

抑制相干噪声的照明系统仿真与误差分析

齐先豪 韩森 张凌华 吴先钰 程俊 边小月

Simulation and error analysis of illumination system with coherent noise suppression

QI Xianhao, HAN Sen, ZHANG Linghua, WU Xianyu, CHENG Jun, BIAN Xiaoyue

引用本文:

齐先豪, 韩森, 张凌华, 等. 抑制相干噪声的照明系统仿真与误差分析[J]. 应用光学, 2023, 44(3): 533–538. DOI: 10.5768/JAO202344.0301009

QI Xianhao, HAN Sen, ZHANG Linghua, et al. Simulation and error analysis of illumination system with coherent noise suppression[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(3): 533–538. DOI: 10.5768/JAO202344.0301009

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0301009>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

长焦红外光学系统焦距的高精度测量技术

High-precision measurement of focal length for long-focus infrared optical system

应用光学. 2017, 38(6): 995–998 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0606002>

基于波长移相剪切干涉的准直波前重构技术

Collimated wavefront reconstruction based on wavelength phase-shifting shear interferometry

应用光学. 2020, 41(1): 67–73 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0102001>

基于 N 次图像旋转法的两平晶三面互检技术研究

Two-flat crystal three-sided mutual test technology based on N -position image rotation method

应用光学. 2021, 42(1): 104–112 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0103002>

基于物体像的干涉条纹图像中散斑噪声的识别方法

Recognition method of speckle noise in interference fringe images based on object

应用光学. 2017, 38(2): 221–226 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0202003>

谐振式光纤陀螺螺背向散射噪声抑制研究

Research on backscatter noise suppression for resonator fiber optic gyro

应用光学. 2018, 39(2): 290–294 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0208002>

浸没式光刻照明系统中会聚镜的设计及公差分析

Design and tolerance analysis of converging lens in immersion lithography illumination system

应用光学. 2019, 40(5): 876–881 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0505003>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 03-0533-06

抑制相干噪声的照明系统仿真与误差分析

齐先豪¹, 韩森^{1,2}, 张凌华^{1,2}, 吴先钰¹, 程俊¹, 边小月³

(1. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093; 2. 苏州慧利仪器有限责任公司, 江苏 苏州 215123;
3. 苏州科技大学 物理科学与技术学院, 江苏 苏州 215009)

摘要: 提出通过离轴照明系统抑制相干噪声的方案, 设计了一种具有抑制相干噪声能力的照明系统。通过 Zemax 的非序列模式对照明系统进行仿真, 得到了厚度为 90 μm 的离轴环形光斑, 验证了此照明系统对相干噪声的抑制能力。将其作为 19.05 mm (3/4 英寸) Fizeau 干涉仪的光源, 设置对比实验, 光源波长为 632 nm, 设置圆形噪点尺寸为 120 μm ~500 μm 和尺寸为 100 μm ×350 μm 的划痕。对设计的照明系统进行误差分析, 优化照明系统成像质量, 调整干涉系统参数, 最终在照明光环宽度为 42 μm 、干涉腔长为 15 mm 情况下, 干涉条纹的对比度提升至 97.60%。

关键词: 干涉测量; 相干噪声; 照明仿真; 条纹对比度

中图分类号: TN202

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0301009

Simulation and error analysis of illumination system with coherent noise suppression

QI Xianhao¹, HAN Sen^{1,2}, ZHANG Linghua^{1,2}, WU Xianyu¹, CHENG Jun¹, BIAN Xiaoyue³

(1. School of Optical-electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Suzhou H&L Instruments LLC, Suzhou 215123, China; 3. School of Physical Science and Technology, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

Abstract: A scheme for coherent noise suppression by an off-axis illumination system was proposed, and an illumination system with the ability to suppress coherent noise was designed. The illumination system was simulated by the non-sequential mode of Zemax to obtain an off-axis annular light spot with a thickness of 90 μm . To verify the ability of this illumination system to suppress coherent noise, it was used as the light source of a 19.05 mm (3/4 inch) Fizeau interferometer. A comparative experiment was carried out with a light source wavelength of 632 nm, and scratches were set with the circular noise spots size of 120 μm ~500 μm and the size of 100 μm ×350 μm . Error analysis of this illumination system was performed to optimize the imaging quality of the illumination system and adjust the parameters of the interferometric system. Finally, the contrast of the interference fringe was improved to 97.60% with illumination ring thickness of 42 μm and interference cavity length of 15 mm.

Key words: interferometry; coherent noise; illumination simulation; streak contrast

引言

现代干涉测量技术作为光学检测的重要手段, 在光学加工和产品质量检测等方面具有举足轻重的地位。与一般的光学成像测量技术相比, 干涉测量技术具有精度高、分辨率高、量程大等不可取

代的优势^[1]。但是使用激光作为光源时, 也会带来一些弊端。例如, 高度的时空相干性, 使得激光发生光学干涉时具有极端的灵敏性。再者, 因光学元件在微观尺度上存在缺陷, 在进行干涉测量时会发生局部的反射和衍射, 进而产生相干噪声, 破

收稿日期: 2022-07-18; 修回日期: 2023-01-23

基金项目: 国家自然科学基金 (62127901)

作者简介: 齐先豪 (1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学设计和干涉测量等研究。E-mail: 13035085171@163.com

通信作者: 韩森 (1961—), 男, 博士, 教授, 主要从事光学干涉计量研究。E-mail: senhanemail@126.com

坏干涉图的空间结构,引起了测试面和波前形状的测量误差。抑制相干噪声,去除其对干涉测量结果的影响,一直是目前光学检测行业追求的目标^[2-3]。

为了抑制相干噪声,许多学者付出了努力,提出了各种不同的方案。例如,可在成像目镜的焦面处放置旋转毛玻璃,使入射到旋转毛玻璃上的激光作为扩展光源;改变入射到干涉仪上光束的入射角,进而得到平均化的测试结果。上述方法均为从硬件角度进行的改进,从非硬件角度来说,也有众多方案,如对获取的面型或波前数据进行低通滤波处理,滤除高频部分的相干噪声等^[4]。行业内,Zygo 根据离轴照明的技术原型,率先提出了采用离轴环形光源干涉仪抑制相干噪声的方案。这种光源只对光学干涉腔内产生干涉,有效抑制了干涉腔外相干噪声的产生,但其存在一些缺陷,如系统复杂、成本高、产生的干涉条纹对比度较低等等^[5]。为此,本文基于离轴照明抑制相干噪声的技术原理,重新设计了一种具有抑制相干噪声能力的照明系统,针对此系统进行仿真和误差优化,从而提升其效用。

1 抑制相干噪声原理

在采用经典照明系统 Fizeau 干涉仪中,离轴点光源 S 发出光波,其路径如图 1 所示。光波经过分束器和准直透镜后,以与光轴倾斜一定角度的平行光束出射。平行光束一部分经过参考面上 P 点反射回去,另一部分透射光线打到测试面上 Q 点,经过测试面反射回去。包含被测面上 Q 点信息的

光线与在 P 点被反射回去的参考光线在准直透镜前重合,发生干涉,干涉条纹经过准直器和分束器后成像于 CCD^[6-9]。

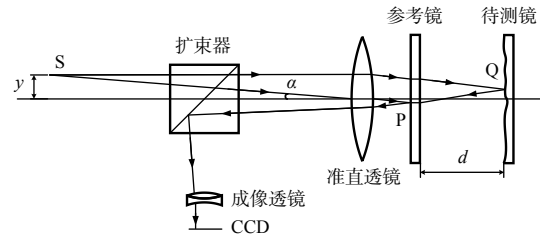


图1 离轴点光源干涉测量原理

Fig. 1 Schematic of interferometry of off-axis point light source

当离轴量为 r 的点光源足够多时组合起来,作为半径为 r 的环形光源,用平均环半径 $\bar{r}$ 表示环光源的大小,光路如图 2 所示。在图 2 中,点 M_i 是参考面上半径为 r_M 圆弧上的点。

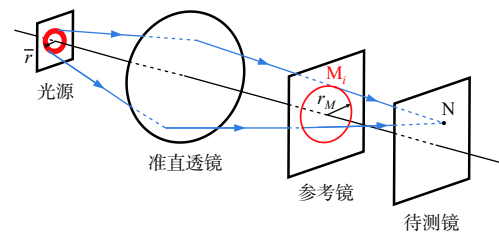


图2 离轴环形光源干涉测量原理

Fig. 2 Schematic of interferometry of off-axis toroidal light source

对于平均环半径为 $\bar{r}$ 的离轴光源来说,设其最大和最小环半径分别为 r_2 和 r_1 ,此时 CCD 上 N 的像点的光强可表示为^[6-9]

$$I_N = \frac{1}{\pi r_2^2} \int_{r_1}^{r_2} I_Q(y) \cdot 2\pi y dy - \frac{1}{\pi r_1^2} \int_{r_1}^{r_2} I_Q(y) \cdot 2\pi y dy = \frac{1}{\pi(r_2^2 - r_1^2)} \int_{r_1}^{r_2} \left\{ I_R + I_T + 2\sqrt{I_R I_T} \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{-dy^2}{f^2} + 2d \right) \right] \right\} \cdot 2\pi y dy =$$

$$I_R + I_T + 2\sqrt{I_R I_T} \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{-dr_2^2 - dr_1^2}{2f^2} + 2d \right) \right] \frac{\sin \left(\frac{\pi dr_2^2 - \pi dr_1^2}{\lambda f^2} \right)}{\frac{\pi dr_2^2 - \pi dr_1^2}{\lambda f^2}} \quad (1)$$

式中:包含 Q 点信息的光线在 CCD 上的光强为 I_Q ; I_R 为参考面上 P 点的光强; I_T 为测试面上 Q 点的光强; λ 为光源的波长; d 为干涉腔长; f 为准直镜焦距; y 为光源 S 的离轴距离。不同的离轴点光源发出的光线,经过参考面上不同点 M_i 和 N 后都发生干涉,最终在 CCD 上得到来自于光源上不同离轴点光源对同一个待测点 N 的叠加测量信息。测试面上某一个待测点 N 的干涉信息,可看作是由环光源上所有离轴点光源共同参与得到的^[4]。以

此类推,待测面上所有待测点的干涉信息叠加后可得到干涉图,其形成于环形光上各个点的积分过程,积分过程有效平滑了系统中存在的噪声,且不会改变测试面的相位信息^[10]。

2 仿真

2.1 照明系统结构设计

本文仿真建模了一套能够用于 19.05 mm(3/4

英寸)Fizeau 干涉仪的离轴环形光源系统。光源部分的仿真光路如图 3 所示, 光线方向从左至右。在 Zemax 软件中对照明系统进行设计, 选择直径为 2 mm、波长为 632.8 nm 的高斯光束作为照明系统的光源进行模拟, 高斯光束经过准直扩束系统和中间带有遮光部分的特殊透镜后形成环形像斑。该圆环离轴量太大, 不能直接作为 Fizeau 干涉仪的光源进行下一步仿真。为此, 在后续系统中加入双远心光路, 对环形像斑进行缩放, 缩放到合适的尺寸。为得到对相干噪声较好的抑制效果, 19.05 mm Fizeau 干涉仪使用环半径为 0.13 mm~0.45 mm 的环形光源作为光源, 后续的缩放光路在保持像质的情况下必须满足该要求。

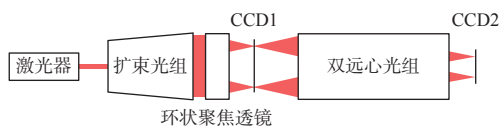


图 3 抑制相干噪声照明系统

Fig. 3 Illumination system with coherent noise suppression

2.2 照明系统仿真

在 Zemax 非序列模式中对光源系统进行仿真。采用高斯光源作为源光源, 波长为 632.8 nm, 能量为 100 W, 光束宽度为 2 mm。为了滤除杂散光, 给光组中各透镜的前后表面均进行镀增透膜处理。在双远心光组的物面和像面处加入探测器, 分别位于图 4 中 CCD1 和 CCD2 上。CCD1 尺寸为 10 mm×10 mm, 像素数为 600×600, CCD2 尺寸为 0.6 mm×0.6 mm, 像素数为 600×600。通过 Zemax 中光线追迹功能进行追迹, 追迹 10^8 条光线, 得到的结果如图 4 所示。从图 4 可以看出, 光线追迹得到了直径为 0.56 mm, 环宽为 90 μm 的离轴环形光斑。

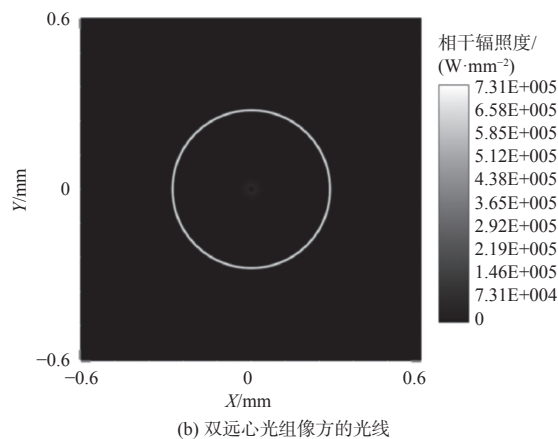
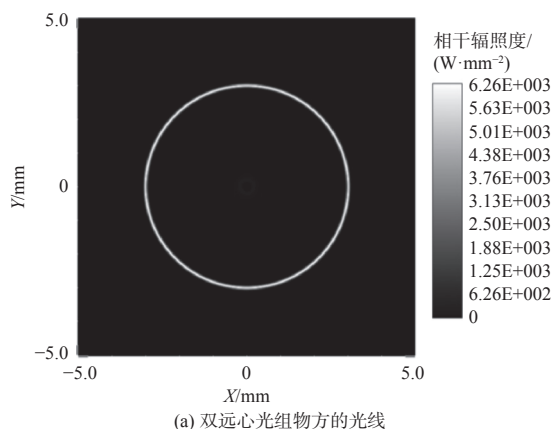


图 4 CCD 上接收到的光线

Fig. 4 Diagram of light received on CCD

在光线经过双远心光组之前总功率为 80.808 W, 峰值辐照度为 $6.260 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$ 。当光线经过双远心光组后, 探测器得到的图像 (即最终形成的光源) 总功率为 80.077 W, 峰值辐照度为 $7.307 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 。CCD 上峰值辐照度数量级由原来的 10^3 W/cm^2 提高至 10^5 W/cm^2 , 峰值辐照度的提高说明后者的光线能量更为集中, 表明后续光路中杂散光线的占比降低了。同时, 双远心光组的加入使得光线总功率降低了不到 1 W, 相比功率 100 W 的源光源来说, 光线功率损失微乎其微。

2.3 对比仿真实验

为验证照明系统对相干噪声的抑制能力, 设计了对比仿真实验。对比实验中, 一组采用传统的点光源作为照明系统进行仿真, 另外一组采用本文设计的离轴照明系统进行仿真。对比实验采用控制变量法, 干涉系统部分光路参数完全一致, 且均在准直透镜处设置噪声。引入噪声是通过布尔运算功能实现的。用圆柱模拟透镜上的灰尘、油污等圆形噪声源, 用矩形体模拟透镜的瑕疵和划痕。圆柱尺寸分别为: 直径 200 μm 、长 500 μm ; 直径 120 μm 、长 400 μm 。矩形体尺寸为: 100 $\mu\text{m} \times 350 \mu\text{m}$ 、100 $\mu\text{m} \times 450 \mu\text{m}$ 、100 $\mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$, 2 个矩形体相对于 y 轴倾斜角度为 -15° 和 10° 。在被测面倾斜角同为 0.05° 情况下追迹 10^8 根光线, 分别得到的干涉图如图 5 所示。

与图 5(a) 相比, 图 5(b) 中亮条纹间的间隔更远了, 这是由于在照明系统的像面处加入了散射平板导致的。在实际实验中, 为去除离轴光源在 CCD 探测器处引起的轴上极亮点, 往往在环形光源所在平面上加入旋转的散射元件。本仿真中在

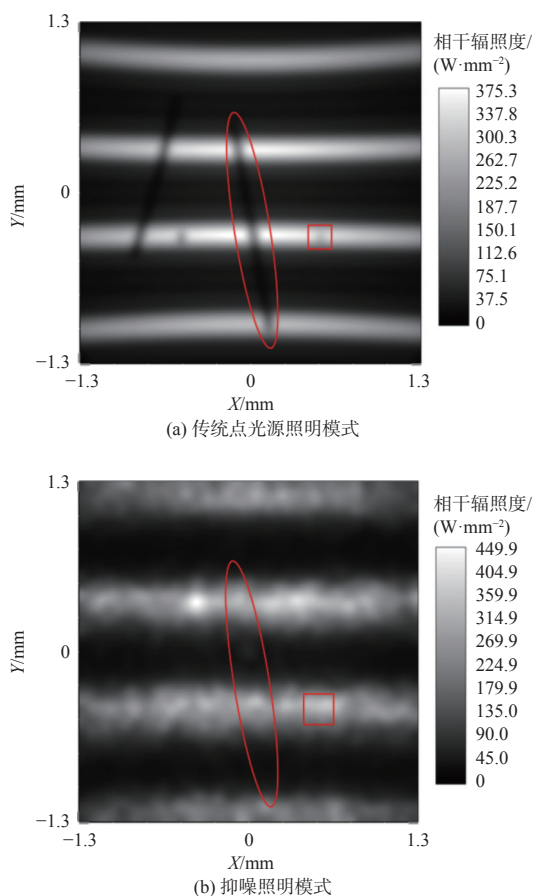


图 5 不同照明模式下的干涉图

Fig. 5 Interferogram in different lighting modes

光源像斑处加入了一块厚度为 1 mm 的散射板, 散射类型为体散射, 平均光程为 0.15, 散射角度为 7° 。

在仿真中, 由于 Zemax 仿真功能的限制, 只能模拟出静止的散射元件, 无法有效模拟旋转的元件。相干光束透射进散射元件内部后, 由于体散射元件内部折射率不均匀, 导致光线出射方向不一致。由于加入静止散射板, 使最终成像的条纹有很大的散斑噪声。这些散斑噪声使干涉条纹像素点分布不规则, 导致最终得到的图像产生类似烟雾的颗粒状效果。因为照明系统加入了散射元件且仿真功能受限, 使图 5(b) 中存在着较为严重的散斑噪声。但对于加入的划痕和圆形噪声点来说, 图 5(b) 有较好的抑制效果。图 5 中标记了部分划痕和圆形噪声源在干涉图上引入的噪声。在采用传统照明模式的追迹结果图 5(a) 中, 噪声的加入破坏了干涉图的空间结构, 亮条纹之间最大峰值辐照度差异较大, 对干涉测量结果的准确性带来了较大误差。在图 5(b) 中标记位置没有出现明显的噪声, 可见在抑制缺陷引起的相干噪声时, 图 5(b) 效果更好, 证明本文系统对狭义上的相干

噪声有更好的抑制效果。

3 误差分析

本文设计的照明系统的干涉仿真结果如图 5(b) 所示, 虽然抑制了相干噪声, 但干涉图的清晰度却十分低, 条纹对比度也不高。本文仿真模型分为照明系统和干涉系统两部分, 误差大体上分为随机误差和系统误差两大类。随机误差主要为每次仿真时追迹光线的随机分布, 导致探测器上接收到的图像能量差异。对于随机误差, 可多次追迹大量光线, 并对这些追迹结果取平均值。在进行仿真和光线追迹时, 干涉系统及照明系统的参数没有发生变化, 因此将 2 个系统的误差看作是仅有系统误差。

3.1 照明系统误差

进行光线追迹时, 由于照明系统内部存在像差导致环厚度提升, 进而影响干涉条纹对比度和清晰度。CCD 上干涉条纹对比度为

$$\zeta = \left| \frac{\sin\left(\frac{\pi dr_2^2 - \pi dr_1^2}{\lambda f^2}\right)}{\frac{\pi dr_2^2 - \pi dr_1^2}{\lambda f^2}} \right| = \left| \sin c \left[\frac{\pi d(r_2^2 - r_1^2)}{\lambda f^2} \right] \right| \quad (2)$$

针对上式变量进行误差分析。在 Matlab 中进行模拟, 干涉腔长取 10 mm, 仅光斑厚度 r_2 和 r_1 为变量, 得到照明系统的环宽度与对比度的关系, 如图 6 所示。从图 6 可以看出, 随着离轴光斑厚度增大, 条纹对比度也逐步下降。当条纹对比度大于 95% 时, 环宽度 ≤ 0.058 mm, 即 $\leq 58 \mu\text{m}$ 。

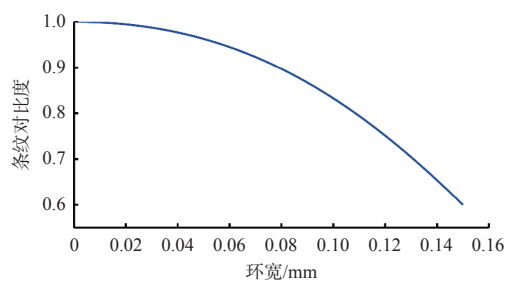


图 6 环宽与条纹对比度的关系

Fig. 6 Relationship between ring thickness and stripe contrast

在 Zemax 中对照明系统的像差进行分析, 其主要像差来源于双远心光路部分, 双远心光路部分的像差类型为畸变和像散。考虑到双远心光路前的像有一定的厚度, 故设置在 y 方向上高度为 3.0 mm、2.816 mm 和 2.632 mm 共 3 个视场, 以 3 个

视场的成像质量评价该光组的成像设计情况。添加一系列控制操作数以控制像差、数值孔径和远心度,根据优化需要调整权重,以成像质量和不同视场的像点距离(最后形成光斑的厚度)为目标进行改进优化。优化前后双远心光路像面全视场光斑如图7所示。优化后艾里斑半径由 $4.118\ \mu\text{m}$ 减小至 $3.218\ \mu\text{m}$,三视场光斑在 y 轴方向上的距离(即光源的环形宽度)从 $90\ \mu\text{m}$ 减小至 $42\ \mu\text{m}$ 。相较于优化前,像点光斑的艾里斑半径缩小了,且在3种不同视场条件下,该光路均表现出较好的成像质量,像差均控制在理想范围内,光斑也几乎都在艾里斑内。根据图6中的关系可得出此时理论条纹对比度为0.954。

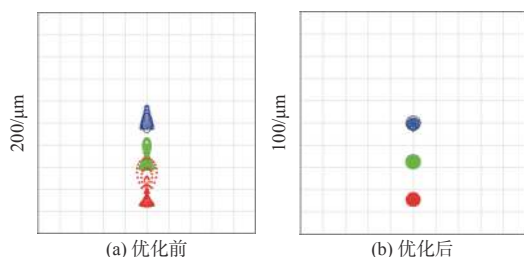


图7 双远心光组像方点列图

Fig. 7 Spot diagram of double-telecentric light group image square

为了消除经过分束器反射回来的杂散光对干涉成像的影响,把照明系统像面处的辐照度信息收集到探测器内,保存成EULUMADAT文件,再把该文件导入到干涉仪前作为干涉仪的光源。

3.2 干涉系统误差

根据(2)式中的关系,除环宽外,干涉腔长 d 同样会影响条纹对比度。将环宽固定为 $42\ \mu\text{m}$,仅干涉腔长 d 为变量进行模拟,得到干涉腔长与条纹对比度的关系如图8所示。从图8可看出,随着干涉腔长 d 的增大,条纹对比度显著下降。若想得到条纹对比度大于0.950的干涉条纹,理论上干涉腔长

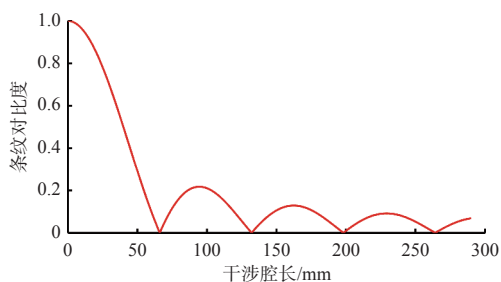


图8 干涉腔长与条纹对比度的关系

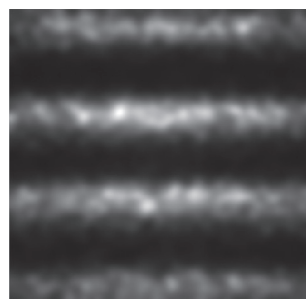
Fig. 8 Relationship between interference cavity length and stripe contrast

$d \leq 15.43\ \text{mm}$ 。为便于仿真,将干涉腔长改为 $10\ \text{mm}$,此时理论条纹对比度为0.962。

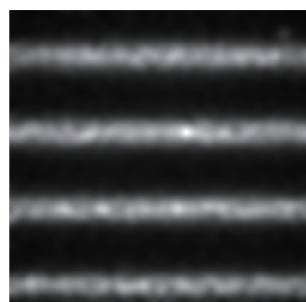
除去以上干涉腔长对条纹对比度的误差外,影响最后成像质量的还有干涉系统中镜片本身的误差,如准直镜像差。准直镜的准直效果在一定程度上也会影响最终的干涉效果,同样在Zemax中采用阻尼最小二乘法对其进行优化。优化准直镜的像差到合理范围内,并在重新建模的干涉系统中采用优化后的准直镜片。

3.3 重新建模比较

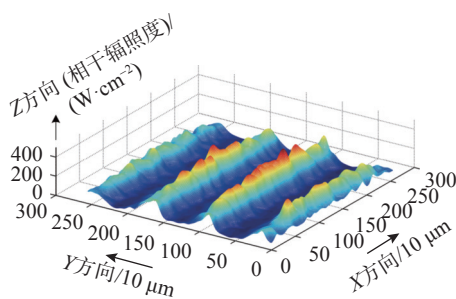
将优化后的照明系统与干涉仪重新建模,此时照明系统光斑厚度为 $42\ \mu\text{m}$,干涉腔长为 $15\ \text{mm}$ 。经过验证,该系统在光线条数超过 10^8 后,得到的干涉图像几乎没有差别,因此可认为在达到 10^8 条光线后,仿真结果收敛,此时仿真得到的干涉图更接近真实结果。进行10次光线追迹,每次追迹 10^8 条光线,对10次收敛的仿真结果进行均值化处理,得到的干涉条纹图如图9所示。图9(a)为误差



(a) 优化前



(b) 优化后



(c) 优化前

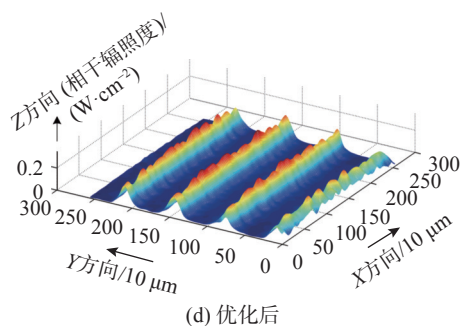


图9 误差分析优化前后的干涉条纹图

Fig. 9 Relationship between interference cavity length and stripe contrast

分析改进前追迹到的干涉条纹。在 Matlab 中导入图 9(a) 和图 9(b) 两张图片, 经过计算, 像面探测器得到的条纹对比度分别为 0.923 和 0.976。

4 结论

误差分析优化后照明系统的干涉条纹可见度大幅度提升, 像差得到了很好地控制。对比图 9(c) 和图 9(d) 可知, 对于最后的干涉条纹成像来说, 存在的像差极大地影响了干涉图中亮条纹的峰值分布, 图 9(c) 中仅有两根亮条纹的能量达到了红色, 且主要分布在视场中心区域; 图 9(d) 中优化改进后的亮条纹能量分布则较为均匀, 干涉图中亮条纹的宽度较细, 更接近于能量分布完全一致的理想干涉条纹。

本文仿真实验中, 选择与 19.05 mm 干涉仪结合进行研究, 最后的仿真结果表明, 设计的照明系统在此干涉仪上能发挥作用。本研究所有工作都是基于离轴照明技术原理和有关公式进行的, 因此, 使用其他参数的干涉仪或者其他波长的激光作为光源时, 本文的工作内容依然具有参考意义, 本文的照明系统对其他参数的干涉测量来说, 也具有一定的参考意义。

经过对比, 照明系统经误差分析改进后, 得到的干涉图条纹对比度显著提升, 改进前条纹对比度为 92.3%, 改进后可达到 97.6%, 条纹对比度提高了 5.3%。经过误差分析优化后的照明系统, 不仅对瑕疵引起的相干噪声有较强的抑制能力, 还能保持条纹对比度大于 95%。

参考文献:

[1] DECK L L, STEPHENSON D, GRATIX E J, et al. Ap-

paratus and method(s) for reducing the effects of coherent artifacts in an interferometer: US, US6643024 B2[P]. 2003.

[2] 徐燕, 吴永前, 李世芳, 等. 基于 Zemax 干涉仪建模的环形光源误差分析[J]. 光电工程, 2015, 42(2): 5.

XU Yan, WU Yongqian, LI Shifang, et al Error analysis of ring light source based on ZEMAX interferometer modeling [J] Opto-Electric Engineering, 2015, 42 (2): 5.

[3] RODRIGO J A, ALIEVA T. Rapid quantitative phase imaging for partially coherent light microscopy[J]. Optics Express, 2014, 22(11): 13472-13483.

[4] 王路佳. 环形光源在 Fizeau 干涉系统中的设计与研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.

WANG Lujia Design and research of ring light source in Fizeau interference system [D]. Nanjing : Nanjing University of Science & Technology, 2012.

[5] 于毅. Zygo 干涉仪及其应用的研究[D]. 天津: 天津大学, 2005.

YU Yi Research on Zygo interferometer and its application [D]. Tianjin: Tianjin University, 2005.

[6] 张佳莹. 高精度干涉仪的相干噪声抑制技术研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2018.

ZHANG Jiaying Research on coherent noise suppression technology of high-precision interferometer [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.

[7] 汪扬春. 非序列光线追迹程序计算精度的评价[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.

WANG Yangchun Evaluation of calculation accuracy of non sequential ray tracing program [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.

[8] KIMBROUGH B T. Path matched vibration insensitive Fizeau interferometer [D]. Arizona: The University of Arizona. , 2006.

[9] 朱日宏, 陈磊, 王青, 等. 移相干涉测量术及其应用[J]. 应用光学, 2006, 27(2): 85-88.

ZHU Rihong, CHEN Lei, WANG Qing, et al Phase shift interferometry and its application [J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27 (2): 85-88.

[10] 代洁. 基于 PMP 数字条纹投影的三维成像系统误差分析与研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2011.

DAI Jie Error analysis and research of 3D imaging system based on PMP digital fringe projection [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2011.