



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102095503 A

(43) 申请公布日 2011.06.15

(21) 申请号 201010566694.7

(22) 申请日 2010.11.30

(71) 申请人 中国科学院国家天文台南京天文光
学技术研究所

地址 210042 江苏省南京市板仓街 188 号

(72) 发明人 张思炯 杨慧珍

(74) 专利代理机构 江苏致邦律师事务所 32230
代理人 栗仲平

(51) Int. Cl.

G01J 9/00 (2006.01)

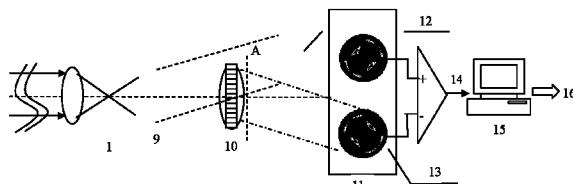
权利要求书 1 页 说明书 5 页 附图 2 页

(54) 发明名称

基于差分传感器的波前检测和重构方法

(57) 摘要

基于差分传感器的波前检测和重构方法，其特征在于，步骤如下：待测波前经透镜 L1、透镜光栅组合在 CCD 上成像；焦平面附近放置一个 CCD 相机记录畸变波前的 +1 阶和 -1 阶的衍射图像；然后由图像采集卡将上述两个步骤中的两幅衍射图像的二维光强分布信息同时采集到计算机中；再由计算机使用相位重构算法对信号差 Dr 进行模式分解及处理，最后得到恢复后的待测波前。本发明不需要事先定标，实现过程简单，具有较高的实用性。减少了附加误差，也不需要进行子口径分光，提高光能利用率。本发明的计算量小，计算速度快。可以应用于自适应光学等实时性要求较高的应用领域；并具有较强的抗噪能力。



1. 一种基于差分传感器的波前检测和重构方法,其特征在于,步骤如下:
待测波前经透镜 L1、透镜光栅组合在 CCD 上成像;
焦平面附近放置一个 CCD 相机记录畸变波前的 +1 阶和 -1 阶的衍射图像;
然后由图像采集卡将上述两个步骤中的两幅衍射图像的两维光强分布信息同时采集到计算机中;
再由计算机使用相位重构算法对信号差 Dr 进行模式分解及处理,最后得到恢复后的待测波前。

2. 根据权利要求 1 所述的基于差分传感器的波前检测和重构方法,其特征在于,所述的“由计算机使用相位重构算法对信号差 Dr 进行模式分解及处理”步骤中,包括以下子步骤:

- (1) 确定一组合适的空间分解模式,作为信号差 Dr 分解的基;
- (2) 根据待测波前的特点选取模式的阶数进行高阶分解;

然后进入第 (3) 子步骤,或直接进入第 (4) 子步骤;

(3) 用于白光或其他非单色光进行波前检测时,在光路的透镜 L1 之前添加一个窄带滤波片;

(4) 输入待测波前由光瞳面到频谱域、再经光栅透镜组合滤波至 CCD 像面成像,得到待测波前的 +1 阶和 -1 阶的衍射图像;采集卡将两幅衍射图像的两维光强信息同时传给计算机;

(5) 由波前重构算法首先计算差法传感器的输出信号 Dr,即两幅图像做减运算;在得到表征输入待测波前 $\phi(r)$ 的大小和方向的信号差 Dr 后,使用 (1) 和 (2) 确定的模式及模式阶数对 Dr 进行分解;

- (6) 将信号差 Dr 进行模式分解后,需要进行模式阶数的选择。

3. 根据权利要求 2 所述的基于差分传感器的波前检测和重构方法,其特征在于,所述第 (2) 步骤的“选取模式的阶数”,是指:待测波前为大气湍流时,进行 104~230 阶或者更高阶分解;激光器或者人眼像差测量的应用,进行前 10~20 阶的分解。

4. 根据权利要求 2 所述的基于差分传感器的波前检测和重构方法,其特征在于,所述的第 (6) 子步骤中,“进行模式阶数的选择”,采用以下方法:把分解后各项模式系数值的标准差作为阈值,将小于该阈值的阶数忽略;大于该阈值的阶数及其相对应的系数大小作为重构待测波前的依据;然后按照公式 (5) 进行运算,即可得到重构后的待测波前:

$$\varphi(r, \theta) = \alpha_0 + \sum_{k=1}^p \alpha_k Z_k(r, \theta) \quad (5)$$

其中 α_0 是波前整体平移项, r 表示极轴, θ 表示极角, α_k 是第 k 项 Zernike 多项式系数, p 是采用的多项式的总项数, $Z_k(r, \theta)$ 是第 k 项 Zernike 多项式的二维极坐标表达式。

5. 根据权利要求 2 ~ 4 之一所述的基于差分传感器的波前检测和重构方法,其特征在于,所述的第 (1) 子步骤中,“寻找一组合适的空间分解模式”,是指:选取 Zernike 模式。

基于差分传感器的波前检测和重构方法

技术领域

[0001] 本发明属于光学信息测量技术领域,涉及到一种测量入射光束波前的方法,具体涉及一种基于差分传感器 (a null sensor) 的波前检测和重构方法。本发明适用于自适应光学系统和光学检测等应用领域。

背景技术

[0002] 在光学检测、自适应光学等应用领域,需要测量光束的波前。目前已经发展了许多测量波前的方法,大致可以分为两大类:(1) 测量出波前斜率,然后通过一定的波前检测和重构算法恢复出波前相位分布。其中包括哈特曼传感器 (Hartmann wavefront sensor) 和剪切干涉仪 (Shear interferometer) 等;(2) 测量光学系统内不同平面上的光强分布,然后通过特定的算法恢复出波前相位分布,其中包括曲率传感器 (Curvature sensor) 和各种相位反演方法 (PhaseRetrieval) 等。这些方法各有优缺点,适用各自的应用场合。

[0003] 根据光学系统像面上光强分布信息得到入射波前相位信息的方法称为“相位反演 (PhaseRetrieval)”技术,比较典型的有:R. A. Gonsalves 等人的波前传感方法 (Proc. of SPIE, Vol. 207, 32-39, 1979),也即经典的 Gerchberg-Saxton 算法,如图 1;F. Roddier 等人的曲率探测方法 (Proc. of SPIE, Vol. 976, 203-209, 1988),如图 2;以及中国专利 CN1904569 提出的基于线性相位反演的波前测量方法。相位反演法需要多帧图像进行迭代计算,算法的计算量大,因而实时性不高,仅适用于图像事后处理等应用场合。曲率探测法的计算相对简单,速度较快,但曲率探测法没有最后计算出波前,且不适用于非连续波前。基于线性相位反演的波前测量方法能量利用率高、计算量小,但这种方法只能针对像差均方根 (RMS) 小于 0.2λ 的情况,且对噪声十分敏感。

[0004] 世界专利 WO2009/058747 利用衍射光学元件在探测器上的成像进行波前测量,但其相位恢复方法采用了 G-S 算法,计算量大。美国专利 US2006/0175528 基于衍射光学元件提出了差分传感器的概念,证明了差分传感器的输出信息与待测畸变波前信息的大小和位置有一定的对应关系,但是没有给出进一步的波前重构方法。

发明内容

[0005] 本发明要解决的技术问题:克服现有技术的不足,提出一种基于差分传感器的波前检测和重构方法,该方法直接利用差分传感器的测量信号来重构入射光束波前,不需要事先计算复原矩阵、不会对波前探测结果带来附加误差且光路简单、实用性强,具有较强的抗噪能力。

[0006] 本发明的技术解决方案是:一种基于差分传感器的波前检测和重构方法,其特征在于,步骤如下:

[0007] 待测波前经透镜 L1、透镜光栅组合在 CCD 上成像;

[0008] 焦平面附近放置一个 CCD 相机记录畸变波前的 +1 阶和 -1 阶的衍射图像;

[0009] 然后由图像采集卡将上述两个步骤中的两幅衍射图像的二维光强分布信息同时

采集到计算机中；

[0010] 再由计算机使用相位重构算法对信号差 Dr 进行模式分解及处理，最后得到恢复后的待测波前。

[0011] 所述的“由计算机使用相位重构算法对信号差 Dr 进行模式分解及处理”步骤中，包括以下子步骤：

[0012] (1) 确定一组合适的空间分解模式，作为信号差 Dr 分解的基；

[0013] 例如：选取 Zernike 模式或 K-L 模式。

[0014] (2) 根据待测波前的特点选取模式的阶数（即(1)中所选定的模式的项数，一般不包括平移项）进行高阶分解；

[0015] 所述的“选取模式的阶数”，即 Zernike 模式的项数，一般不包括平移项。如待测波前为大气湍流，则可以进行 104~230 阶或者更高阶分解；如激光器或者人眼像差测量的应用中，可以进行前 10~20 阶的分解。

[0016] 然后进入第(3)子步骤，或直接进入第(4)子步骤。

[0017] (3) 用于白光或其他非单色光进行波前检测时，由于光栅的色散作用，将会在成像平面上产生色差。为了消除色差的影响，可以在光路的透镜 L1 之前添加一个窄带滤波片。当用于激光等单色光时，无需使用滤波片。

[0018] (4) 输入待测波前由光瞳面到频谱域、再经光栅透镜组合滤波至 CCD 像面成像，得到待测波前的 +1 阶和 -1 阶的衍射图像；采集卡将两幅衍射图像的二维光强信息同时传给计算机。

[0019] (5) 由波前重构算法首先计算差法传感器的输出信号 Dr，即两幅图像做减运算。在得到表征输入待测波前 $\Phi(r)$ 的大小和方向的信号差 Dr 后，使用(1)和(2)确定的模式及模式阶数对 Dr 进行分解。

[0020] (6) 由于信号差 Dr 不但包含了波前信息还包含了一定的噪声，将其进行模式分解后，需要进行模式阶数的选择。

[0021] 具体实施时，可把分解后各项模式系数值的标准差作为阈值，将小于该阈值的阶数忽略，大于该阈值的阶数及其相对应的系数大小作为重构待测波前的依据。然后按照公式(5)进行运算，即可得到重构后的待测波前。

[0022] 基于差分传感器的波前检测和重构方法实现原理如图 3 所示。该方法主要由透镜 L1、光栅透镜组合、CCD 相机、图像采集卡、计算机等组成。待测波前经透镜 L1、透镜光栅组合滤波后在 CCD 上成像，由于光栅透镜组合的特殊作用，在 CCD 上可同时得到 +1 阶和 -1 阶的衍射图像，再经图像采集卡采集到计算机。相位重构算法首先将两副图像进行减运算，形成差分传感器，再对由差分传感器形成的信号差 Dr 进行模式分解及处理，最后得到重构后的待测波前。

[0023] 本发明的原理：

[0024] 如图 4 所示的一个二元衍射光栅，假定 y 轴与光栅的条纹方向平行，x 轴与光栅的条纹方向垂直，如图 4(a) 中所示。如果光栅的几何形状沿 x 轴发生一个位移，如图 4(b)，则会在位移处引入一个相移。相对于零阶，局部相移 $\phi_m(x, y)$ 依赖于光栅局部位移的大小：

$$[0025] \phi_m(x, y) = \frac{2\pi\Delta_x(x, y)}{d} \quad (1)$$

[0026] 其中 d 为光栅常数, m 为衍射级数, Δ_x 为相对于光栅未扭曲之前的位移量。由公式(1)可以看出,除零阶之外,所有阶都经历了一个相移,并且相移的大小和光栅局部位移的大小成线性关系,正负相同级的相移振幅相同,方向相反。使用二元编码技术对衍射光学元件进行编码可以生成任意的波前相位。本发明使用离焦光栅和透镜进行组合,在像平面上得到 ±1 级衍射图像。

[0027] 在透镜 L1 的焦距处可以得到输入待测波前 $\phi(r)$ 的傅里叶变换,如图 3 中的 $\psi(\xi)$ 。由傅里叶光学可以知道,透镜 L1 的后焦面上的复振幅分布是入射场 $\phi(r)$ 的夫琅和费衍射模式。这可以通过输入波前分布的傅里叶变换乘上一个二次相位因子来计算:

$$[0028] \quad \psi(\xi) = \frac{\exp[i\frac{k}{2z}\cdot\xi^2]}{i\lambda z} \int \int_{-\infty}^{\infty} \phi(r) \exp[-i\frac{2\pi}{\lambda z}r\xi] dr \quad (2)$$

[0029] 其中 k 是波数, λ 为波长, z 这里指透镜 L1 的焦距。由于之后光栅透镜组合的特性,公式(2)中的二次相位因子可以忽略,因此透镜 L1 焦面上的场分布 $\psi(\xi)$ 可以简单地认为是输入待测波前 $\phi(r)$ 的傅里叶变换,并且图 3 中 A 点的场分布可以用下式描述:

$$[0030] \quad \psi(\xi) \cdot e^{i\phi_d} \cdot pupil \quad (3)$$

[0031] 其中 $e^{i\phi_d}$ 是由光栅作用的函数 (ϕ_d 为分散相位 (Diversity Phase), pupil 为瞳函数,内部为 1,外部为 0)。则像平面上第 0 阶的强度分布为:

[0032]

$$I_0 = |\Im\{\psi(\xi)\}|^2 = |\phi(r)|^2 \quad (4)$$

[0033] 由公式(4)可以看出,像平面上的第 0 阶包含了输入待测波前 $\phi(r)$ 的像而非输入波前的远场光斑,这区别于其它的基于像平面信息重构待测波前的相位反演方法,因为它们一般都是基于待测波前的远场光斑信息实现相位恢复的。本发明在像平面同时探测到待测波前的 +1 阶像和 -1 阶像,将两幅图像做减运算形成差分传感器。差分传感器的输出信号,也称之为信号差 Dr 与输入待测波前 $\phi(r)$ 的大小和方向有一定的对应关系,并且当输入待测波前为平面波时,信号差 Dr 为零,因此差分传感器的英文名字称为“a null sensor”。

[0034] 波前像差可以采用一系列正交多项式的线性组合表示,在波前分析中,通常把多项式的每一项称为一阶波前模式。可以有多种模式供选择,如 Zernike 模式、K-L 模式等。使用模式法将信号差 Dr 分解为用模式系数描述的待测波前,是本发明的独到之处。

[0035] 迄今为止,Zernike 多项式是描述大气湍流的使用得最为广泛的一种:

[0036]

$$\phi(r, \theta) = \alpha_0 + \sum_{k=1}^p \alpha_k Z_k(r, \theta) \quad (5)$$

[0037] 其中 α_0 是波前整体平移项, r 表示极轴, θ 表示极角, α_k 是第 k 项 Zernike 多项式系数,p 是采用的多项式的总项数, $Z_k(r, \theta)$ 是第 k 项 Zernike 多项式的二维极坐标表达式。具体使用时,可以选用 Zernike 模式对信号差 Dr 进行分解,但不限于 Zernike 模式。

[0038] 本发明与现有技术相比有如下优点:

[0039] (1) 本发明的波前测量方法中,不需要事先定标(如线性相位反演)、事先计算复原矩阵(如线性相位反演及基于 Zernike 多项式的相位差法)等工作,仅仅需要测量输入待测波前对应的 ±1 级衍射图像即可完成波前重构过程,实现过程简单,具有较高的实用

性。

[0040] (2) 本发明的测量方法直接从像平面图像恢复待测波前,且 ±1 级衍射图像同时在像平面获得。不需要对入射光束先进行分光,然后再分别成像和探测(如曲率波前传感器),从而减少了由于分光后的两个成像系统间存在差异而引入的附加误差,也不需要进行子口径分光(如哈特曼波前传感器),提高光能利用率。

[0041] (3) 本发明的波前测量方法中,波前重构过程简化为对 D_r 进行模式分解的运算,也即矩阵乘法的运算,特别适合用现代的 DSP(数字信号处理)技术实时快速完成。相对其它波前测量技术的迭代计算过程,本发明的计算量小,计算速度快。可以应用于自适应光学等实时性要求较高的应用领域。

[0042] (4) 本发明的波前测量方法,具有较强的抗噪能力。在两幅图像做差运算的过程中,可以较大程度地消除光学系统的成像噪声对波前恢复效果的影响。具有较强的抗噪能力,使得本发明的波前测量方法更具有实用性,因为传感器光学系统的自身噪声在实际应用场合下是不可避免的。

附图说明

[0043] 图 1 传统的相位恢复测量波前方法的波前传感器的原理示意图;

[0044] 图 2 曲率探测波前测量方法的波前传感器的原理示意图;

[0045] 图 3 本发明的基于透镜光栅组合的波前传感器的原理示意图 (CCD 相机中的图像为一个实例);

[0046] 图 4 条形光栅 (a) 及局部发生位移后的条形光栅 (b) 示意图。

[0047] 图中:1、待测畸变波前;2、成像光学系统;3、焦平面像;4、焦后像;5、焦距;6、离焦量 d ;7、焦前像;8、焦平面;9、透镜 L1;10、透镜光栅组合;11、CCD;12、正一级衍射像;13、负一级衍射像;14、差分输出 D_r ;15、图像采集卡、计算机、相位重构算法;16、波前重构结果。

具体实施方式

[0048] 如图 3 所示,待测波前经透镜 L1、透镜光栅组合在 CCD 上成像,焦平面附近放置一个 CCD 相机记录畸变波前的 +1 阶和 -1 阶的衍射图像,图中的 +1 阶和 -1 阶像为实际应用的一个例子。然后由图像采集卡将两幅衍射图像的二维光强分布信息同时采集到计算机中。再由相位重构算法对信号差 D_r 进行模式分解及处理,最后得到恢复后的待测波前。

[0049] 本发明的波前具体实施过程如下:

[0050] (1) 寻找一组合适的空间分解模式。由于 Zernike 模式的正交性以及在光学像差描述方面的通用性可以选取 Zernike 模式作为信号差 D_r 分解的基。

[0051] (2) 信号差 D_r 分解的模式确定后,要根据待测波前的特点选取模式的阶数,也即例子中的 Zernike 模式的项数,一般不包括平移项。如待测波前为大气湍流,则可以进行 104–230 阶或者更高阶分解;如激光器或者人眼像差测量的应用中,可以进行前 10–20 阶的分解。

[0052] (3) 当将本发明用于白光或其他非单色光进行波前检测时,由于光栅的色散作用,将会在成像平面上产生色差。为了消除色差的影响,可以在光路的透镜 L1 之前添加一个窄

带滤波片。当用于激光等单色光时,无需使用滤波片。

[0053] (4) 输入待测波前由光瞳面到频谱域、再经光栅透镜组合滤波至 CCD 像面成像, 得到待测波前的 +1 阶和 -1 阶的衍射图像。采集卡将两幅衍射图像的二维光强信息同时传给计算机。

[0054] (5) 由波前重构算法首先计算差法传感器的输出信号 D_r , 即两幅图像做减运算。在得到表征输入待测波前 $\Phi(r)$ 的大小和方向的信号差 D_r 后, 使用 (1) 和 (2) 确定的模式及模式阶数对 D_r 进行分解。

[0055] (6) 由于信号差 D_r 不但包含了波前信息还包含了一定的噪声, 将其进行模式分解后, 需要进行模式阶数的选择。具体实施时, 可把分解后各项模式系数值的标准差作为阈值, 将小于该阈值的阶数忽略, 大于该阈值的阶数及其相对应的系数大小作为重构待测波前的依据。然后按照公式 (5) 进行运算, 即可得到重构后的待测波前。

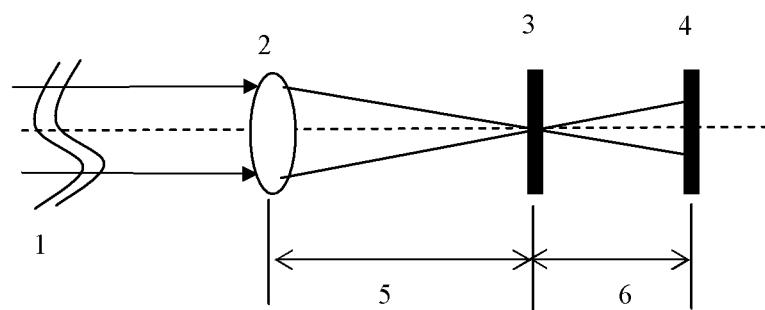


图 1

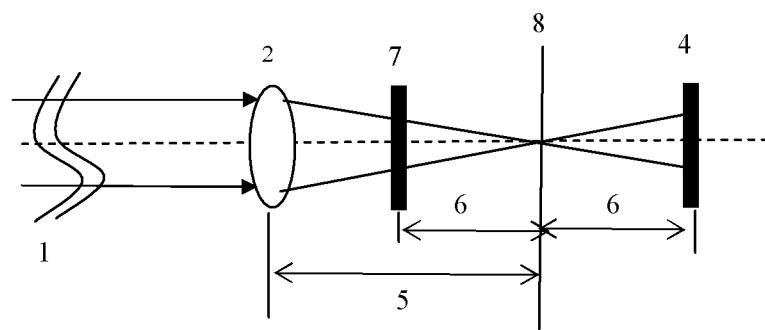


图 2

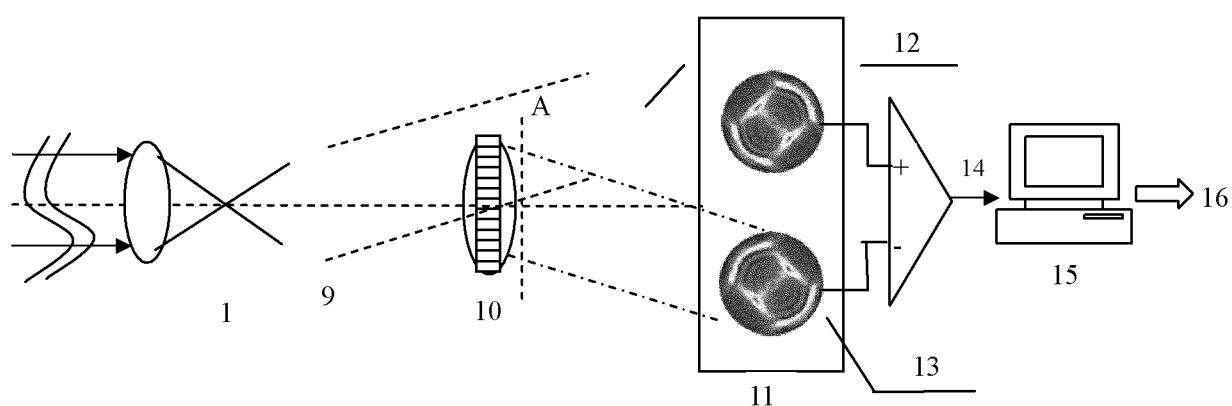


图 3

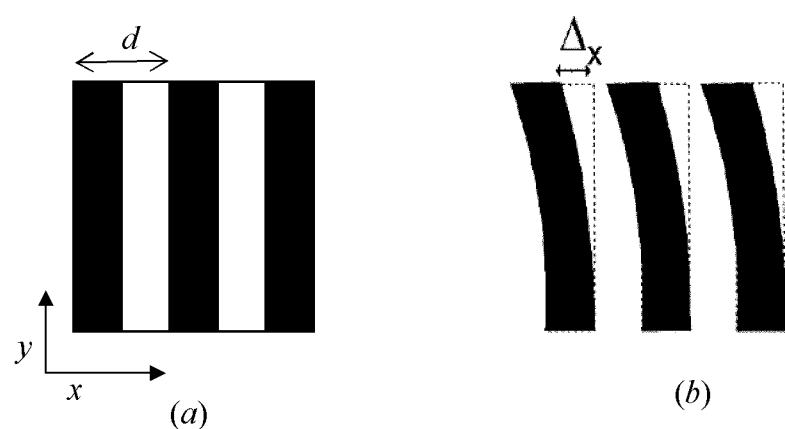


图 4