

外差式光栅三自由度精密测量系统设计

神文文

沈阳工业大学信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2025年5月19日; 录用日期: 2025年6月24日; 发布日期: 2025年9月3日

摘要

为了实现结构紧凑、测量精度高的三自由度位移测量, 提出了一种外差式光栅三自由度精密测量系统的设计。系统采用了Littow入射的光路结构, 有效简化了光路结构并降低了能量损耗。系统中引入二维反射式光栅作为核心测量元件, 提升了系统的测量能力与结构紧凑性, 并且对设计的系统的光学结构、测量原理进行了研究, 在二维光栅衍射的特性和外差式结构设计的基础上对系统进行了仿真, 该系统设计实现了2倍光学细分。基于ZEMAX软件完成了光学路径建模与光束追迹仿真, 获得干涉光的相干性图像; 随后利用MATLAB对干涉信号进行处理与对比度分析, 结果表明系统干涉条纹对比度达到0.992, 验证了所设计系统在理想状态下具备良好的相干干涉性能。此外, 系统理论分辨率达到0.10 nm, 表明了其在纳米级位移检测中的潜力。该系统具备结构简单、稳定性高、易于集成等优点, 适用于高精度多自由度位移测量场景。

关键词

衍射光栅, 外差测量, Littow结构, 三自由度测量

Design of Heterodyne Grating Three-Degree-of-Freedom Precision Measurement System

Wenwen Shen

School of Information Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang Liaoning

Received: May 19th, 2025; accepted: Jun. 24th, 2025; published: Sep. 3rd, 2025

Abstract

To achieve a compact structure and high-precision measurement in three degrees of freedom (3-DOF) displacement sensing, a heterodyne grating-based precision measurement system is proposed and designed. The system adopts a Littrow-incident optical configuration, which effectively simplifies the optical path and reduces energy loss. A two-dimensional reflective grating is introduced

as the core sensing element to enhance the system's measurement capability and structural compactness. The optical architecture and measurement principles of the proposed system are systematically investigated. Based on the diffraction characteristics of the two-dimensional grating and the heterodyne optical design, the system is simulated and achieves a two-fold optical subdivision. The optical path modeling and ray-tracing simulation are conducted using ZEMAX, and the coherence of the interference field is obtained. Subsequently, the interference signals are processed and analyzed in MATLAB, yielding a fringe contrast ratio of 0.992, which verifies the excellent coherent performance of the system under ideal conditions. Furthermore, the theoretical resolution of the system reaches 0.10 nm, demonstrating its potential for nanoscale displacement detection. The proposed system offers advantages such as structural simplicity, high stability, and ease of integration, making it suitable for high-precision multi-degree-of-freedom displacement measurement applications.

Keywords

Diffraction Grating, Heterodyne Measurement, Littrow Configuration, Three-Degree-of-Freedom Measurement

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,精密及超精密测量技术在现代加工和制造的领域,比如半导体制造、光刻机、精密仪器加工等领域取得了飞速发展。超精密位移测量不仅对材料的微观性能研究具有重要意义,也为高精度制造与加工的质量控制提供了关键技术支持,所以这也对超精密位移测量技术提出更高的要求。

在实现精密及超精密位移测量技术研究中[1][2],激光干涉仪[3]-[5]和光栅位移测量系统获得了大量的关注,以其高精度和大量程的优点受到了广泛的研究和使用。光栅位移测量系统[6]-[9]使用光栅栅距作为测量基准且光栅刻槽对环境变化敏感度更低,而且系统的结构简单紧凑,光路对称,光栅和读数头的距离小,不会随着待测距离的增加而增加,从而降低了环境对系统精度的影响。因而光栅位移测量系统更符合设计要求[10]。在光栅干涉的基础上,因外差光栅干涉具有光栅抗环境扰动和信噪比高的优点,使得噪声进一步降低。光栅位移测量系统的光路设计的入射类型可以分为垂直入射和斜入射两种。采用利特罗入射[11],可以让入射光和衍射光共享一条路径,减少了分光元件或者额外反射元件带来的能量损失,同时使光路设计更加简单,而且因为角度接近最佳的设计条件,衍射光信号较强。

另一方面,光栅位移测量系统的光学结构让多自由度测量更方便[12]。实现三自由度测量通常是使用三个一维光栅,每个光栅分别测量一个自由度。但是因为需要多个光栅需要精确对准,安装精确度会下降,同时增加了系统的复杂度[13]。近年来使用二维光栅实现多个方向的测量逐渐受到了青睐。二维光栅通过单一光栅实现多个方向的测量,具有结构紧凑、抗干扰能力强等优点,从而在精密位移测量领域得到了越来越多的应用[14]。

近年来,三自由度位移测量的研究主要有几种常见方案。第一种是使用三套一维干涉仪分别测量X、Y、Z三个方向的位移,但这种方法系统结构比较复杂,需要对多个光路进行精确计算,系统集成难度比较大。第二种是基于光栅的方案,通常使用三个一维光栅垂直安装来实现三维测量,这种结构比干涉仪要紧凑一些,但对光栅的对准精度要求很高,稍有误差就会影响测量精度,装配也不太方便。第三种是近年来比较热门的集成式测量方法,使用二维或三维光栅,通过一个光栅同时实现多个方向

的位移测量, 结构更简单, 抗干扰能力强, 但对光路设计要求更高。综合来看, 本文提出的三自由度外差式位移测量系统, 采用的是一块二维反射光栅和利特罗角入射结构, 不仅简化了系统结构, 减少了光学元件的使用, 还有效降低了光能损耗, 提高了系统的稳定性和测量精度, 具有较强的优势和实用性。

因此, 为了实现三自由度精密位移测量系统的设计, 本文提出了一种基于利特罗角的三自由度外差式光栅精密位移测量系统, 实现了 X , Y , Z 三个自由度的测量, 该系统在三自由度测量的系统中使用了利特罗角入射, 使得该系统的结构更加简单紧凑, 同时减少光能量的损失, 实现更高精度的三自由度测量。

2. 相关工作

2.1. 系统的结构

三维位移测量的系统的结构如图 1 所示。系统的组成包括分光光路和测量单元, 测量部分包括一块偏振分光棱镜 PBS, 2 片四分之一波片 QWP_1 和 QWP_2 , 一块反光镜 M, 一个折光棱台 R。

双频激光器发出的激光具有一定的频率差, 并且两束光的偏振方向彼此正交。经过双光栅分光后, 光束被分为四束等效光, 进入偏振分光棱镜 PBS 中。以 a 实线为例: 激光进入 PBS 之后被分成透射光(P 偏振光)和反射光(S 偏振光), P 偏振光透射, S 偏振光反射。S 偏振光经过四分之一波片 QWP_1 之后会变成左旋圆偏光, 左旋圆偏光经过反射镜 Mirror 反射后再次经过四分之一波片 QWP_1 变成 P 偏振光, P 偏振光再次经过 PBS 后就透射。P 偏振光透射, 先经过一个四分之一波片 QWP_2 变成右旋圆偏光, 经过折光元件全反射以利特罗角入射再原路返回, 再次经过 QWP_2 变成 S 偏振光, S 偏振光再次经过 PBS 反射出去, 与 S 偏振光形成一个干涉合束。所采用的外差探测器自带了一个偏振片, 这个偏振片会把两个光的偏振态改成一致, 所以在 PD_1 就可以形成一个稳定干涉。同理, 其他三束光也会经过相同的干涉进入接收器。

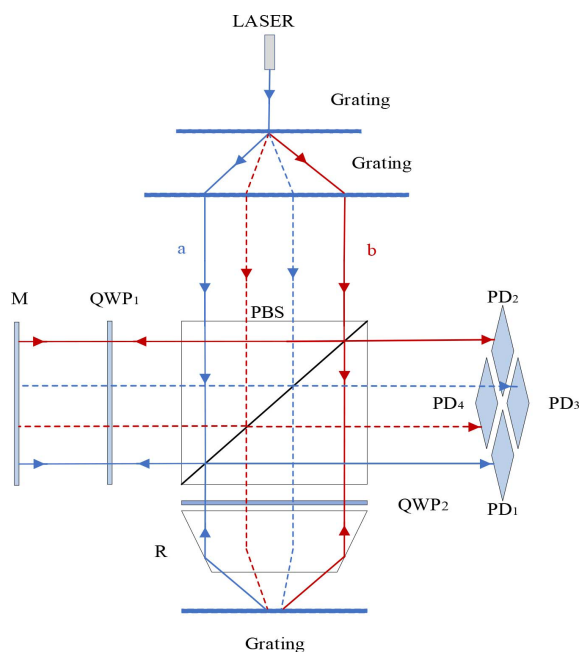


Figure 1. Schematic diagram of the grating displacement measurement system

图 1. 光栅位移测量系统示意图

干涉后的光学测量信号将被光电探测器转换为电信号，之后由相位计数板卡进行差分运算、数字采样和电子细分。通过电子细分算法对采样信号进行插值处理，可实现高于原始干涉条纹周期的亚波长级位移测量，从而进一步提高系统的测量分辨率和精度。该处理过程在整个位移测量系统中起到了承上启下的关键作用，是实现高精度测量结果的重要保障。

2.2. 位移测量系统原理

本系统采用双频激光器作为光源，其输出由两束频率分别为 f_1 和 f_2 的线偏振光组成，且偏振方向正交，存在固定频率差 $\Delta f = f_1 - f_2$ 。设两束光的复振幅分别为：

$$\begin{aligned} E_1 &= E_s e^{j(2\pi f_1 t + \phi_0)} \\ E_2 &= E_p e^{j(2\pi f_2 t + \phi_0)} \end{aligned} \quad (1)$$

经过光路系统中的偏振分光器件和波片后，两束光分别被引导至光栅干涉臂，部分光在与二维光栅交互后获得了由于相对运动产生的多普勒频移。

设光栅在某方向以速度 v 运动，衍射级次为 m ，光栅常数为 d ，则根据光栅运动引起的相位调制，可得频移量为：

$$\Delta f_D = \frac{mv}{d} \quad (2)$$

在时间 t 内，对应相位变化为：

$$\Delta \phi = 2\pi \Delta f_D t = \frac{2\pi m}{d} vt = \frac{2\pi m}{d} \Delta x \quad (3)$$

其中， $\Delta x = vt$ 表示光栅在该方向的位移。

将上述含多普勒效应的光束与参考光束叠加后，可得到干涉光场，其总复振幅为：

$$E(t) = E_1 + E_2 e^{j\left(2\pi \Delta f t + \frac{2\pi m}{d} \Delta x\right)} \quad (4)$$

相应的光强为：

$$I(t) = |E(t)|^2 = |E_1|^2 + |E_2|^2 + 2|E_1||E_2|\cos\left(2\pi \Delta f t + \frac{2\pi m}{d} \Delta x + \Delta \phi_0\right) \quad (5)$$

其中 $\Delta \phi_0 = \phi'_0 - \phi_0$ 为初始相位差。

在二维光栅中，假设其具有 x 、 y 两个正交衍射方向，同时考虑 z 方向的位移会导致光程长度变化。三维位移造成的相位变化如下：

X 方向：

$$\phi_x = \frac{2\pi m}{d_x} \Delta x \quad (6)$$

Y 方向

$$\phi_y = \frac{2\pi m}{d_y} \Delta y \quad (7)$$

Z 方向

$$\phi_z = \frac{2\pi m}{d_z} \Delta z \quad (8)$$

因此，总干涉信号相位为：

$$\phi_{\text{total}} = \phi_0 + \frac{2\pi m}{d_x} \Delta x + \frac{2\pi m}{d_y} \Delta y + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta z \quad (9)$$

通过在系统中设计四通道干涉信号，并设置不同的光路方向与入射路径角度，可求出三维位移：

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{bmatrix} \cdot \frac{\lambda}{2\pi} \quad (10)$$

其中 ϕ_i 是干涉条纹解调得到的相位， A 为光路几何响应矩阵。

3. 光栅位移测量系统仿真

在 ZEMAX 中，有两种光线追迹方法分别为序列模式和非序列模式，序列模式主要应用于成像系统的设计和优化，非序列模式更加适用于复杂的光学系统，根据设计需求，分光光路和光栅位移测量系统的仿真均选择了非序列模式，接下来将对位移测量系统进行仿真与分析。为了验证设计的可行性，在 ZEMAX 中搭建了仿真模型进行了测试，图 2 为仿真软件搭建的模型。仿真中使用的双频激光器波长为 632.8 nm，分光光路部分的光栅为透射光栅，光栅栅线密度为 1200 line/mm，测量系统中光栅为二维反射光栅，光栅栅线密度为 2400 line/mm，四个探测器尺寸为 5 mm × 5 mm。

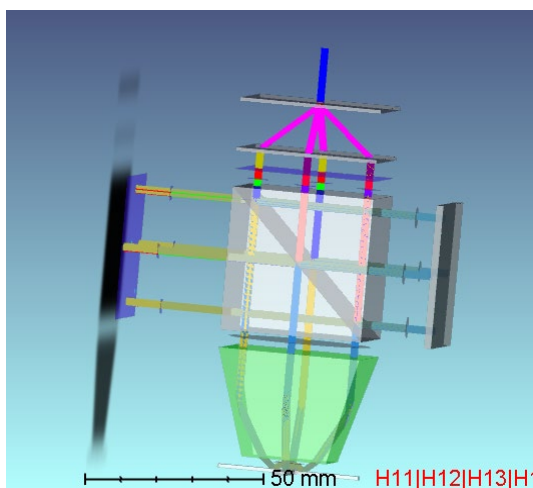


Figure 2. ZEMAX simulation model

图 2. ZEMAX 仿真模型

在 ZEMAX 仿真中采用了使用琼斯矩阵来表示四分之一波片[15]。很多偏振器件会使用琼斯矩阵，如半波片，一般波片，反射原件等。偏振光在通过偏振器件后的偏振状态会发生变化，设在偏振光进入偏振器件前的偏振状态是 $E_1 = \begin{pmatrix} A_1 \\ B_1 \end{pmatrix}$ 通过偏振器件后的偏振状态为 $E_2 = \begin{pmatrix} A_2 \\ B_2 \end{pmatrix}$ ，由此可以得到偏振器件的线性变换作用，可用一个 2×2 的矩阵来表示，即

$$G = \begin{pmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{pmatrix} \quad (11)$$

则偏振光的变化可以表示为

$$\begin{pmatrix} A_2 \\ B_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 \\ B_1 \end{pmatrix} \quad (12)$$

矩阵 G 代表了偏振器件的琼斯矩阵，在调控偏振态的过程中，偏振器件通过改变线性变换从而改变偏振态[16]，新的偏振态由偏振态的两个分量的线性组合组成。

物体编辑的参数如表 1 所示。

Table 1. Object editing parameters
表 1. 物体编辑参数

物体类型	标注	材料
光源	双波长椭圆光	
PBS	多边形物体	H-K9L
QWP	琼斯矩阵	
M	平面反射镜	MIRROR
PD1、PD2	矩形探测器	ABSORB
衍射光栅	矩形光栅	BK7

根据设计需求，测量系统中光栅为二维反射光栅，光栅栅线密度设置为 2400 line/mm，光栅的反射阶数设置为 ± 1 ，反射率设为 0.45，尺寸为 2 mm $\times$ 20 mm，厚度为 1 mm；折光棱台的尺寸设置为 20 mm $\times$ 11 mm $\times$ 20 mm，模型折射率设置为 1.52；本文选择了四个矩形探测器作为光栅位移测量系统的探测单元部分，探测器尺寸都为 2 mm $\times$ 2 mm， X 和 Y 像元数为 200 $\times$ 200；对搭建好的系统进行光线追迹，其中光线条数设置为 30 条，分析的光线条数设置为 1×10^6 。

光栅位移测量系统的分辨力主要由以下三个因素决定：光栅周期 P 、光学细分倍数 O 和电子细分倍数 E [17]，可以由下式表示：

$$R = \frac{P}{E \times O} \quad (13)$$

光栅的栅线密度为 2400 line/mm，对应的栅距为 416.67 nm，在 2 倍光学细分的基础上，系统采用 2048 倍电子细分，经过计算可得该位移测量系统的理论分辨力为 0.10 nm。

4. 仿真结果及分析

4.1. 仿真结果

使用 ZEMAX 建立仿真模型后，对该模型进行光线追迹，探测器的干涉信号图像如图 3 所示。

由图 3 可知，光束通过光栅位移测量系统后，在探测器上形成具有明暗分布的干涉信号，结果与光栅位移测量系统的理论预期一致。

为了进一步评估所设计的外差式光栅三自由度位移测量系统的成像性能，本文使用 Zemax 软件对系统的几何调制传递函数(MTF)进行了仿真分析。图 4 展示了该系统在不同空间频率下的响应情况。

从仿真结果可以看出，在低空间频率范围(0~10 cycles/mm)内，系统的 MTF 值接近 1.0，表明系统在此频段具有较高的对比度和优异的成像保真度。在中高频段(10~50 cycles/mm)内，MTF 曲线逐渐下降，约在 20~30 cycles/mm 时降至 0.2~0.3，反映出系统的有效分辨率范围。MTF 曲线变化平稳，无明显振荡或突变，说明系统几乎不存在显著的像差或散光问题。

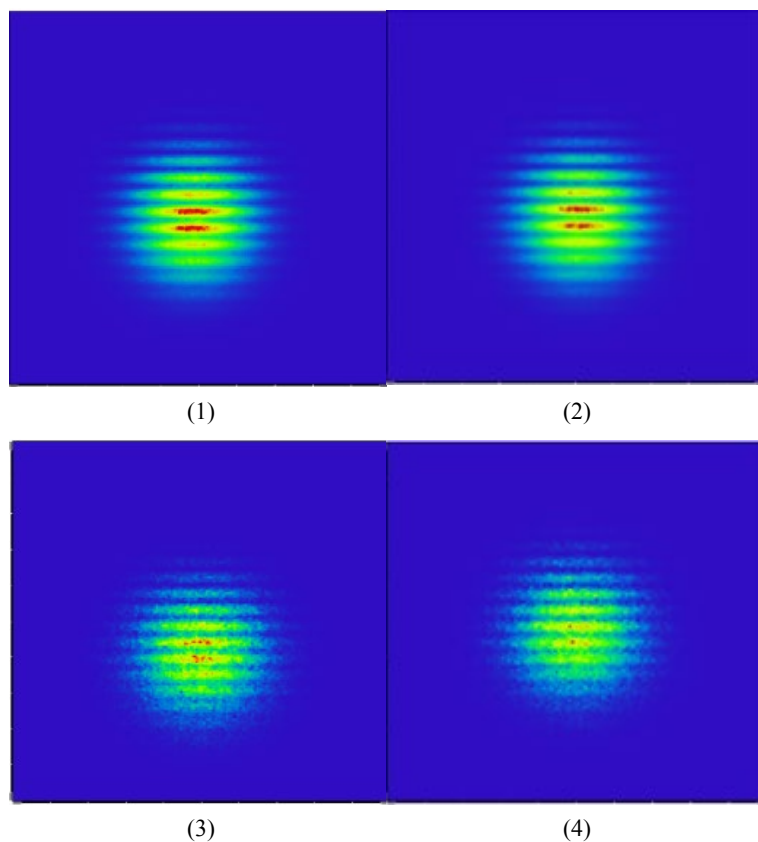


Figure 3. Image of the interference signal: (1) PD₁ interferometric image; (2) PD₂ interferometric image; (3) PD₃ interferometric image; (4) PD₄ interference image
图 3. 干涉信号图像: (1) PD₁ 干涉图像; (2) PD₂ 干涉图像; (3) PD₃ 干涉图像; (4) PD₄ 干涉图像

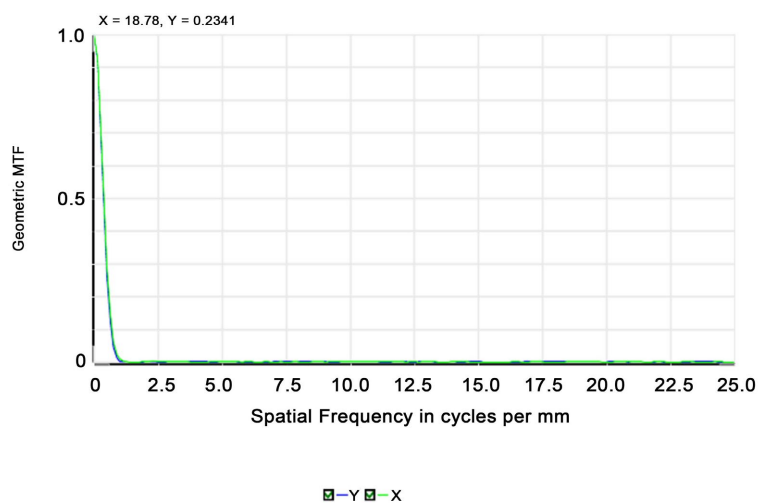


Figure 4. MTF simulation diagram
图 4. MTF 仿真图

上述仿真结果与系统功能高度一致。由于该系统依赖于高对比度的光栅干涉条纹进行位移检测，因此中频段内仍维持在 0.3 以上的 MTF 表现，有利于形成清晰的干涉条纹，从而提升后续 MATLAB 信号

处理的准确性。

4.2. 信号对比度仿真

在 ZEMAX 仿真中, 无法进行光电转, 所以使用 MATLAB 对干涉条纹图像进行处理。干涉条纹图像通过 ZEMAX 仿真后以图像形式输出, 导入 MATLAB 进行后续图像处理。首先对图像进行灰度化与归一化预处理, 然后选取干涉条纹中心区域提取一维剖面线, 计算光强分布曲线。利用 $\max()$ 和 $\min()$ 函数提取亮区和暗区的平均强度作为 $I_{\max}$ 和 $I_{\min}$, 随后代入公式 $V = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$ 计算对比度。整个处理流程可自动化批量处理多个干涉图, 确保对比度计算的稳定性与一致性。光强度分布图如图 5 所示。

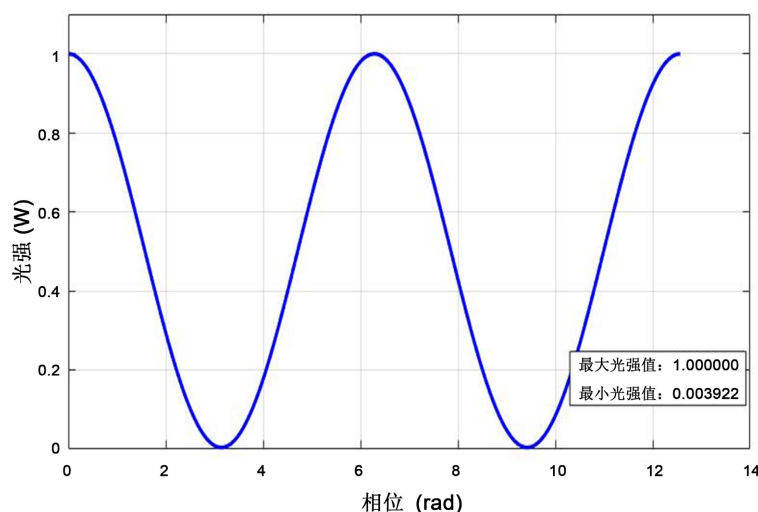


Figure 5. Signal contrast simulation diagram

图 5. 信号对比度仿真图

从 4 个图的仿真结果可以得出最大光强都为 $I_{\max} = 1.0$, 最小光强 $I_{\min} = 0.003922$ 。根据干涉条纹对比度 V 公式:

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (14)$$

根据信号对比度公式, 计算出来信号对比度 $V = 0.992$ 。对于设计的四通道位移测量系统来说, 由于系统是对称的, 所以光强的分布也是一致的, 换句话说, 光栅的相位调制和干涉效应在所有通道上是相同的。

对于高精度的精密位移测量系统来说, 其对比度范围在 0.9~1.0 之间, 因此对于本文设计的精密位移测量系统的仿真来说, 信号对比度 $\eta = 0.992$ 是符合设计要求的, 表示干涉光具有高度相干性, 且振幅相等、条纹清晰、边界锐利, 适合高精度测量。

5. 结论

本文设计了一种基于外差干涉原理和利特罗结构的三自由度光栅位移测量系统, 结合二维反射式光栅实现对 X 、 Y 和 Z 三个方向的高精度位移检测。系统结构紧凑, 光路简洁, 采用光学与电子细分相结合的方式, 显著提升了位移分辨率。为验证系统的可行性, 本文在 ZEMAX 中构建了完整的非序列光路仿

真模型, 获得了清晰的干涉图像, 并通过 MATLAB 处理得到干涉信号对比度 $V = 0.992$, 表明系统输出光具有良好的相干性和干涉质量。此外, 通过几何 MTF 分析可知, 该系统在低至中空间频率范围内具有较高的调制传递性能, MTF 在 0~10 cycles/mm 范围内接近 1, 在 20~30 cycles/mm 范围内保持在 0.3 左右, 表明系统具备较强的边缘分辨能力与成像保真度, 且无明显像差。

综上, 所提出的三自由度外差光栅位移测量系统在光学设计、信号对比度及空间频率响应方面均表现优异, 具有良好的工程实用性和进一步优化空间, 为高精度多维位移测量提供了一种可行的设计方案。

参考文献

- [1] 吕强, 李文昊, 巴音贺希格, 等. 基于衍射光栅的干涉式精密位移测量系统[J]. 中国光学, 2017, 10(1): 39-50.
- [2] 吕强. 基于衍射光栅的外差 Littrow 式精密位移测量系统关键技术研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2019.
- [3] Jang, Y.S. and Kim, S.W. (2017) Compensation of the Refractive Index of Air in Laser Interferometer for Distance Measurement: A Review. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, **18**, 1881-1890. <https://doi.org/10.1007/s12541-017-0217-y>
- [4] Yin, Y., Liu, L., Bai, Y., Jirigalantu, Yu, H., Bayanheshig, et al. (2022) Littrow 3D Measurement Based on 2D Grating Dual-Channel Equal-Optical Path Interference. *Optics Express*, **30**, 41671-41684. <https://doi.org/10.1364/oe.475830>
- [5] 赵慧洁, 张广军. 影响激光外差高精度计量的几个关键因素[J]. 北京航空航天大学学报, 2002(2): 221-224.
- [6] Yin, Y., Liu, Z., Jiang, S., Wang, W., Yu, H., Li, W., et al. (2021) Grating-Based 2D Displacement Measurement with Quadruple Optical Subdivision of a Single Incident Beam. *Optics Express*, **29**, 24169-24181. <https://doi.org/10.1364/oe.433244>
- [7] Yin, Y., Liu, Z., Jiang, S., Wang, W., Yu, H., Jiri, G., et al. (2022) High-Precision 2D Grating Displacement Measurement System Based on Double-Spatial Heterodyne Optical Path Interleaving. *Optics and Lasers in Engineering*, **158**, Article 107167. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2022.107167>
- [8] Sałbut, L. and Łuczak, S. (2021) Concept of an In-Plane Displacement Sensor Based on Grating Interferometry with a Stepwise Change of Sensitivity. *Sensors*, **21**, Article 4894. <https://doi.org/10.3390/s21144894>
- [9] 徐敏儿. 基于衍射光栅的高分辨力位移测量系统研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [10] Shen, Z., Guo, D., Zhao, H., Xia, W., Hao, H. and Wang, M. (2021) Laser Self-Mixing Interferometer for Three-Dimensional Dynamic Displacement Sensing. *IEEE Photonics Technology Letters*, **33**, 331-334. <https://doi.org/10.1109/lpt.2021.3062287>
- [11] Zhu, X. and Wang, B. (2024) Two-Dimensional Grating Metasurface for Communication Band under Littrow Mounting. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **57**, Article 355105. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ad501f>
- [12] Lv, Q., Wang, W., Liu, Z.W., et al. (2020) Grating-Based Precision Measurement System for Five-Dimensional Measurement. *Chinese Optics*, **13**, 189-202. <https://doi.org/10.3788/co.20201301.0189>
- [13] Hu, P., Chang, D., Tan, J., Yang, R., Yang, H. and Fu, H. (2019) Displacement Measuring Grating Interferometer: A Review. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, **20**, 631-654. <https://doi.org/10.1631/fitee.1800708>
- [14] 刘林. 大量程高精度小型化光栅位移测量系统关键技术研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2022.
- [15] Zhou, W., Sun, Y., Liu, Z., et al. (2025) A Random Angle Error Interference Eliminating Method for Grating Interferometry Measurement Based on Symmetry Littrow Structure. *Laser & Photonics Reviews*, **19**, Article 2401659.
- [16] Yu, K., Zhu, J., Yuan, W., Zhou, Q., Xue, G., Wu, G., et al. (2021) Two-Channel Six Degrees of Freedom Grating-Encoder for Precision-Positioning of Sub-Components in Synthetic-Aperture Optics. *Optics Express*, **29**, 21113-21128. <https://doi.org/10.1364/oe.427307>
- [17] 康森. 光栅干涉仪位移测量系统的读头结构设[D]: [硕士学位论文]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2022.