



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102589720 B

(45) 授权公告日 2014. 01. 01

(21) 申请号 201210072934. 7

(22) 申请日 2012. 03. 19

(73) 专利权人 中国科学院光电技术研究所  
地址 610209 四川省成都市双流 350 信箱

(72) 发明人 马晓燮 母杰 饶长辉 饶学军

(74) 专利代理机构 北京科迪生专利代理有限责  
任公司 11251

代理人 成金玉 卢纪

(51) Int. Cl.

G01J 9/00 (2006. 01)

G01J 1/00 (2006. 01)

审查员 朱磊

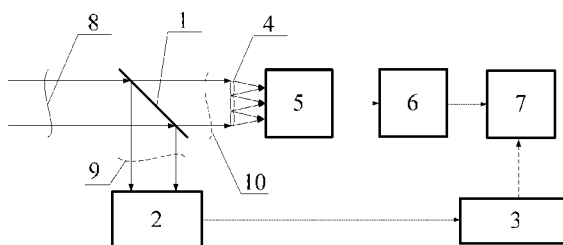
权利要求书1页 说明书5页 附图3页

(54) 发明名称

一种适用于非均匀光照明的哈特曼波前测量仪

(57) 摘要

一种适用于非均匀光照明的哈特曼波前测量仪,包括分光镜、光强分布测量仪、重构矩阵计算器、微透镜阵列、CCD 相机、斜率计算器和波前重构器;光强分布测量仪首先测量出入射波前的光功率密度,重构矩阵计算器根据入射波前的光功率密度和所需复原像差的类型计算得到重构矩阵,斜率计算器根据 CCD 相机采集得到的光斑阵列计算得到被测波前的斜率向量,波前重构器根据斜率向量和重构矩阵计算得到被测波前。本发明改进了哈特曼波前传感器采用模式法波前复原过程中重构矩阵的计算方法,提高了当入射光强不均匀时,重构矩阵算法中波前斜率的计算精度,为高精度复原非均匀照明条件下的入射波前提供了核心解决方案。



1. 一种适用于非均匀光照明的哈特曼波前测量仪,其特征在于包括:分光镜(1)、光强分布测量仪(2)、重构矩阵计算器(3)、微透镜阵列(4)、CCD 相机(5)、斜率计算器(6)和波前重构器(7);入射波前(8)经分光镜(1)后分为波前能量测量部分(9)和波前斜率测量部分(10);波前能量测量部分(9)进入光强分布测量仪(2),光强分布测量仪(2)测量入射波前(8)的光功率密度并将光功率密度数据传递给重构矩阵计算器(3),重构矩阵计算器(3)根据入射波前(8)的光功率密度和所需复原像差的类型计算得到重构矩阵送至波前重构器(7);波前斜率测量部分(10)经微透镜阵列(4)分割后在 CCD 相机(5)处形成光斑阵列,CCD 相机(5)采集得到的光斑阵列的图像后传递给斜率计算器(6)计算得到被测波前(8)的斜率向量送至波前重构器(7);最后波前重构器(7)根据斜率向量和重构矩阵计算得到被测波前(8)的相位分布;

所述重构矩阵计算器(3)根据入射波前(8)的光功率密度和所需复原像差的类型计算得到重构矩阵的过程为:

(a) 给每个有效的子孔径指定一个编号;

(b) 计算第 k 项泽尼克像差在编号为 m 的子孔径处在 x 方向和 y 方向的斜率  $Z_{xk}(m)$  和  $Z_{yk}(m)$ ,  $Z_{xk}(m)$  和  $Z_{yk}(m)$  的计算公式为:

$$\begin{cases} Z_{xk}(m) = \frac{\iint_S I(x,y) \frac{\partial Z_k(x,y)}{\partial x} dx dy}{S \cdot \iint_S I(x,y) dx dy} \\ Z_{yk}(m) = \frac{\iint_S I(x,y) \frac{\partial Z_k(x,y)}{\partial y} dx dy}{S \cdot \iint_S I(x,y) dx dy} \end{cases}$$

其中:  $Z_k(x,y)$  为第 k 项泽尼克多项式,  $I(x,y)$  为被测波前(8)的光强分布表达式,由光强分布测量仪测量(2)得到, S 为单个子孔径的面积;

(c) 当哈特曼波前传感器的有效子孔径总数为 M, 所需复原的泽尼克像差数为 K 时,将步骤(b)中计算得到的  $Z_{xk}(m)$  和  $Z_{yk}(m)$  排列为如下的形式,得到复原矩阵 D:

$$D = \begin{bmatrix} Z_{x1}(1) & Z_{x2}(1) & \dots & Z_{xK}(1) \\ Z_{y1}(1) & Z_{y2}(1) & \dots & Z_{yK}(1) \\ Z_{x1}(2) & Z_{x2}(2) & \dots & Z_{xK}(2) \\ Z_{y1}(2) & Z_{y2}(2) & \dots & Z_{yK}(2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{x1}(M) & Z_{x2}(M) & \dots & Z_{xK}(M) \\ Z_{y1}(M) & Z_{y2}(M) & \dots & Z_{yK}(M) \end{bmatrix};$$

(d) 求复原矩阵 D 的逆矩阵  $D^+$ ,  $D^+$  即为所需的重构矩阵。

## 一种适用于非均匀光照明的哈特曼波前测量仪

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种自适应光学中应用的哈特曼波前测量仪,特别是一种适用于非均匀光照明的哈特曼波前测量仪。

### 背景技术

[0002] 哈特曼波前传感器以其较高的测量实时性、合适的测量精度等特性,最早应用在天文自适应光学中。随着科学技术的发展,哈特曼波前传感器由于其结构简单、原理直白而作为一种精密的波前测量仪器广泛应用于在镜面面型检测、激光参数诊断、流场 GT 重建、人眼像差诊断、光路准直等方面。哈特曼波前传感器一般由微透镜和 CCD 相机组成,是一种以波前斜率测量为基础的波前测量仪器。

[0003] 哈特曼波前传感器在工作时,微透镜阵列将被检测波面分成若干个采样单元,这些采样单元分别由高质量透镜汇聚在分离的焦点上,然后用 CCD 相机接收。每个子孔径范围内的波前倾斜将造成其光斑的在 x 和 y 方向上的位移,光斑的质心在 x 和 y 方向上的偏离程度反映了对应采样单元波面在两个方向上的波前斜率。在泽尼克模式波前复原算法中,复原波前的泽尼克系数是通过波前斜率向量与重构矩阵相乘后得到的,所以重构矩阵的计算方法越正确,复原波前的误差也就越小。

[0004] 传统的哈特曼波前传感器重构矩阵计算方法都是基于被测波前的光强为均匀分布,此时哈特曼波前传感器上单个子孔径内质心的偏移量正比于该子孔径内波前的平均斜率 (HARDY JW, Adaptive optics for astronomical telescope[M].Oxford University Press,1998);然而在实际应用中,被测波前的光强通常为非均匀分布,此时哈特曼波前传感器上单个子孔径内质心的偏移量不但与该子孔径内波前的平均斜率有关,还与该子孔径内光强的分布有关,所以此时如果仍采用传统的波前平均斜率计算方法来计算重构矩阵,复原波前的误差就会较大,不利于哈特曼波前传感器应用在高精度波前测量中。

[0005] 由于有了上述问题的存在,如何改进哈特曼波前传感器在非均匀照明时重构矩阵的计算方法,从而提高哈特曼波前传感器在非均匀照明时的波前复原精度,就成为了一个很重要的研究课题。

### 发明内容

[0006] 本发明的技术解决问题是:克服现有技术的不足,提供一种适用于非均匀光照明的哈特曼波前测量仪,提高了波前复原的精度。

[0007] 本发明的技术解决方案是:一种适用于非均匀光照明的哈特曼波前测量仪,其特征在于包括:分光镜、光强分布测量仪、重构矩阵计算器、微透镜阵列、CCD 相机、斜率计算器和波前重构器;入射波前经分光镜后分为波前能量测量部分和波前斜率测量部分;波前能量测量部分进入光强分布测量仪,光强分布测量仪测量入射波前的光功率密度并将光功率密度数据传递给重构矩阵计算器,重构矩阵计算器根据入射波前的光功率密度和所需复原像差的类型计算得到重构矩阵送至波前重构器;波前斜率测量部分经微透镜阵列分割后

在 CCD 相机处形成光斑阵列, CCD 相机采集得到的光斑阵列的图像后传递给斜率计算器计算得到被测波前的斜率向量送至波前重构器;最后波前重构器根据斜率向量和重构矩阵计算得到被测波前的相位分布。

[0008] 所述重构矩阵计算器根据入射波前的光功率密度和所需复原像差的类型计算得到重构矩阵的过程为:

[0009] (a) 给每个有效的子孔径指定一个编号;

[0010] (b) 计算第  $k$  项泽尼克像差在编号为  $m$  的子孔径处在  $x$  方向和  $y$  方向的斜率  $Z_{xk}(m)$  和  $Z_{yk}(m)$ ,  $Z_{xk}(m)$  和  $Z_{yk}(m)$  的计算公式为:

$$[0011] \quad \begin{cases} Z_{xk}(m) = \frac{\iint_S I(x, y) \frac{\partial Z_k(x, y)}{\partial x} dx dy}{S \cdot \iint_S I(x, y) dx dy} \\ Z_{yk}(m) = \frac{\iint_S I(x, y) \frac{\partial Z_k(x, y)}{\partial y} dx dy}{S \cdot \iint_S I(x, y) dx dy} \end{cases}$$

[0012] 其中:  $Z_k(x, y)$  为第  $k$  项泽尼克多项式,  $I(x, y)$  为被测波前的光强分布表达式, 由光强分布测量仪测量得到,  $S$  为单个子孔径的面积;

[0013] (c) 当哈特曼波前传感器的有效子孔径总数为  $M$ , 所需复原的泽尼克像差数为  $K$  时, 将步骤 (b) 中计算得到的  $Z_{xk}(m)$  和  $Z_{yk}(m)$  排列为如下的形式, 得到复原矩阵  $D$ :

$$[0014] \quad D = \begin{bmatrix} Z_{x1}(1) & Z_{x2}(1) & \dots & Z_{xK}(1) \\ Z_{y1}(1) & Z_{y2}(1) & \dots & Z_{yK}(1) \\ Z_{x1}(2) & Z_{x2}(2) & \dots & Z_{xK}(2) \\ Z_{y1}(2) & Z_{y2}(2) & \dots & Z_{yK}(2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{x1}(M) & Z_{x2}(M) & \dots & Z_{xK}(M) \\ Z_{y1}(M) & Z_{y2}(M) & \dots & Z_{yK}(M) \end{bmatrix};$$

[0015] (d) 求复原矩阵  $D$  的逆矩阵  $D^+$ ,  $D^+$  即为所需的重构矩阵。

[0016] 本发明的原理是: 在哈特曼波前传感器内部加装光强分布测量仪和重构矩阵计算器, 其中光强分布测量仪用于测量被测波前的光强分布, 重构矩阵计算器根据入射波前的光强分布和所需复原像差的类型计算重构矩阵, 修正了传统重构矩阵计算方法中没有考虑光强影响而带来的重构矩阵计算误差, 从而提高了波前复原的精度。

[0017] 本发明与现有技术相比有如下优点:

[0018] (1) 传统的基于模式复原算法的哈特曼波前传感器在计算重构矩阵时, 采用的是平均斜率法计算单个子孔径内波前的斜率分布, 然而平均斜率法的默认条件是被测波前的光强为均匀分布, 在实际应用中, 被测波前的光强有可能是非均匀分布的, 此时单个子孔径内波前的斜率不等于平均斜率, 采用传统的重构矩阵算法得到的重构矩阵与被测波前的斜率向量相乘得到的复原波前的误差较大。本发明采用了将波前的光强分布与波前相位分布相结合的方法计算重构矩阵, 修正了传统重构矩阵计算方法中没有考虑光强影响而带来的

重构矩阵计算误差,提高了波前复原的精度。

[0019] (2) 当哈特曼波前传感器用于测量光强分布不均匀的被测波前时,本发明在原理上与传统技术完全一致,仅需要修改重构矩阵的算法,技术改造成本低。

附图说明

- [0020] 图 1 为本发明的哈特曼波前传感器示意图;
- [0021] 图 2 为实施例中子孔径排列及编号示意图;
- [0022] 图 3 为实施例中入射光功率密度图;
- [0023] 图 4 为实施例中非均匀光照明下光斑阵列图像;
- [0024] 图 5 为实施例中被测波前示意图;
- [0025] 图 6 为采用传统的重构矩阵算法计算得到的复原波前误差和采用本发明的新重构矩阵算法计算得到的复原波前误差曲线图;
- [0026] 图中 :1 :分光镜 2 :光强分布测量仪 3 :重构矩阵计算器 4 :微透镜阵列 5 :CCD 相机 6 :斜率计算器 7 :波前重构器 8 :被测波前 9 :波前能量测量部分 10 :波前斜率测量部分。

具体实施方式

[0027] 在本实施例中,本发明中所采用的哈特曼波前传感器的子孔径阵列数为 10x10,子孔径排布及编号方式如图 2 所示,需要复原的前 25 项泽尼克像差。被测波前 8 的光强分布为如图 3 所示的高斯光强分布;被测波前 8 的像差类型为离焦像差,离焦量为  $\lambda/4$ ,如图 5 所示。CCD 相机 5 满量程为 4095ADU(12 位)、噪声的均方根值为 20ADU、单个子孔径的尺寸为 1mmx1mm。

[0028] 本实施例中采用的 Zernike 多项式的表达式为:

$$\begin{cases}
 Z_{evenk}(r, \theta) = \sqrt{2(n+1)}R_a^b(r) \cos(m \cdot \theta) \\
 Z_{oddk}(r, \theta) = \sqrt{2(n+1)}R_a^b(r) \sin(m \cdot \theta)
 \end{cases} \dots\dots\dots b \neq 0$$

$$\begin{cases}
 Z_k(r, \theta) = \sqrt{2(n+1)}R_a^0(r) \dots\dots\dots b = 0
 \end{cases} \dots\dots\dots (1)$$

$$R_a^b(r) = \sum_{s=0}^{(b-a)/2} \frac{(-1)^s (a-s)!}{s! [(a+b)/2-s]! [(a-b)/2-s]!} r^{(a-2s)}$$

$$b \leq a, a - |b| = \text{even}$$

[0030] 其中 :k 是多项式的阶数 ;r、 $\theta$  分别是多项式在极坐标内的径向位置和角向位置 ;a、b 分别是多项式的径向频率和角向频率。

[0031] 如图 1 所示,入射波前 8 经分光镜 1 后分为波前能量测量部分 9 和波前斜率测量部分 10 ;波前能量测量部分 9 进入光强分布测量仪 2 中 ;波前斜率测量部分 10 经微透镜阵列 4 分割后在 CCD 相机 5 处形成光斑阵列。

[0032] 采用本发明复原被测波前 8 的过程为 :

[0033] 1) 光强分布测量仪 2 测量被测波前 8 的光功率密度,如图 3 所示,得到被测波前 8 的光功率密度表达式  $I(x, y)$  ;

[0034] 2) 重构矩阵计算器 3 按图 3 中的编号依次计算第 1 项至第 25 项泽尼克像差在每个子孔径内 x 方向上和 y 方向上的斜率 ;

[0035] 第  $k$  项泽尼克像差在编号为  $z$  的子孔径处  $x$  方向和  $y$  方向上的斜率  $Z_{xk}(m)$  和  $Z_{yk}(m)$  的计算公式为：

$$[0036] \begin{cases} Z_{xk}(m) = \frac{\iint_s I(x, y) \frac{\partial Z_k(x, y)}{\partial x} dx dy}{S \cdot \iint_s I(x, y) dx dy} \\ Z_{yk}(m) = \frac{\iint_s I(x, y) \frac{\partial Z_k(x, y)}{\partial y} dx dy}{S \cdot \iint_s I(x, y) dx dy} \end{cases} \quad (2)$$

[0037] 其中： $Z_k(x, y)$  为第  $k$  项泽尼克多项式， $I(x, y)$  为被测波前 8 的光强分布表达式， $S$  为单个子孔径的面积。

[0038] 3) 重构矩阵计算器 3 将 (2) 中计算得到的结果排列为如下形式得到复原矩阵  $D$ ：

$$[0039] D = \begin{bmatrix} Z_{x1}(1) & Z_{x2}(1) & \dots & Z_{x25}(1) \\ Z_{y1}(1) & Z_{y2}(1) & \dots & Z_{y25}(1) \\ Z_{x1}(2) & Z_{x2}(2) & \dots & Z_{x25}(2) \\ Z_{y1}(2) & Z_{y2}(2) & \dots & Z_{y25}(2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{x1}(76) & Z_{x2}(76) & \dots & Z_{x25}(76) \\ Z_{y1}(76) & Z_{y2}(76) & \dots & Z_{y25}(76) \end{bmatrix} \quad (3)$$

[0040] 重构矩阵计算器 3 计算复原矩阵  $D$  的逆矩阵  $D^+$ ，从而得到重构矩阵  $D^+$ 。

[0041] 4) 斜率计算器 6 计算 CCD 相机 5 采集得到的光斑阵列（如图 4 所示）的质心，子孔径  $m$  处光斑质心的计算公式为：

$$[0042] x_c(m) = \frac{\sum_{ij}^{L,M} x_{ij} g_{ij}}{\sum_{ij} g_{ij}}, y_c(m) = \frac{\sum_{ij}^{L,M} y_{ij} g_{ij}}{\sum_{ij} g_{ij}} \quad (4)$$

[0043] 其中， $x_c(m)$ 、 $y_c(m)$  是子孔径  $z$  处光斑在  $x$  方向和  $y$  方向的质心位置； $x_{ij}$ 、 $y_{ij}$  为像素位置； $g_{ij}$  子孔径内坐标为  $(i, j)$  处的像素点的灰度值； $L, M$  是子孔径窗口大小，单位是像素。

[0044] 5) 将计算得到的质心阵列转换为斜率向量  $G$ ：

[0045] 质心阵列转换为斜率阵列的计算公式为：

$$[0046] G_x(m) = x_c^{(m)}/f, G_y(m) = y_c^{(m)}/f \quad (5)$$

[0047] 其中， $G_x(m)$ 、 $G_y(m)$  分别是被测波前在子孔径  $z$  处  $x$  方向和  $y$  方向的斜率， $f$  是微透镜阵列 4 中单个微透镜的焦距。

[0048] 最后将斜率阵列排列为如下形式得到入射波前 8 的斜率向量  $G$ ：

$$[0049] G = [G_x(1), G_y(1), G_x(2), G_y(2), \dots, G_x(76), G_y(76)]' \quad (6)$$

[0050] 6) 波前重构器 7 利用重构矩阵  $D^+$  和斜率向量  $G$  通过下式计算得到复原波前的 Zernike 向量  $A$  从而得到复原波前。

[0051]  $A = D^+G$  (7)

[0052] 传统的波前复原过程中,没有考虑被测波前 8 的光功率分布对 CCD 相机 5 处光斑阵列质心位置的影响,因此不需要第 1 步测量被测波前 8 的光功率分布,并且在第 2 步中编号为 m 的子孔径内 x 方向上和 y 方向上的斜率的计算公式为:

$$[0053] \begin{cases} Z'_{xk}(m) = \frac{\iint_S \frac{\partial Z_k(x,y)}{\partial x} dx dy}{S} \\ Z'_{yk}(m) = \frac{\iint_S \frac{\partial Z_k(x,y)}{\partial y} dx dy}{S} \end{cases} \quad (8)$$

[0054] 其中: $Z'_{xk}(m)$ 、 $Z'_{yk}(m)$  分别是编号为 m 的子孔径内 x 方向上和 y 方向上的斜率; $S$  是单个子孔径的面积。

[0055] 当求得  $Z'_{xk}(m)$ 、 $Z'_{yk}(m)$  后,传统的波前复原过程与本发明中的波前复原过程一致。

[0056] 图 6 为两种复原方法对被测波前 8 进行 100 次复原得到的复原波前的误差曲线图,误差的起伏主要是由于 CCD 相机 5 的噪声引起的,由图 6 可知,采用传统的重构矩阵算法计算得到的复原波前的误差为  $0.18\lambda\%$ ,采用新重构矩阵算法计算得到的复原波前的误差为  $0.11\lambda\%$ ,显然,本发明能够提高了波前复原的精度。

[0057] 综上所述,当被测波前 8 的入射光强分布不均匀时,本发明采用了将波前的光强分布与波前相位分布相结合计算重构矩阵,修正了传统重构矩阵计算方法中没有考虑光强影响而带来的重构矩阵计算误差,提高了波前复原的精度。

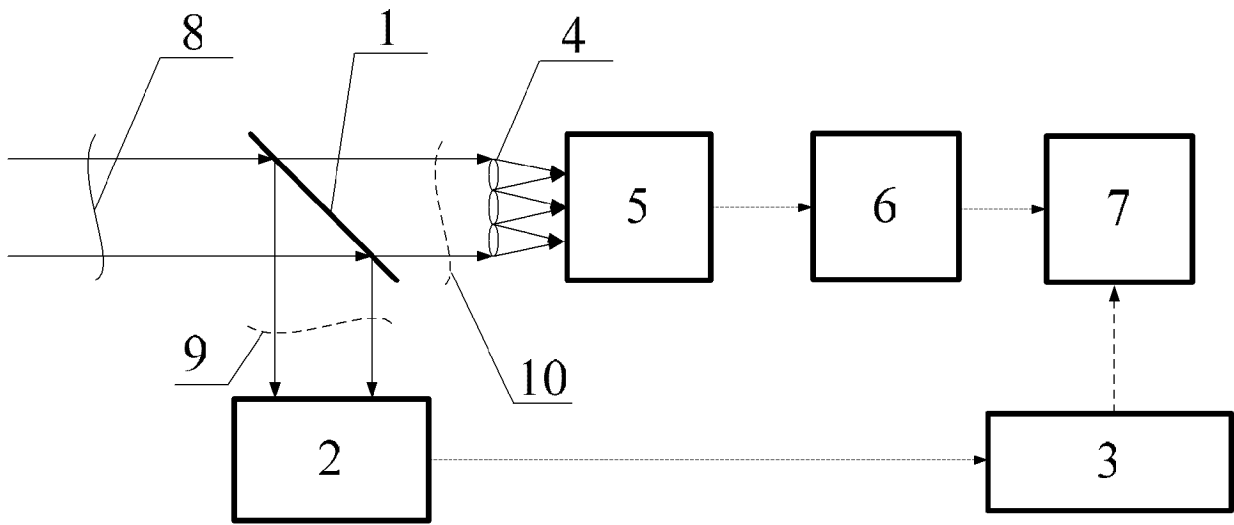


图 1

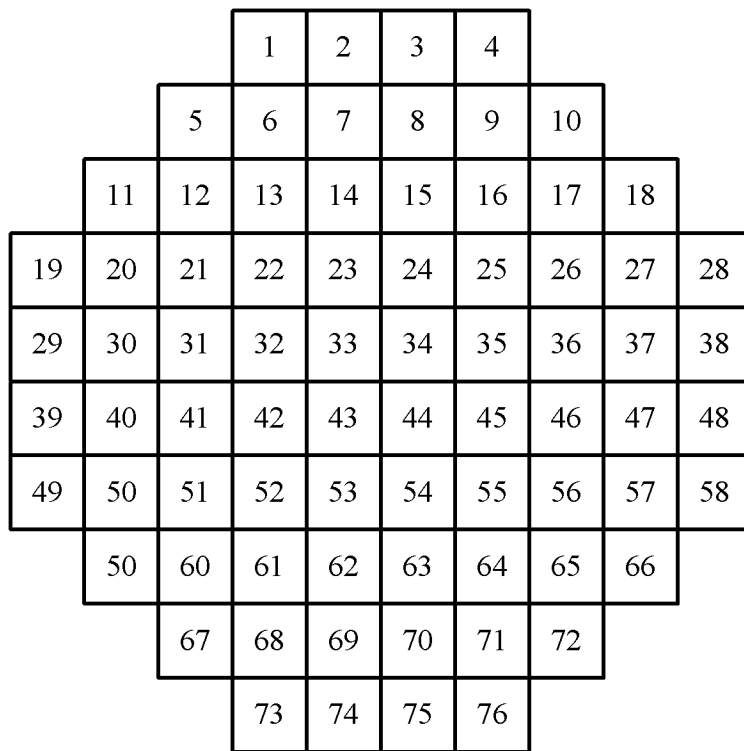


图 2



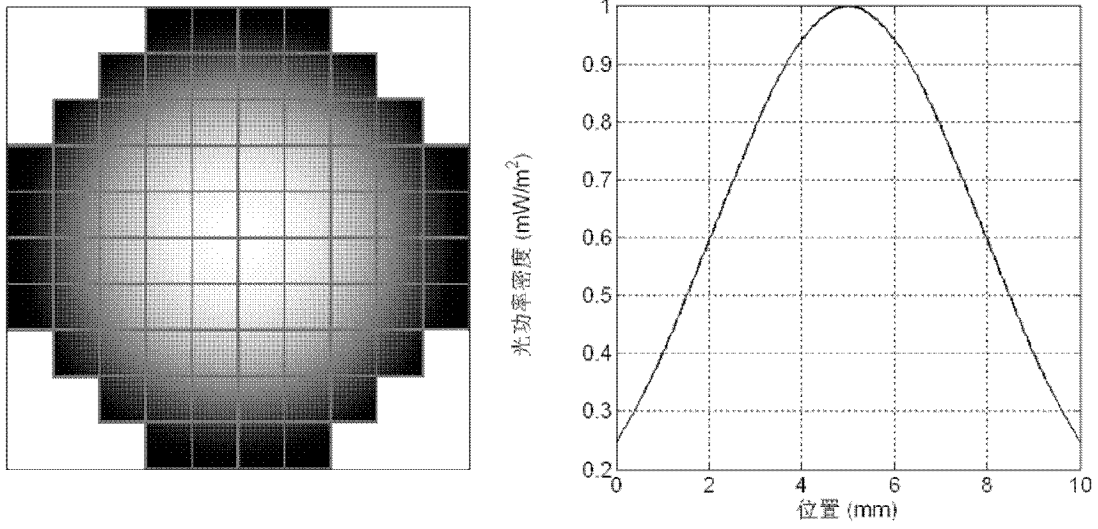


图 3

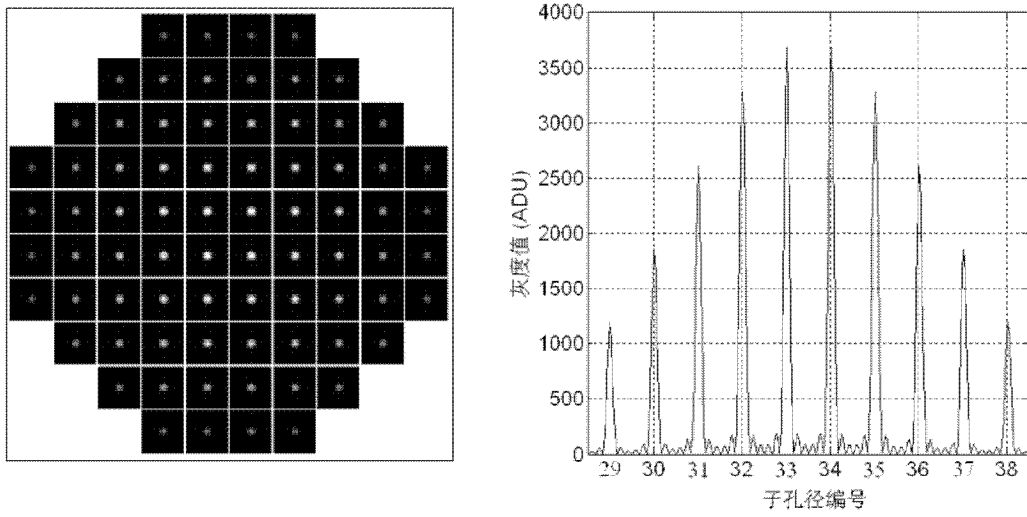


图 4

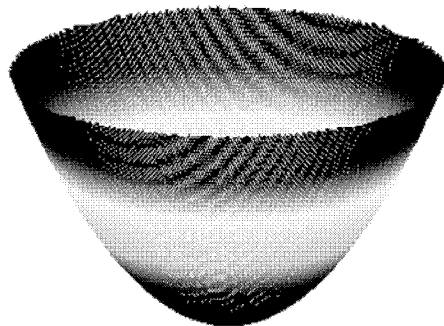


图 5

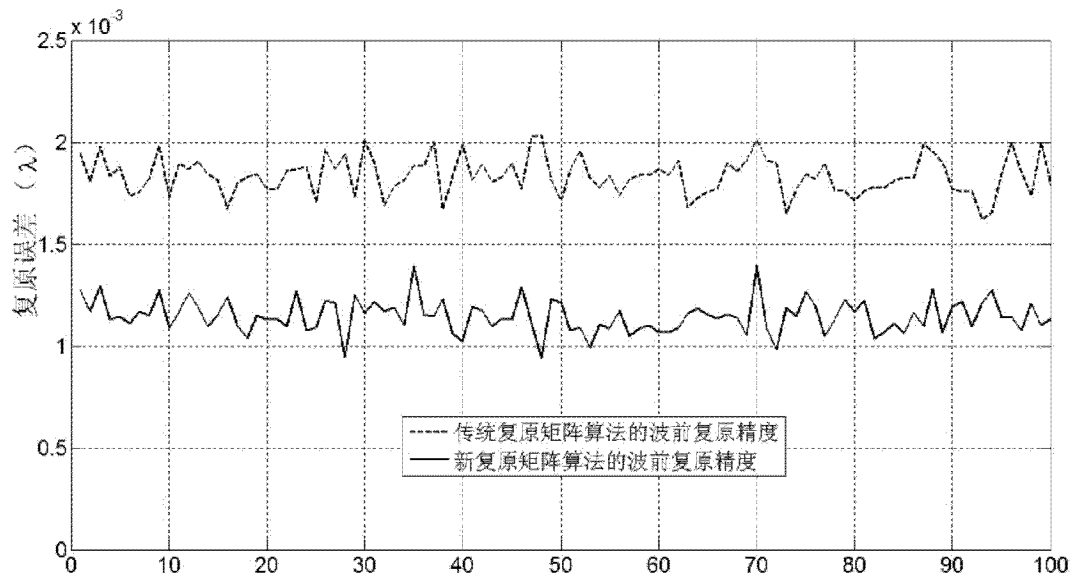


图 6