



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 107576403 B

(45)授权公告日 2020.01.31

(21)申请号 201710730789.X

(22)申请日 2017.08.23

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 107576403 A

(43)申请公布日 2018.01.12

(66)本国优先权数据
201710628049.5 2017.07.28 CN

(73)专利权人 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 李常伟 张思炯 陈升

(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)

(56)对比文件

CN 104238284 A, 2014.12.24, 说明书第
0014-0015, 0020-0042段、附图1-3.

CN 104198053 A, 2014.12.10, 全文.

审查员 张乐

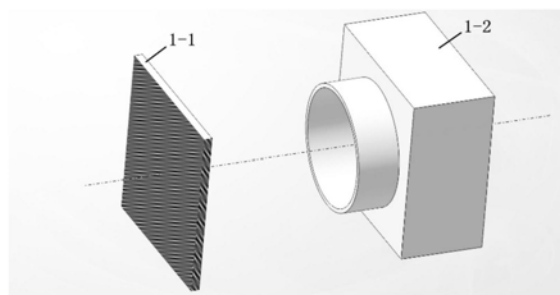
权利要求书1页 说明书4页 附图2页

(54)发明名称

基于Talbot效应的相位恢复装置及其工作方法

(57)摘要

基于Ronchi光栅Talbot效应的相位恢复装置及其工作方法,由Ronchi光栅和高灵敏度CCD相机组成,特征是CCD相机位于Ronchi光栅的Talbot距离处。第一步,通过CCD相机获得Ronchi光栅自成像;第二步,对获得的Ronchi光栅自成像进行去除背景噪声等预处理;第三步,进行相位恢复,通过相位恢复算法多次循环迭代优化相位信息,最终优化输出入射波前。本发明克服了现有技术中系统复杂度高、操作难度大等不足,利用Ronchi光栅的Talbot效应进行相位恢复,恢复算法收敛性好,相位恢复精度高,并具备较强的抗噪声能力。该方案结构简单,可满足各种相位测量、波面分析等领域的应用需求。



1. 一种基于Ronchi光栅Talbot效应的相位恢复方法,其特征在于,步骤如下:

第一步,通过CCD相机获得Ronchi光栅自成像;

第二步,对获得的Ronchi光栅自成像进行去除背景噪声预处理;

第三步,进行相位恢复,通过随机并行梯度下降算法多次循环迭代优化相位信息,最终优化输出入射波前;

第三步中的相位恢复算法,采用随机并行梯度下降优化算法;

第三步中所述的优化输出入射波前,其中,波前像差采用Zernike多项式线性组合表征:

$$\phi(x, y) = \sum_{j=1}^J a_j Z_j(x, y),$$

其中, j 为Zernike多项式的项数, $\phi(x, y)$ 为入射波前相位;

第三步中所述的优化输出入射波前,其中,由CCD相机实际获得的光强分布信息为 $I(x, y)$; 通过假定的波前,通过理论计算得出CCD相机所在平面的强度分布 $|U(x, y)|^2$; 据此,定义相位优化算法的评价函数为:

$$EF = \sum_{i,j} |I(x_i, y_j) - |U_k(x_i, y_j)|^2|^2,$$

其中, $I(x_i, y_j)$ 是CCD相机测得的自成像中像素点 (i, j) 的强度值, k 为迭代次数;

本方法所使用的设备是:

基于Ronchi光栅Talbot效应的相位恢复装置,该装置用到Ronchi光栅和高灵敏度的CCD相机,所述的CCD相机位于Ronchi光栅的Talbot距离处;

所述的“CCD相机位于Ronchi光栅的Talbot距离处”的具体位置按照以下公式确定:

Ronchi光栅的Talbot距离公式:

$$L = \frac{2md^2}{\lambda},$$

其中, L 表示沿光轴方向光经过Ronchi光栅后的传播距离,其大小为 $\frac{2md^2}{\lambda}$, m 取正整数, d 为Ronchi光栅的周期, λ 为入射光波长。

2. 根据权利要求1所述的基于Ronchi光栅Talbot效应的相位恢复方法,其特征在于,在使用时,本装置按照如下方式组成分析系统:在同一光轴上,依次放置Ronchi光栅,CCD相机,其中,CCD相机放置在距离Ronchi光栅后表面的Talbot距离处。

3. 根据权利要求1或2所述的基于Ronchi光栅Talbot效应的相位恢复方法,其特征在于,所述的Ronchi光栅为振幅型透射式光栅,光栅占空比为0.5。

4. 根据权利要求3所述的基于Ronchi光栅Talbot效应的相位恢复方法,其特征在于,所述的Talbot距离选取一倍Talbot距离: $Z_T = \frac{2md^2}{\lambda}$ 公式中 m 取1; 光栅周期为 $100\mu\text{m}$ 。

基于Talbot效应的相位恢复装置及其工作方法

技术领域

[0001] 本发明属于光学技术领域,涉及到一种新型相位恢复技术,具体涉及到一种基于Ronchi光栅Talbot效应的相位恢复装置,以及这种装置的工作方法。该技术可用于实现高精度的相位测量、波面分析,以及光学系统检测等。

背景技术

[0002] 相位恢复技术是通过测量光场强度信息来恢复入射相位信息的一种技术,具有高精度和高灵敏度的特点,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。

[0003] 相位恢复由R.W.Gerchberg和W.O.Saxton于1972年首次提出,该算法利用出瞳面和像平面两个面的光场强度信息通过迭代恢复出瞳面光场的相位信息,这种算法就是相位恢复算法的开端——GS算法。相位恢复算法是相位恢复技术的核心,算法的收敛特性是相位恢复技术成败的关键因素,GS算法虽然具有较高的恢复精度,但是GS算法依赖多面强度测量,存在收敛速度慢甚至不收敛、迭代次数多等问题。基于GS算法,很多改进算法也被相继提出。混合输入输出算法(HIO)在GS算法的基础上加强了约束条件,提高了收敛速度,多用于相干衍射成像中,但是HIO算法存在多个局部极小值问题,不能总收敛到正确值;利用三个或更多面的光强信息或者利用多波长光源采集衍射图进行相位恢复的方法也取得了良好的收敛效果,但存在的不足是系统复杂度高、操作繁琐,降低了算法效率。

发明内容

[0004] 为了克服现有相位恢复技术的上述不足,本发明的目的是提供一种基于Ronchi光栅的Talbot效应,利用随机并行梯度下降算法恢复相位的装置,以及这种装置的工作方法。该方案光路结构简单,易于实现,图像采集方便,能够实现快速、高精度的相位恢复。

[0005] 为了达到上述目的,本发明采用的技术方案是:一种基于Ronchi光栅Talbot效应的相位恢复装置,该装置用到Ronchi光栅和高灵敏度的CCD相机,其特征就在于,所述的CCD相机位于Ronchi光栅的Talbot距离处。

[0006] Talbot效应是一种周期性结构物体在单色平面波垂直照射的情况下在其后方菲涅耳衍射区内一些特定距离上出现该周期性结构自成像的现象。CCD相机置于Ronchi光栅正后方菲涅耳衍射区内,在Ronchi光栅的Talbot距离处会探测到光栅的自成像,自成像的强度分布与Ronchi光栅的结构保持一致。如果CCD相机放置位置偏离Talbot距离,会导致探测到的图像不能自成像或者对比度下降,不利于后续的相位恢复。

[0007] 所述的“CCD相机位于Ronchi光栅的Talbot距离处”的具体位置按照以下公式确定:

[0008] Ronchi光栅的Talbot距离公式:

[0009]
$$L = \frac{2md^2}{\lambda},$$

[0010] 其中,L表示沿光轴方向光经过Ronchi光栅后的传播距离,其大小为 $\frac{2md^2}{\lambda}$,m取正整数,d为Ronchi光栅的周期, λ 为入射光波长。

[0011] “CCD相机位于Ronchi光栅的Talbot距离处”也可以描述为:“CCD相机距离Ronchi光栅后表面 Z_T 处”是相同含义的不同说法。

[0012] 在使用时,本发明按照如下方式组成分析系统:在同一光轴上,依次放置Ronchi光栅,CCD相机。其中,CCD相机放置在距离Ronchi光栅后表面的Talbot距离处。

[0013] 本发明的原理:利用Ronchi光栅对垂直入射的波面进行衍射成像,使用高灵敏度的CCD相机在Ronchi光栅的Talbot距离处记录其自成像强度信息,通过相位恢复算法获得入射波面的相位信息。本发明的结构示意图如图1所示。本发明的硬件实现十分类似传统的Shack-Hartmann波前传感器,区别在于Shack-Hartmann传感器中使用微透镜阵列对入射波面几何成像,本发明使用Ronchi光栅对入射波面衍射成像;Shack-Hartmann波前传感器通过测量质心偏移使用微分计算恢复波前信息,而本发明采用的是随机并行梯度下降相位恢复算法。

[0014] 完成本申请第二个发明任务的技术方案是,一种采用上述装置的、基于Ronchi光栅Talbot效应的相位恢复方法,其特征在于,步骤如下:

[0015] 第一步,通过CCD相机获得Ronchi光栅自成像;

[0016] 第二步,对获得的Ronchi光栅自成像进行去除背景噪声等预处理;

[0017] 第三步,进行相位恢复,通过随机并行梯度下降算法多次循环迭代优化相位信息,最终优化输出入射波前。

[0018] 需要注意的是,本发明中使用的Ronchi光栅为振幅型透射式光栅,光栅占空比为0.5,Ronchi光栅的周期d的选取对本发明的相位恢复性能有很大影响。虽然现在的制造工艺可以生产出每毫米达到上千线对的光栅,但是,在同一入射波长的条件下,过小的光栅周期对应的Talbot距离太小,对CCD位置精度要求太高,不利于实际操作,增加了CCD相机的探测难度;光栅周期越大,对应的Talbot距离越大,由于入射波有限孔径衍射的影响,探测到的强度图像模糊程度越大,探测动态范围越小。

[0019] 本发明推荐,Talbot距离选取一倍Talbot距离,即 $Z_T = \frac{2md^2}{\lambda}$ 公式中的m取1;适当的光栅周期为100 μm 左右。

[0020] 波前像差的描述采用了常用的Zernike多项式表征,入射波前相位可以描述为Zernike多项式的线性组合:

$$[0021] \quad \phi(x, y) = \sum_{j=1}^J a_j Z_j(x, y),$$

[0022] 其中,j为Zernike多项式的项数, $\phi(x, y)$ 为入射波前相位,Zernike多项式的第一项不影响成像质量,可以不予考虑。相位恢复时,由CCD相机实际获得的光强分布信息为 $I(x, y)$,假定入射波前相位由Zernike多项式线性组合而成,可以理论计算出CCD相机所在平面的强度分布 $|U(x, y)|^2$ 。由此,定义相位优化算法的评价函数为:

$$[0023] \quad EF = \sum_{i,j} |I(x_i, y_j) - |U_k(x_i, y_j)|^2|^2,$$

[0024] 其中,其中 $I(x_i, y_j)$ 是CCD相机测得的自成像中像素点 (i, j) 的强度值, k 为迭代次数。可见,当评价函数值逐渐减小,趋近于某个很小的数值时,就可以获得入射波前相位信息。相位恢复流程图如图2所示。

[0025] 如图3所示为相位恢复的一个理论模拟模型实例。图3(a)为输入相位,(b)为Ronchi光栅Talbot自成像强度分布,(c)为恢复出的相位,(d)为输入相位与恢复相位的残差,(e)-(g)分别与(b)-(d)对应,为输入相位不变,仅引入高斯噪声,在信噪比为5的情况下的模拟结果。可以看到,输入相位的PV值约1个波长,恢复相位与输入相位的残差在 10^{-3} 的量级。图4是与图3中(a)、(c)、(f)相位相对应的Zernike系数对比结果,可以看到加入噪声前后恢复相位的Zernike系数与输入相位的Zernike系数基本保持一致,相差很小,表明本发明可以用于实现快速、高精度的相位恢复,并具备较强的抗噪声能力。

[0026] 和现有相位恢复技术相比,本发明主要有以下几个优点:

[0027] (1) 本发明系统结构简单,易实现。本发明利用Ronchi光栅的Talbot效应——无透镜衍射成像,系统结构简单易搭建,只需使用CCD相机对Talbot平面进行单次强度图像采集,避免了其他相位恢复方法中繁琐的多面强度图像采集过程。

[0028] (2) 本发明相位恢复速度快、精度高。基于Ronchi光栅的自成像强度信息,采用随机并行梯度下降优化算法恢复相位信息,该算法收敛速度快,精度高。

[0029] (3) 本发明抗噪能力强。不同于传统的Shack-Hartmann波前传感器利用质心偏移通过微分运算来获取波前信息,本发明是一种相位恢复优化算法,对噪声不敏感,在信噪比较低的情况下依然能取得较好的相位恢复结果。

附图说明

[0030] 图1基于Ronchi光栅Talbot效应的相位恢复技术系统结构示意图。其中,1-1为Ronchi光栅,1-2为高灵敏度的CCD相机。

[0031] 图2基于Ronchi光栅Talbot效应的相位恢复技术流程图。

[0032] 图3基于Ronchi光栅Talbot效应的相位恢复技术的理论模拟实例。

[0033] 图4基于Ronchi光栅Talbot效应的相位恢复技术的理论模拟实例的Zernike系数对比。

具体实施方式

[0034] 实施例1,基于Ronchi光栅Talbot效应的相位恢复技术,参照图1,本发明的实现由Ronchi光栅和高分辨率的CCD相机完成,CCD相机1-2位于Ronchi光栅的Talbot距离处,技术实施步骤如下:第一步,通过CCD相机获得Ronchi光栅自成像;第二步,对获得的Ronchi光栅自成像进行去除背景噪声等预处理;第三步,进行相位恢复,通过随机并行梯度下降算法多次循环迭代优化相位信息,最终优化输出入射波前。其中所述的“CCD相机位于Ronchi光栅的Talbot距离处”的具体位置按照以下公式确定:

[0035] Ronchi光栅的Talbot距离公式:

$$[0036] \quad L = \frac{2md^2}{\lambda},$$

[0037] 其中, L 表示沿光轴方向光经过Ronchi光栅后的传播距离,其大小为 $\frac{2md^2}{\lambda}$, m 取正整

数, d 为 Ronchi 光栅的周期, λ 为入射光波长。

[0038] 采用上述装置的、基于 Ronchi 光栅 Talbot 效应的相位恢复方法步骤如下:

[0039] 第一步, 通过 CCD 相机获得 Ronchi 光栅自成像;

[0040] 第二步, 对获得的 Ronchi 光栅自成像进行去除背景噪声等预处理;

[0041] 第三步, 进行相位恢复, 通过随机并行梯度下降算法多次循环迭代优化相位信息, 最终优化输出入射波前。

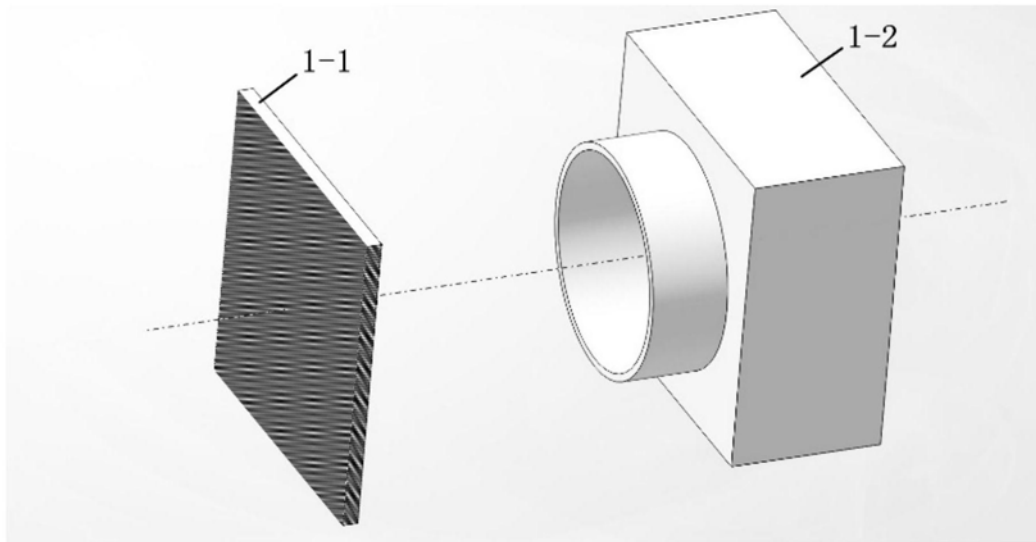


图1

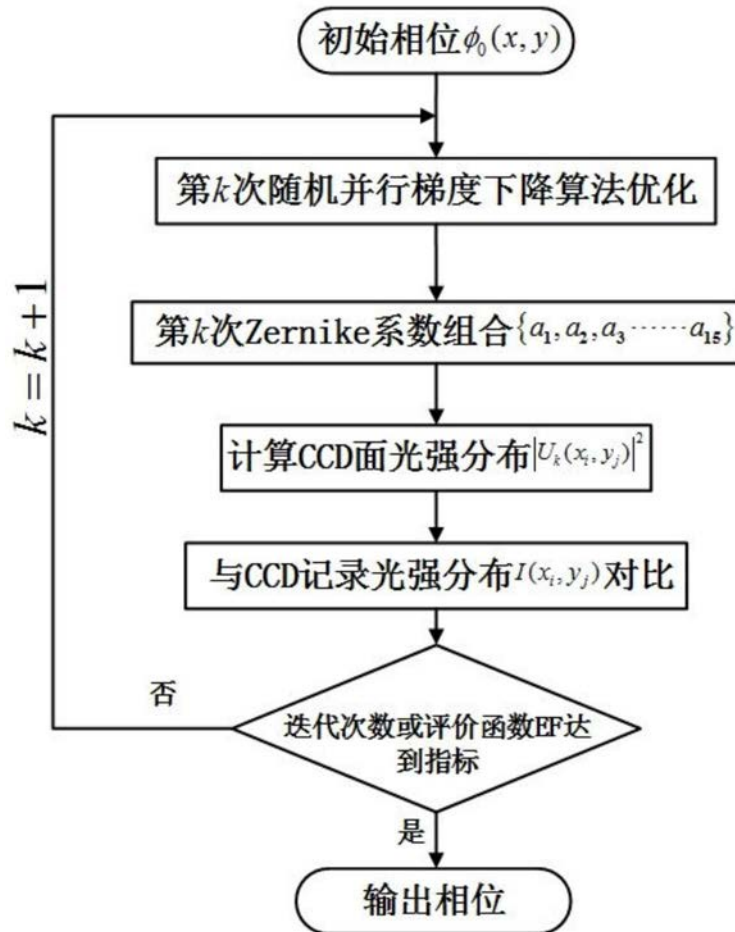


图2

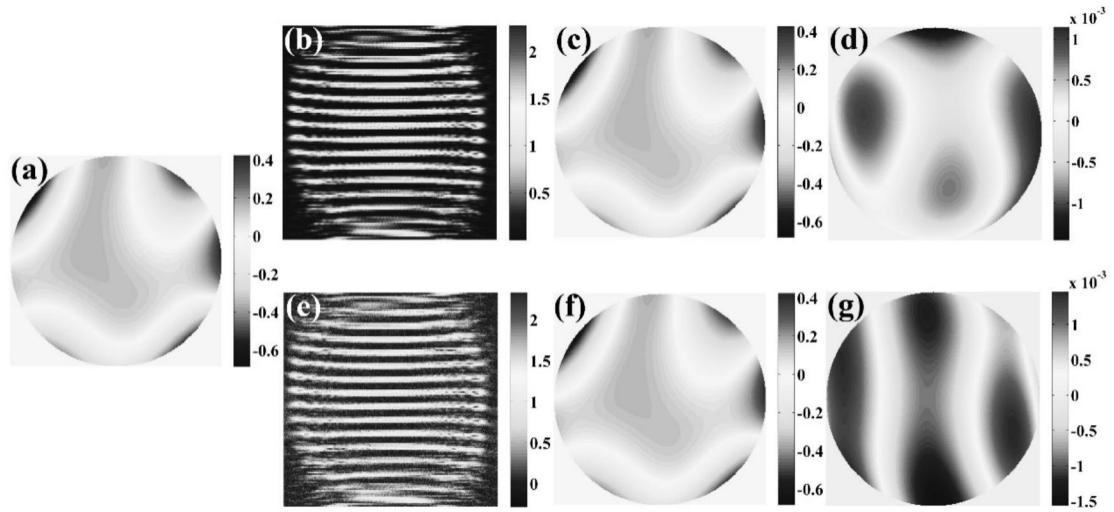


图3

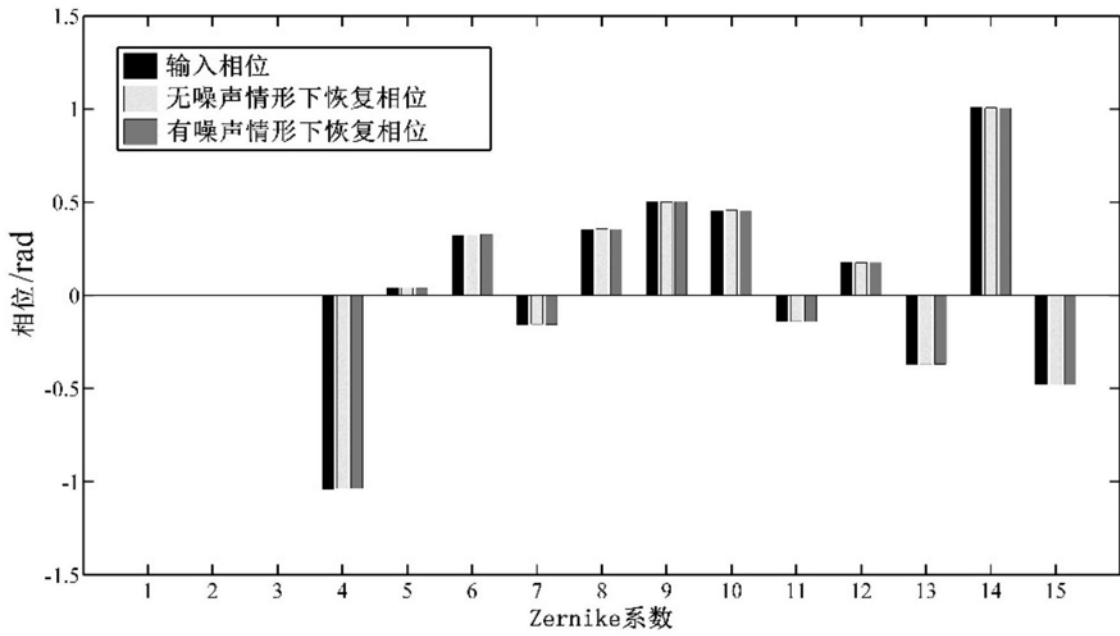


图4