



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102607817 B

(45) 授权公告日 2014. 12. 03

(21) 申请号 201210085061. 3

第 30 卷 (第 5 期), 579-580.

(22) 申请日 2012. 03. 17

张旭升, 沙定国, 林家明, 曾嫦娥. “应用 CCD 和液晶图形发生器的光学多参数综合测试技术研究”. 《北京理工大学学报》. 2003, 第 23 卷 (第 4 期),

(73) 专利权人 哈尔滨工业大学

审查员 皮婉素

地址 150001 黑龙江省哈尔滨市南岗区西大直街 92 号

(72) 发明人 谭久彬 赵烟桥 刘俭

(51) Int. Cl.

G01M 11/02 (2006. 01)

(56) 对比文件

US 3938892 A, 1976. 02. 17,

CN 102620914 A, 2012. 08. 01,

CN 102607813 A, 2012. 07. 25,

CN 101354307 A, 2009. 01. 28,

JP 特开平 8-166573 A, 1996. 06. 25,

JP 特开 2004-37410 A, 2004. 02. 05,

JP 特开 2004-101213 A, 2004. 04. 02,

D. Wulich

N. S. Kopeika. "Image Resolution Limits

Resulting From Mechanical Vibrations. Part 2: Experiment". 《OPTICAL ENGINEERING》. 1991,

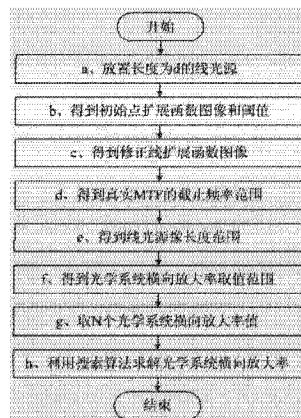
权利要求书1页 说明书6页 附图3页

(54) 发明名称

利用线光源的光学系统横向放大率测量方法

(57) 摘要

利用线光源的光学系统横向放大率测量方法属于以采用光学方法为特征的计量设备领域; 本方法是以线光源为目标得到线状图像, 在频域中寻找像素间距的取值范围, 并根据与像素间距相关实际调制传递函数曲线与理论调制传递函数曲线在最小二乘条件下重合度最好, 利用搜索算法计算得到光学系统横向放大率; 采用本发明测量光学系统横向放大率, 有利于减小单次测量结果之间的误差, 进而提高测量结果重复性。



1. 利用线光源的光学系统横向放大率测量方法,其特征在于所述方法步骤如下:

a、在物方放置长度为 d 的线光源,方向与图像传感器的行或列方向平行;

b、图像传感器对线光源成像,得到初始点扩展函数图像;保持图像传感器曝光时间不变,移除线光源,图像传感器对背景成像,得到干扰图像,并将干扰图像中灰度值的最大值作为阈值;

c. 将第 b 步得到的初始点扩展函数图像中,线光源像所在行或列的整行或整列信息提取出来,作为初始线扩展函数图像,该初始线扩展函数图像具有 n 个元素;并将这 n 个元素中灰度值小于第 b 步所得阈值的像素的灰度值修正为 0,得到修正线扩展函数图像,该修正线扩展函数图象具有 n 个元素;

或者:

将第 b 步得到的初始点扩展函数图像中,灰度值小于第 b 步所得阈值的像素的灰度值修正为 0,作为修正点扩展函数图像;并将修正点扩展函数图像中,线光源像所在行或列的整行或整列信息提取出来,得到修正线扩展函数图像,该修正线扩展函数图象具有 n 个元素;

d. 对第 c 步得到的修正线扩展函数图像进行离散傅里叶变换并取模,得到调制传递函数图像,该调制传递函数图像具有同第 c 步得到的修正线扩展函数图像相同的元素个数 n,即 n 个离散频谱分量,按照空间频率从小到大的顺序分别为 $M_0, M_1, M_2, \dots, M_{n-1}$, 在该顺序下,调制传递函数值第一次达到极小值所对应的调制传递函数值为 M_i , 其下脚标序号为 i, 结合图像传感器的像素间距 l, 得到 M_{i-1} 和 M_{i+1} 所对应的空间频率值分别为: $f_{\min} = (i-1) / (nl)$ 以及 $f_{\max} = (i+1) / (nl)$;

e. 根据调制传递函数模型 $MTF(f) = |\text{sinc}(\pi f d')|$, 结合第 d 步得到的空间频率范围 f_{\min} 和 f_{\max} , 得到线光源像长度取值范围: $d_{\max}' = 1 / f_{\min} = nl / (i-1)$ 以及 $d_{\min}' = 1 / f_{\max} = nl / (i+1)$;

f. 根据第 a 步线光源长度 d 和第 e 步得到的线光源像长度取值范围,计算得到光学系统横向放大率取值范围为: $\beta_{\min} = d_{\min}' / d = nl / ((i+1)d)$ 以及 $\beta_{\max} = d_{\max}' / d = nl / ((i-1)d)$;

g. 根据第 f 步得到的光学系统横向放大率取值范围,将光学系统横向放大率平均分成 N 份, 分别为 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N$, 其中, $\beta_1 = \beta_{\min}, \beta_N = \beta_{\max}$;

h. 在第 d 步得到的 n 个调制传递函数值中选取 K 个作为对比数据, 这 K 个调制传递函数值分别是 $M_{K1}, M_{K2}, \dots, M_{KK}$, 将第 g 步得到的 N 个像素间距分别代入到以下公式:

$$\sum_{i=K1}^{KK} \left[M_i - \text{sinc}\left(\pi \frac{i}{nl} d \beta\right) \right]^2$$

该公式所得到的 N 个值中, 最小值所对应的光学系统横向放大率 β 即为所求。

利用线光源的光学系统横向放大率测量方法

技术领域

[0001] 利用线光源的光学系统横向放大率测量方法属于以采用光学方法为特征的计量设备领域,尤其涉及一种以线光源为目标,在频域利用线光源像来测量光学系统横向放大率的方法。

背景技术

[0002] 光学系统横向放大率是医学以及精密测量领域中非常重要的参数,它不仅标明光学系统的技术指标,同样可以利用这项技术指标开展其它参数的精密测量。然而,如何获得一个光学系统的横向放大率,是开展这项工作的首要问题。

[0003] 一、光学系统横向放大率测量方法问题

[0004] 1987年07月,《医学物理》发表文章《论显微镜中物镜的放大率》,发现了显微镜中物镜的横向放大率经验公式与实际测量过程中产生的矛盾,该文章虽然没有给出物镜横向放大率的测量方法,但是该矛盾却引出了光学系统横向放大率的测量问题。

[0005] 而后续的一些文章,均显现出光学系统横向放大率测量的必要性。

[0006] 1999年03月,《黄山高等专科学校学报》第1卷第2期发表文章《关于几何光学中横向放大率的讨论》,该文章讨论了光学系统横向放大率的数学表达式,该方法的适用条件是近轴条件下的理想光学系统成像,而当这些条件不满足时,本文所总结的公式与实际光学系统横向放大率之间的误差却没有说明,更缺少对于这种误差,如何测量光学系统横向放大率方法的说明。

[0007] 2000年05月,《华南师范大学学报(自然科学版)》第2期发表文章《关于理想光具组横向放大率曲线的分析与运用》,本文根据光学系统横向放大率的定义总结出理想光具组横向放大率的计算公式,并绘制出横向放大率-物距像距曲线,该方法适用的条件仍然是理想光学系统近轴光线,而对于非理想条件下,经验公式中指出的横向放大率与实际横向放大率之间的误差却没有说明,更说明了测量光学系统横向放大率方法的必要性。

[0008] 2002年06月,《江西教育学院学报(自然科学)》第23卷第3期发表文章《用位相变换函数导出傍轴条件下透镜的物像距公式和横向放大率公式》,该文章以傅里叶光学为基础,利用透镜的相位变换作用推导出了傍轴条件下的物像距离公式以及光学系统横向放大率公式,然而,这篇文章的适用条件仍然是傍轴近似条件下的理想光学系统成像,同样具有同之前两篇文章相同的问题。

[0009] 因为存在光学系统横向放大率测量的迫切需求,所以在医学领域和精密测量等领域,均有学者提出自己的测量方法。

[0010] 2010年09月,《医学影像技术》第26卷增刊1发表文章《数字X线机固有放大率的测定》提供了一种放大率的测定方法,这种测定方法首先将小钢球固定在X线探测器上,摄片后用机器自带的标尺测出小球投影的直径;打印出照片,在阅片灯下用分规量好照片上投影的钢球直径,并用游标卡尺精确测出其数据,对比两组数据有误差差。同样用游标卡尺测出相应钢球的实际直径,可得出两直径之比,即X线影线放大率。由于该文章并非由精

密测量领域人员所写,所以文章所采用的测量方法比较古老,沿用的是标尺测量物高,这种标尺测量具有一定的主观性,对测量结果影响较大。

[0011] 2003 年 09 月,《河北职业技术师范学院学报》第 17 卷第 3 期发表文章《比较板法测望远镜放大率》,该文章介绍了一种光学系统横向放大率的新方法,这种方法与现行的普通物理实验所用方法相比,不仅原理简单、数据准确,而且更具操作性。然而这种方法任然没有摆脱传统方法的束缚,对像高的判断仍然沿用刻度尺读取目标长度的方法,因此同样具有主观性的问题。

[0012] 然而,这个问题随着 CCD 的迅速发展并广泛应用到精密测量领域而解决,同时,光学系统横向放大率的测量精度也相应得到了提高。

[0013] 1998 年 06 月,《光电工程》第 25 卷第 3 期发表文章《CCD 测望远系统放大率》,该文章介绍的方法原理简单,直接利用像高物高比来测定望远系统的放大率,该文章所介绍的方法与传统方法相比,像高不再采用标尺进行测量,而是通过刻线所占 CCD 像素个数与像素间距的乘积来判断,这种方法减少了测量过程中的主观因素,使测量结果更加准确。

[0014] 2002 年 03 月,《物理实验》第 22 卷第 3 期发表文章《横向放大率法确定复合光学系统的基点》,2006 年 08 月,《大学物理》第 25 卷第 8 期发表文章《横向放大率法测定光具组的基点》,这两篇文章将横向放大率扩展到了一个新的应用领域,用它来确定复合光学系统的基点,并得出重要结论,基点是光学系统横向放大率的函数。这个结论说明基点确定的准确与否直接与光学系统横向放大率的准确程度相关,因此,有必要精确测量光学系统横向放大率。而本文仍然沿用横向放大率的定义,即像高与物高比值进行测量,其中,像高的测量仍然沿用上一篇文章的测量原理,根据双缝所横跨的像素个数与像素间距的乘积来确定。

[0015] 对现有技术方法的陈述可以总结出以下结论,对于光学系统横向放大率的测量问题,无非是采用两种方法:

[0016] 1) 利用光学系统横向放大率的定义,即像高和物高的比值来直接测量;

[0017] 2) 根据光学系统横向放大率与某图像高度在特定光学系统中的特定关系,通过图像高度的获取实现对光学系统横向放大率的间接测量。

[0018] 无论是哪一种方法,均需要对像高进行判断,而现阶段的判断方法具有相同的技术特征:

[0019] 利用图像所横跨像素的个数与像素间距的乘积得到图像的高度信息。

[0020] 虽然该技术特征可以避免传统方法中用刻度尺测量像高的过程中的主观因素,但是这种方法也有自身的问题,因为对于像素个数的判断,只能是整数判断,每一侧的判断最多存在 ± 0.5 个像素的误差,两个边缘就可能存在 ± 1 个像素的误差,图像的尺寸越小,误差就会越大。虽然在理论上可以增大线光源的长度,通过用更多的像素来均摊误差得到弥补,但是对于大畸变光学系统,即不同视场下放大倍率不同的光学系统,增大线光源的长度同样会带来新的问题:

[0021] 1) 增大目标尺寸,可能会使图像在长度上发生严重形变,这种情况下,不仅不能均摊误差,反而会使像素个数的判断误差更大,因此对于大畸变光学系统,该方法不适合在大视场范围内进行测量;

[0022] 2) 针对大畸变光学系统,理应在每一个小视场范围内,精确测量该视场范围下的

横向放大率，最终得到不同视场下的横向放大率曲线，但由于背景技术所采用的测量方法在小视场范围内单次测量结果之间误差较大，因此大畸变光学系统横向放大率测量重复性低。

[0023] 二、光学系统横向放大率测量装置问题

[0024] 国际专利分类号 G01M 11/02 光学性质的测试领域，有两项发明专利公开了动像调制传递函数测量装置的组成：

[0025] 专利号 ZL200810137150.1，授权公告日 2010 年 09 月 29 日，发明专利《动态目标调制传递函数测量方法与装置》，公开了一种高精度多功能的动像调制传递函数测量装置，该装置中也具有光源、光学系统以及图像传感器的结构，并且同样是光源经过光学系统成像到图像传感器表面。

[0026] 专利号 ZL201010252619.3，授权公告日 2012 年 01 月 11 日，发明专利《动像调制传递函数测量装置》，在上一个专利所公开装置的基础上，进一步限定了装置中光学镜头的耦合方式以及测量的同步方式。

[0027] 但是这两项发明的特点是光源的运动轨迹是垂直于光轴的直线，对于有场曲的光学系统，光源运动的过程中，必然会造成图像的离焦，如果将这两项发明所公开的测量装置直接应用到本发明中，无法克服离焦造成的图像模糊问题以及图像灰度值变化问题，该问题会造成截止频率位置上的偏移，使测量结果的准确性受到影响。

发明内容

[0028] 本发明就是针对上述现有测量方法针对大畸变光学系统，不适合大视场范围内测量，而在小视场范围内，又存在横向放大率测量重复性低的问题，以及现有测量装置存在离焦的问题，提出了一种光学系统横向放大率的测量方法与装置，该方法可以在小视场范围内提高测量结果重复性，更适合测量大畸变光学系统横向放大率；该装置可以消除离焦对测量结果的影响，进一步提高测量结果重复性。

[0029] 本发明的目的是这样实现的：

[0030] 利用线光源的光学系统横向放大率测量方法，步骤如下：

[0031] a、在物方放置长度为 d 的线光源，方向与图像传感器的行或列方向平行；

[0032] b、图像传感器对线光源成像，得到初始点扩展函数图像；保持图像传感器曝光时间不变，移除线光源，图像传感器对背景成像，得到干扰图像，并将干扰图像中灰度值的最大值作为阈值；

[0033] c. 将第 b 步得到的初始点扩展函数图像中，线光源像所在行或列的整行或整列信息提取出来，作为初始线扩展函数图像，该初始线扩展函数图像具有 n 个元素；并将这 n 个元素中灰度值小于第 b 步所得阈值的像素的灰度值修正为 0，得到修正线扩展函数图像，该修正线扩展函数图象具有 n 个元素；

[0034] 或者：

[0035] 将第 b 步得到的初始点扩展函数图像中，灰度值小于第 b 步所得阈值的像素的灰度值修正为 0，作为修正点扩展函数图像；并将修正点扩展函数图像中，线光源像所在行或列的整行或整列信息提取出来，得到修正线扩展函数图像，该修正线扩展函数图象具有 n 个元素；

[0036] d. 对第 c 步得到的修正线扩展函数图像进行离散傅里叶变换并取模, 得到调制传递函数图像, 该调制传递函数图像具有同第 c 步得到的修正线扩展函数图像相同的元素个数 n, 即 n 个离散频谱分量, 按照空间频率从小到大的顺序分别为 $M_0, M_1, M_2, \dots, M_{n-1}$, 在该顺序下, 调制传递函数值第一次达到极小值所对应的调制传递函数值为 M_i , 其下脚标序号为 i, 结合图像传感器的像素间距 l, 得到 M_{i-1} 和 M_{i+1} 所对应的空间频率值分别为: $f_{\min} = (i-1)/(nl)$ 以及 $f_{\max} = (i+1)/(nl)$;

[0037] e. 根据调制传递函数模型 $MTF(f) = |\sin c(\pi f d')|$, 结合第 d 步得到的空间频率范围 f_{\min} 和 f_{\max} , 得到线光源像长度取值范围: $d_{\max}' = 1/f_{\min} = nl/(i-1)$ 以及 $d_{\min}' = 1/f_{\max} = nl/(i+1)$;

[0038] f. 根据第 a 步线光源长度 d 和第 e 步得到的线光源像长度取值范围, 计算得到光学系统横向放大率取值范围为: $\beta_{\min} = d_{\min}' / d = nl/((i+1)d)$ 以及 $\beta_{\max} = d_{\max}' / d = nl/((i-1)d)$;

[0039] g. 根据第 f 步得到的光学系统横向放大率取值范围, 将光学系统横向放大率平均分成 N 份, 分别为 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N$, 其中, $\beta_1 = \beta_{\min}, \beta_N = \beta_{\max}$;

[0040] h. 在第 d 步得到的 n 个调制传递函数值中选取 K 个作为对比数据, 这 K 个调制传递函数值分别是 $M_{K1}, M_{K2}, \dots, M_{KK}$, 将第 g 步得到的 N 个像素间距分别代入到以下公式:

$$\sum_{i=K1}^{KK} \left[M_i - \sin c \left(\pi \frac{i}{nl} d \beta \right) \right]^2, \text{ 该公式所得到的 } N \text{ 个值中, 最小值所对应的光学系统横向放大率 } \beta \text{ 即为所求。}$$

[0041] 利用线光源的光学系统横向放大率测量装置, 包括线光源、光学系统、图像传感器, 所述的线光源经过光学系统成像到图像传感器表面, 并且, 在该装置光轴方向与图像传感器行或列方向所确定的平面内, 线光源呈弯曲状, 且所述的线光源上任意位置都准焦成像到图像传感器表面。

[0042] 本发明的有益效果是:

[0043] 1) 本发明采用的测量方法区别于传统空域测量方法, 该方法以线光源为目标得到线状图像, 在频域中寻找像素间距的取值范围, 并根据与像素间距相关的实际调制传递函数曲线与理论调制传递函数曲线在最小二乘条件下重合度最好, 利用搜索算法计算得到光学系统横向放大率; 该特征使得采用长度短小的线光源时, 会得到更高的截止频率, 从而均摊截止频率的误差, 使得单次测量结果之间的误差更小, 进而提高测量结果重复性;

[0044] 2) 本发明采用的测量装置在该装置光轴方向与图像传感器行或列方向所确定的平面内, 线光源呈弯曲状, 且所述的线光源上任意位置都准焦成像到图像传感器表面; 该特征使测量得到的调制传递函数曲线更接近真实曲线, 实际测量得到的截止频率位置更加准确, 可以进一步减小单次测量结果之间的误差, 提高测量结果重复性。

附图说明

[0045] 图 1 是利用线光源的光学系统横向放大率测量装置结构示意图

[0046] 图 2 是利用线光源的光学系统横向放大率测量装置平面光路图

[0047] 图 3 是利用线光源的光学系统横向放大率测量方法流程图

[0048] 图 4 是初始线扩展函数图像

[0049] 图 5 是修正线扩展函数图像

[0050] 图中 :1 线光源 2 光学系统 3 图像传感器

具体实施方式

[0051] 下面结合附图对本发明具体实施例做进一步详细描述。

[0052] 图 1 为利用线光源的光学系统横向放大率测量装置结构示意图,其平面光路图如图 2 所示;该装置包括线光源 1、光学系统 2、图像传感器 3,所述的线光源 1 经过光学系统 2 成像到图像传感器 3 表面,并且,在该装置光轴方向与图像传感器 3 行方向所确定的平面内,线光源 1 呈弯曲状,且所述的线光源 1 上任意位置都准焦成像到图像传感器 3 表面;其中,线光源 1 的横向长度为 3mm,图像传感器 3 的像素间距为 $5.6 \mu m$ 。

[0053] 利用线光源的光学系统横向放大率测量方法,流程图如图 3 所示,该方法步骤如下:

[0054] a. 在物方放置长度为 $d = 3mm$ 的线光源 1,方向与图像传感器 3 行方向平行;

[0055] b. 图像传感器 3 对线光源 1 成像,得到初始点扩展函数图像;保持图像传感器 3 曝光时间不变,移除线光源 1,图像传感器 3 对背景成像,得到干扰图像,并将干扰图像中灰度值的最大值作为阈值,该阈值为 10;

[0056] c. 将第 b 步得到的初始点扩展函数图像中,线光源像所在行的整行信息提取出来,作为初始线扩展函数图像,如图 4 所示,并初始线扩展函数图像中灰度值小于第 b 步所得阈值的像素的灰度值修正为 0,得到修正线扩展函数图像,如图 5 所示,该修正线扩展函数图像具有 $n = 1280$ 个元素;

[0057] 或者:

[0058] 将第 b 步得到的初始点扩展函数图像中,灰度值小于第 b 步所得阈值的像素的灰度值修正为 0,作为修正点扩展函数图像;并将修正点扩展函数图像中,线光源像所在行的整行信息提取出来,得到修正线扩展函数图像,如图 5 所示,该修正线扩展函数图像具有 $n = 1280$ 个元素;

[0059] d. 对第 c 步得到的修正线扩展函数图像进行离散傅里叶变换并取模,得到调制传递函数图像,该调制传递函数图像具有同第 c 步得到的修正线扩展函数图像相同的元素个数 $n = 1280$,即 1280 个离散频谱分量,按照空间频率从小到大的顺序分别为 $M_0, M_1, M_2, \dots, M_{1279}$,在该顺序下,调制传递函数值第一次达到极小值所对应的调制传递函数值为 M_{42} ,其下脚标序号为 $i = 42$,结合图像传感器 3 的像素间距 $1 = 5.6 \mu m$,得到 M_{41} 和 M_{43} 所对应的空间频率值为: $f_{min} = (i-1)/(n1) = (42-1)/(1280 \times 5.6 \times 10^{-3}) = 5.71991 p/mm$ 以及 $f_{max} = (i+1)/(n1) = (42+1)/(1280 \times 5.6 \times 10^{-3}) = 5.99891 p/mm$;

[0060] e. 根据调制传递函数模型 $MTF(f) = |\sin c(\pi f d')|$,结合第 d 步得到的空间频率范围 $f_{min} = 5.71991 p/mm$ 和 $f_{max} = 5.99891 p/mm$,得到线光源像长度取值范围: $d_{max}' = 1/f_{min} = n1/(i-1) = 1280 \times 5.6 \times 10^{-3}/(42-1) = 0.1748 mm$ 以及 $d_{min}' = 1/f_{max} = n1/(i+1) = 1280 \times 5.6 \times 10^{-3}/(42+1) = 0.1667 mm$;

[0061] f. 根据第 a 步线光源 1 长度 $d = 3mm$ 和第 e 步得到的线光源像长度取值范围 $d_{min}' = 0.1667 mm$ 以及 $d_{max}' = 0.1748 mm$,计算得到光学系统横向放大率取值范围为: $\beta_{min} = d_{min}' / d = n1 / ((i+1)d) = 1280 \times 5.6 \times 10^{-3} / ((42+1) \times 3) = 0.0556$ 以及 $\beta_{max} = d_{max}' / d = n1 / ((i-1)d) = 1280 \times 5.6 \times 10^{-3} / ((42-1) \times 3) = 0.0576$;

$$d = nl / ((i-1)d) = 1280 \times 5.6 \times 10^{-3} / ((42-1) \times 3) = 0.0583;$$

[0062] e. 根据调制传递函数模型 $MTF(f) = |\sin c(\pi f d')|$, 结合第 d 步得到的空间频率值 $f = 5.85941 \text{lp/mm}$, 得到线光源像长度为: $d' = 1/f = nl/i = 1280 \times 5.6 \times 10^{-3} / 42 = 0.1707 \text{mm}$;

[0063] f. 根据第 a 步线光源 1 长度 $d = 3 \text{mm}$ 和第 e 步得到的线光源像长度 $d' = 0.1707 \text{mm}$, 计算得到光学系统 3 横向放大率为: $\beta = d' / d = nl / (id) = 1280 \times 5.6 \times 10^{-3} / (42 \times 3) = 0.0569$ 。

[0064] g. 根据第 f 步得到的光学系统 3 横向放大率取值范围 $\beta_{\min} = 0.0556$ 以及 $\beta_{\max} = 0.0583$, 将光学系统 3 横向放大率平均分成 $N = 1000$ 份, 分别为 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{1000}$, 其中, $\beta_1 = \beta_{\min} = 0.0556, \beta_{1000} = \beta_{\max} = 0.0583$;

[0065] h. 按照空间频率从小到大的顺序, 将第 d 步得到的 $n = 1280$ 个调制传递函数值绘制成一条曲线, 选取这条曲线上从 M_0 开始到首个极大值, 且不包括第 d 步得到的 M_{42} , 共 K 个作为比对数据, 这 K 个调制传递函数值分别是 $M_{K1}, M_{K2}, \dots, M_{KK}$, 将第 g 步得到的 $N = 1000$ 个光学系统横向放大率分别代入到以下公式:

$$\sum_{i=K1}^{KK} \left[M_i - \sin c \left(\pi \frac{i}{nl} d \beta \right) \right]^2,$$

该公式所得到的 $N = 1000$ 个值中, 最小值所对应的光学系统 3 横向放大率 β 即为所求, 经计算, $\beta = 0.0558$ 。

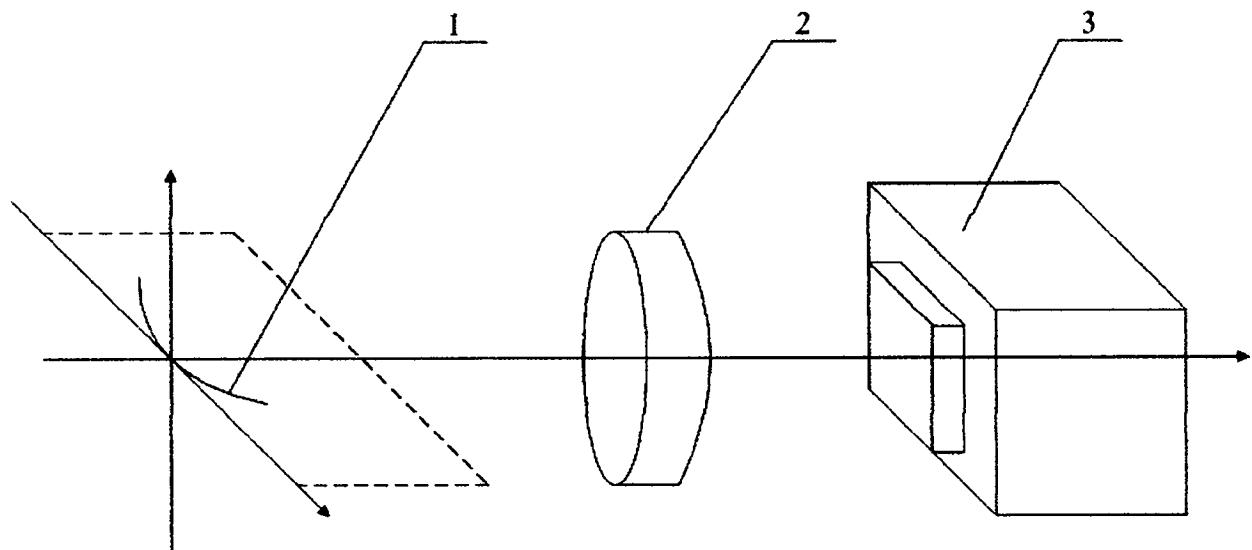


图 1

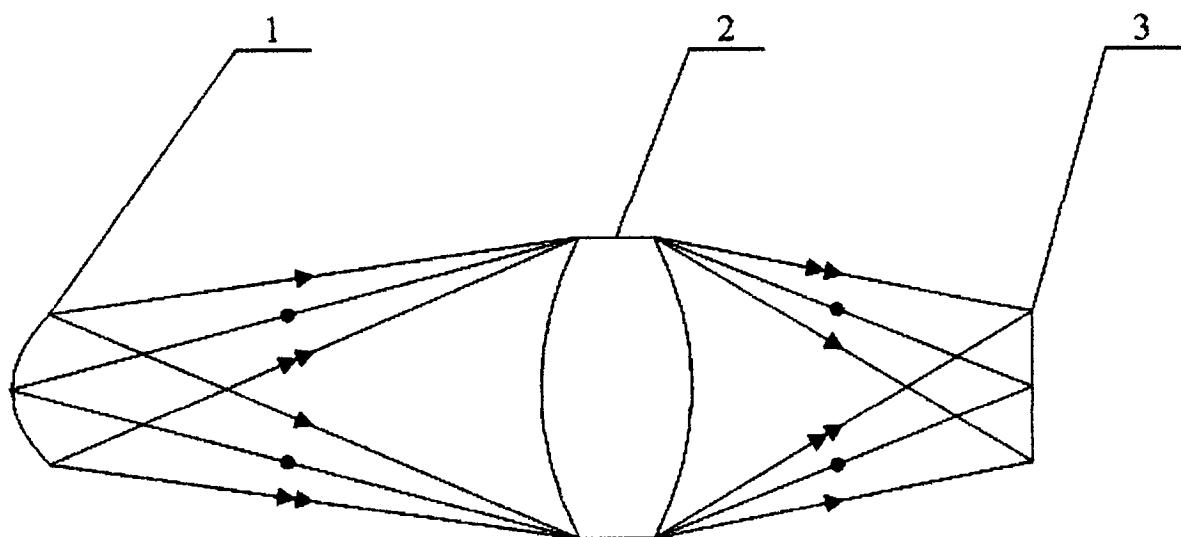


图 2

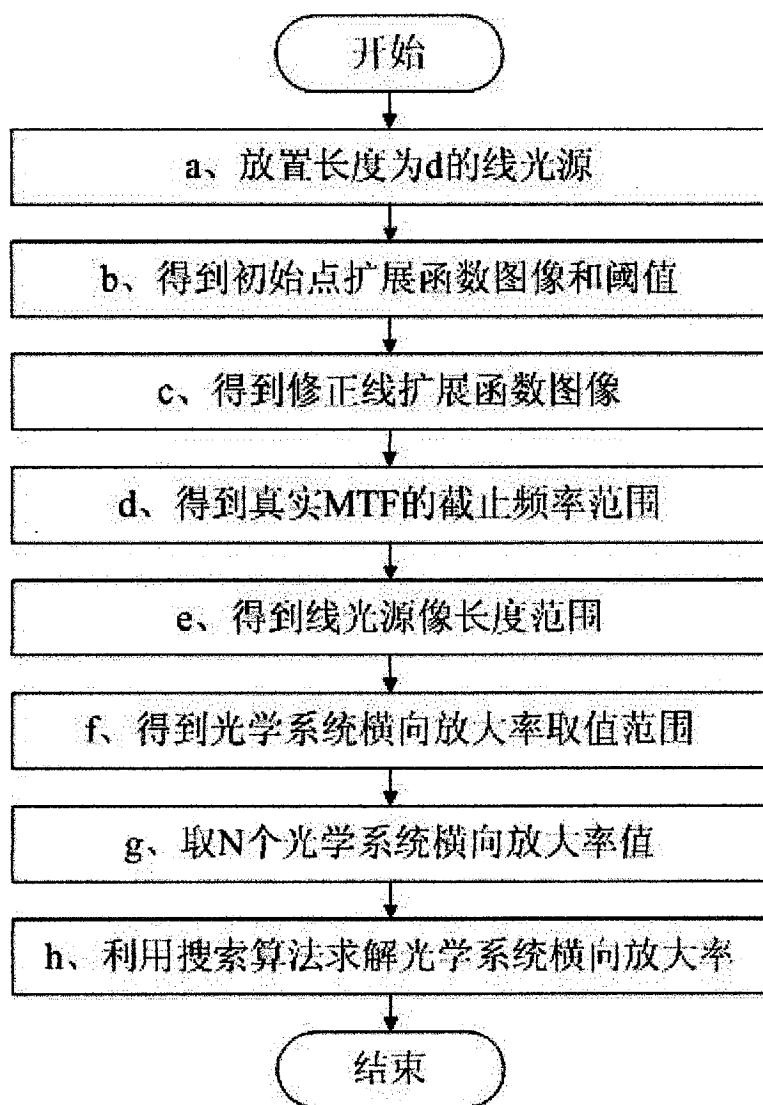


图 3

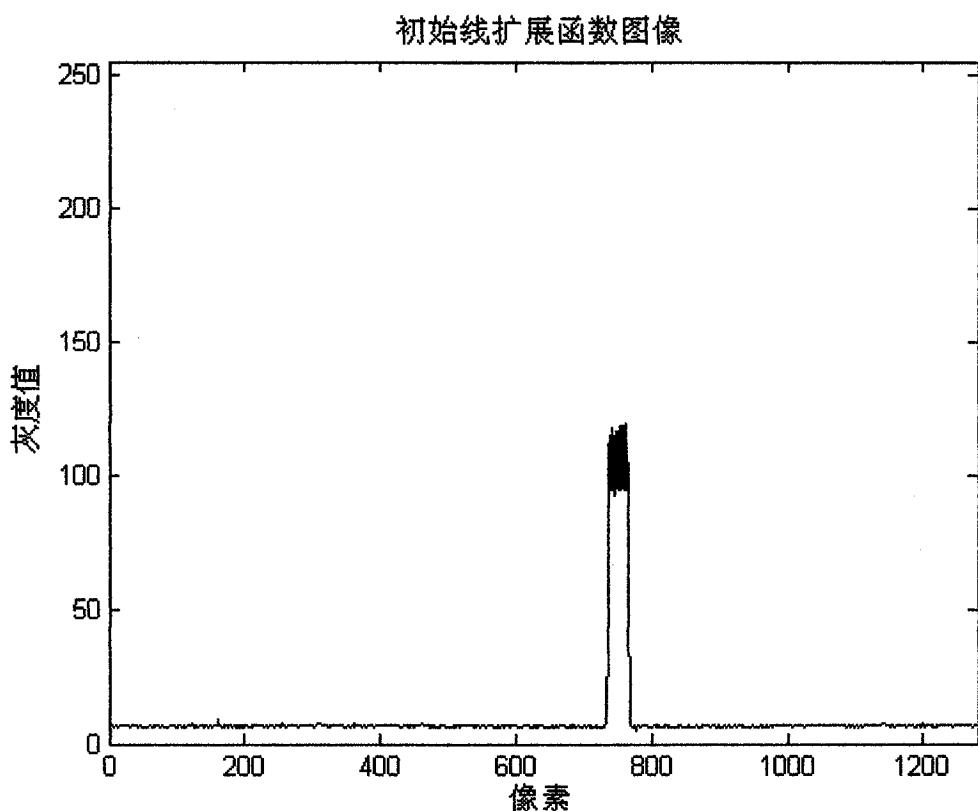


图 4

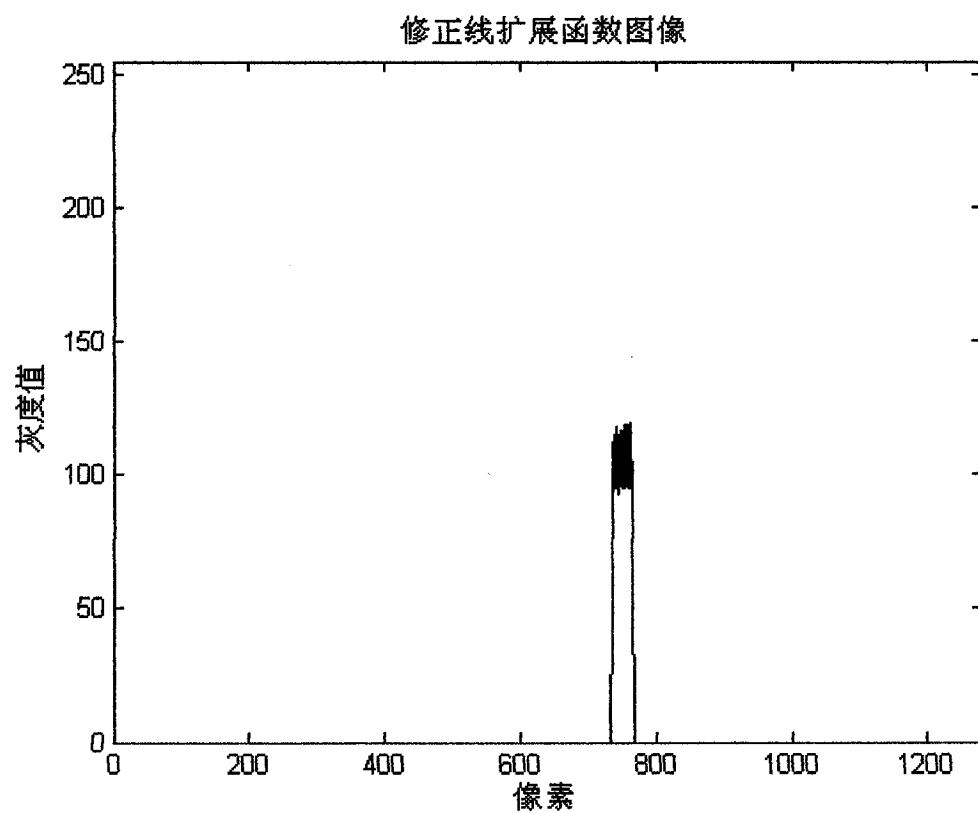


图 5