic range unwrapped phase estimation [C]. *SPIE*, 2003, **4850**: 336~344
- 13 Heng Mao, Xiao Wang, Dazun Zhao. Application of phase-diverse phase retrieval to wavefront sensing in non-connected complicated pupil optics [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(7): 397~399
- 14 Hu Xinqi, Yu Xin, Zhao Dazun. Influence of scene structure and noise on precision of correlating Hartmann-Shank wavefront sensing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1414~1418
- 15 胡新奇, 俞 信, 赵达尊. 目标图像结构和噪声对相关哈特曼-夏克波前传感精度的影响 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(8): 1414~1418
- 16 Wang Xiao, Mao Heng, Zhao Dazun. Phase retrieval based on intensity transport equation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(12): 2117~2122
- 17 王 潇, 毛 珩, 赵达尊. 基于光强传播方程的相位恢复 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(12): 2117~2122
- 16 G. R. Brady, J. R. Fienup. Nonlinear optimization algorithm for retrieving the full complex pupil function [J]. *Opt. Exp.*, 2006, **14**(2): 474~486
- 17 B. H. Dean, C. W. Bowers. Diversity selection for phase-diverse phase retrieval [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2003, **20**(8): 1490~1504