第 42 卷 第 9 期/2022 年 5 月/光学学报

封面文章・研究论文



# 快照式干涉成像光谱仪阶梯面形误差特性分析

吕金光1\*\*\*,梁静秋1\*,王维彪1,秦余欣1,2,陶金1

一中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

<sup>2</sup>中国科学院大学,北京 100049

**摘要** 快照式干涉成像光谱仪通过微透镜阵列多重成像与多级微反射镜相位调制的光场耦合,实现动态场景图像 光谱的同时探测。多级微反射镜的基片加工精度及膜层表面应力会导致阶梯面产生弯曲形变,从而影响光谱与成 像的质量。分析了多级微反射镜阶梯面弯曲形变的面形误差特性,建立了阶梯面形误差的光场传输模型。计算结 果表明,不同的阶梯面形误差分布情况会引起各视场干涉像点阵列不同的强度改变,并导致复原光谱中出现不同 的噪声分布特征。阶梯面形误差会在不同成像视场的复原光谱中引入相位误差,并对相干像点的强度分布进行调 制。重建光谱误差随着两个多级微反射镜阶梯矢高绝对值的增加单调递增,通过该关系便可以由阶梯矢高实测值 对系统性能进行评估,并为器件制作提供理论指导。

**关键词** 光谱学; 成像光谱仪; 快照; 傅里叶变换 中图分类号 O433.1 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS202242.0930001

# Characteristics of Step Surface Shape Error in Snapshot Interference Imaging Spectrometer

Lü Jinguang<sup>1</sup>", Liang Jingqiu<sup>1</sup>", Wang Weibiao<sup>1</sup>, Qin Yuxin<sup>1,2</sup>, Tao Jin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin, China;

 $^{\rm 2}$  University of Chinese Academy of Sciences , Beijing 100049, China

**Abstract** Through coupling the light fields of multiple imaging with a microlens array and phase modulation with multiple micro-mirrors, the snapshot interference imaging spectrometer achieves the simultaneous detection of the image and spectrum of a dynamic scene. The substrate processing accuracy and film surface stress cause the bending deformation of the step surfaces in the multiple micro-mirrors and further affect the quality of the spectrum and imaging. In this paper, the surface shape error characteristics of bending deformation of the step surfaces in the multiple micro-mirrors were analyzed to build a light field transmission model of the step surface shape error. The calculation results show that different distributions of the step surface shape error produce different intensity changes in the interference image point array in each field of view and different noise distribution characteristics in the recovered spectrum. The step surface shape error introduces a phase error into the recovered spectrum in different imaging fields and modulates the intensity distribution of coherent image points. The reconstructed spectrum error increases monotonically with the absolute value of the step sagittal height of the two multiple micro-mirrors. This relationship can be leveraged to evaluate system performance with the measured value of the step sagittal height and provide theoretical guidance for device fabrication.

Key words spectroscopy; imaging spectrometer; snapshot; Fourier transform

收稿日期: 2021-10-08; 修回日期: 2021-11-10; 录用日期: 2021-11-17

**基金项目**:国家自然科学基金(61805239,61627819,61727818)、吉林省科技发展计划(20190303063SF,20180201024GX, 20150520101JH)、中国科学院青年创新促进会基金(2018254)

通信作者: \*liangjq@ciomp.ac.cn; \*\*jinguanglv@163.com

## 1引言

成像光谱仪通过对场景中各目标物点的光谱辐 亮度进行探测,得到场景图谱合一的三维数据立方 体,数据立方体中每个光谱元素为一个光谱通道,单 个光谱通道上的每个平面图像为一幅通道图像,在 物质定性识别与定量分析领域具有广泛的应用[1]。 目前大多数成像光谱仪采用时间扫描的方式来获取 第三维的空间或光谱信息,因此探测的实时性受到 了极大的限制。快照成像光谱仪则可以在探测器的 单个积分时间内获得整个三维图谱数据立方体,当 场景为动态场景时,尤其是在探测期间呈现出显著 的空间或光谱变化的场景,快照成像光谱仪具有显 著的优势<sup>[2]</sup>。由于图谱立方体为三维数据,而面阵 探测器仅为二维器件,因此快照成像光谱仪需要 在二维面阵探测器上同时测量数据立方体的所有 元素,然后通过图像变维将其重组为三维数据立 方体。为了利用二维面阵探测器实现三维图谱数 据的同时获取,快照成像光谱仪需要采用特殊阵 列器件结构的光学设计以提供三维数据的采集能 力,比较有代表性的结构有日本大阪大学提出的 多重图像傅里叶变换(FT)光谱仪 MIFTS<sup>[3]</sup>,美国 亚利桑那大学研究的快照高光谱成像傅里叶变换 光谱仪 SHIFT<sup>[4-5]</sup> 和多光谱 Sagnac 干涉仪 MSI<sup>[6]</sup> 等。本课题组研究了一种空间调制干涉结构<sup>[7-8]</sup>, 通过两个正交的多级微反射镜对入射光场进行孔 径分割与阵列调制,实现所有采样级次的同步干 涉。将空间调制干涉结构与微透镜阵列相匹配,

#### 第 42 卷 第 9 期/2022 年 5 月/光学学报

提出了快照式干涉成像光谱仪结构<sup>[9-10]</sup>。通过微透镜阵列多重成像与多级微反射镜相位调制的光场耦合,在横向空间的每一个干涉通道中获得目标场景的二维图像,从而实现场景的同时干涉成像,该方法具有实时获取动态场景图像光谱的能力。多级微反射镜是系统的核心器件,但是受器件基片的加工精度以及膜层表面应力的影响,其阶梯面会产生弯曲形变,从而引入面形误差。本文将对多级微反射镜弯曲形变引入的阶梯面形误差进行分析和建模,计算并分析不同的阶梯面形误差分布情况对干涉成像与光谱复原的影响。

### 2 系统工作原理

快照式干涉成像光谱仪(图 1)由微透镜阵列、 多级微反射镜、分束器、中继成像镜和面阵探测器组 成<sup>[9-10]</sup>。微透镜阵列由 N×N 个口径为a×a、焦距 为 f 的微透镜单元组成,对不同视场的目标物点进 行多重成像。两个多级微反射镜均位于微透镜阵列 的焦平面上,阶梯分别沿着两个正交方向均匀排列, 对多重像场进行分布式相位调制。两个多级微反射 镜具有相同的阶梯级数 N 和阶梯宽度 a,但具有不 同的阶梯步长。设低阶多级微反射镜的阶梯步长为 d,为了使光程差互相补偿,将高阶多级微反射镜的 阶梯步长设为 Nd。因此,当入射光的波数为ν时, 两个多级微反射镜的各阶梯相对于相邻阶梯对多重 像场会分别引入大小为 4πνd 和 4πνNd 的相位延迟 量,则第(m, n)个干涉成像通道对应的光程差为

$$\Delta(m,n) = 2(Nn - m)d_{\circ} \tag{1}$$





Fig. 1 Schematic diagram of snapshot interference imaging spectrometer

多重像场被两个多级微反射镜进行分布式相位调制后,被中继成像镜再次成像到面阵探测器上,并在探

测器上发生干涉,形成干涉图像阵列。干涉图像阵列 共含有 N×N 个干涉图像单元,每个干涉图像单元对

第 42 卷 第 9 期/2022 年 5 月/光学学报

应一个特定的干涉成像通道。将干涉图像阵列进行图 像变维,形成三维干涉图像立方体 *I*[*x*,*y*,Δ(*m*,*n*)]。 将干涉图像立方体沿着光程差轴进行离散傅里叶变 换,便重建出目标场景的三维图谱立方体,即

$$B(x, y, \nu) = 2d \sum_{m} \sum_{n} I[x, y, \Delta(m, n)] \times \exp[-j4\pi\nu(Nn-m)d].$$
(2)

3 理论建模与数值计算

#### 3.1 理论计算模型

假设来自远距离目标场景的入射光波为单位振幅的平面波,其传播方向用视场角ω和方位角θ来

表示,其中  $\omega$  为光波传播方向相对于光轴的夹角, $\theta$ 为光波传播方向在 x-y 平面上的投影相对于 x 轴 的夹角。微透镜阵列表面的入射光场可以表示为  $u_0(x_1,y_1) = \exp[j2\pi\nu(x_1\cos\theta + y_1\sin\theta)\sin\omega]_{\circ}$  (3)

微透镜阵列利用  $N \times N$  个焦距为 f 的微透镜 单元对入射光场进行多重相位调制,由于单个微透 镜 单 元 的 光 场 相 位 调 制 因 子 为  $\exp\left[-j\frac{\pi}{\lambda f}(x_1^2+y_1^2)\right](\lambda$  为波长),则微透镜阵列的 调制函数为

$$t(x_{1}, y_{1}) = \sum_{m=-N/2}^{N/2-1} \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} \left\{ \exp\left\{-j \frac{\pi}{\lambda f} \left[ \left(x_{1} - \frac{a}{2} - ma\right)^{2} + \left(y_{1} - \frac{a}{2} - na\right)^{2} \right] \right\} \times \left[ \exp\left\{\frac{x_{1} - a/2 - ma}{a}\right) \operatorname{rect}\left(\frac{y_{1} - a/2 - na}{a}\right) \right] \right\}$$
(4)

由微透镜阵列出射的透射光场为 $u_0(x_1,y_1) \times t(x_1,y_1)$ ,根据菲涅耳衍射理论,传输至微透镜阵列焦平面上的多重像场分布为

 $u_{1}(x_{1}, y_{1}) = FT^{-1} \{ FT[u_{0}(x_{1}, y_{1})t(x_{1}, y_{1})] \times H_{1}(f_{x1}, f_{y1}) \},$  (5) 式中:  $f_{x1}$  和  $f_{y1}$  为微透镜阵列平面的空间频率;  $H_{1}(f_{x1}, f_{y1}) 为 菲涅耳 衍 射 传 递 函 数, H_{1}(f_{x1}, f_{y1}) = \exp(j2\pi\nu f) \exp[-j\pi\lambda f(f_{x1}^{2} + f_{y1}^{2})]_{\circ}$ 

两个多级微反射镜分别利用 N 个高度分别为 d 和 Nd 的阶梯在 y 方向和 x 方向对微透镜阵列焦 平面上的多重像场进行分布式相位调制,理想情况 下两个多级微反射镜的调制函数为

$$s_1(x_1, y_1) = \sum_{m=-N/2}^{N/2-1} \exp(j4\pi\nu md) \operatorname{rect}\left(\frac{x_1 - a/2 - ma}{a}\right) \operatorname{rect}\left(\frac{y_1}{Na}\right), \tag{6}$$

$$s_{2}(x_{1}, y_{1}) = \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} \exp(j4\pi\nu n Nd) \operatorname{rect}\left(\frac{y_{1}-a/2-na}{a}\right) \operatorname{rect}\left(\frac{x_{1}}{Na}\right) .$$
(7)

采用微光机电系统工艺在平面基底上制作出两 个多级微反射镜的阶梯面结构,受基片加工精度及 膜层表面应力的影响,阶梯面会产生弯曲形变,从而 引入面形误差<sup>[11]</sup>。实验结果表明,阶梯面的弯曲主 要沿着各阶梯的长度方向,且主要以球面形变为主。 因此,本文采用球面来表征各阶梯面弯曲的面形函 数,其弯曲程度用曲率半径 *R* 表示,*R*>0表示阶梯 凸面形变,R < 0 表示阶梯凹面形变。设低阶多级微 反射镜的各阶梯面在 y 方向的曲率半径为 $R_1$ ,高阶 多级微反射镜的各阶梯面在 x 方向的曲率半径为  $R_2$ ,则根据傍轴近似,两个多级微反射镜将分别在 y方向和 x 方向引入一个二次相位因子,此时两个多 级微反射镜的调制函数分别为

$$s_{1}'(x_{1}, y_{1}) = \sum_{m=-N/2}^{N/2-1} \exp\left[j4\pi\nu\left(md + \frac{y_{1}^{2}}{2R_{1}}\right)\right] \operatorname{rect}\left(\frac{x_{1} - a/2 - ma}{a}\right) \operatorname{rect}\left(\frac{y_{1}}{Na}\right),$$
(8)

$$s'_{2}(x_{1}, y_{1}) = \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} \exp\left[j4\pi\nu\left(nNd + \frac{x_{1}^{2}}{2R_{2}}\right)\right] \operatorname{rect}\left(\frac{y_{1} - a/2 - na}{a}\right) \operatorname{rect}\left(\frac{x_{1}}{Na}\right) .$$
(9)

由两个多级微反射镜出射的调制像场分别为  $u_1(x_1, y_1)s'_1(x_1, y_1)$ 和  $u_1(x_1, y_1)s'_2(x_1, y_1)$ , 经放大倍率为β的中继成像镜后成像到探测器 上。由几何光学可知,其理想光学像分别为

第 42 卷 第 9 期/2022 年 5 月/光学学报

 $u_{g1}(x_{2}, y_{2}) = u_{1}(x_{2}/\beta, y_{2}/\beta)s'_{1}(x_{2}/\beta, y_{2}/\beta)/\beta 和$  $u_{g2}(x_{2}, y_{2}) = u_{1}(x_{2}/\beta, y_{2}/\beta)s'_{2}(x_{2}/\beta, y_{2}/\beta)/\beta, 其$ 中(x<sub>2</sub>, y<sub>2</sub>)为探测器平面的坐标, x<sub>2</sub> =  $\beta x_{1}, y_{2}$  = βy1。两个调制像场在面阵探测器上发生干涉,根据标量衍射理论,干涉图像阵列的强度分布为

$$I(x_{2}, y_{2}) = | \operatorname{FT}^{-1} \{ \operatorname{FT}[u_{g1}(x_{2}, y_{2})] H_{2}(f_{x2}, f_{y2}) \} + \operatorname{FT}^{-1} \{ \operatorname{FT}[u_{g2}(x_{2}, y_{2})] H_{2}(f_{x2}, f_{y2}) \} |^{2} = | \operatorname{FT}^{-1} \{ \operatorname{FT}[u_{g1}(x_{2}, y_{2}) + u_{g2}(x_{2}, y_{2})] H_{2}(f_{x2}, f_{y2}) \} |^{2},$$
(10)

式中: $H_2(f_{x2}, f_{y2}) = \operatorname{circ}\left(\frac{2\lambda z}{D}\sqrt{f_{x2}^2 + f_{y2}^2}\right)$ 为中继 成像镜的相干传递函数;D和 z 分别为中继成像镜 的出瞳口径和出瞳距; $f_{x2}$ 和  $f_{y2}$ 为探测器平面的 空间频率。

将干涉图像阵列进行图像分割,形成  $N \times N$  个 干涉图像单元,并按照光程差的顺序依次排列各干 涉图像单元,便形成三维干涉图像立方体  $I[x_2, y_2, \Delta(m,n)]$ ;将三维干涉图像立方体沿着光程差轴进 行式(2)所示的离散傅里叶变换,通过重建得到目标 场景的三维图谱立方体。

#### 3.2 数值计算

由于多级微反射镜各阶梯面的弯曲形变量很 小,采用曲率半径表征面形误差时将产生一个较大的数值,为了方便表征,将阶梯面形误差以阶梯矢高 P的形式表示<sup>[12]</sup>,如图 2 所示。根据图 2 的几何关 系,可以得到阶梯矢高  $P = \frac{L^2}{8R} = \frac{(Na)^2}{8R}$ ,其中 L = Na 为多级微反射镜单个阶梯的长度。因此,将阶 梯面曲率半径表示为阶梯矢高的形式,即  $R = \frac{L^2}{8P} = (Na)^2$ 

 $\frac{1}{8P}$ 



图 2 多级微反射镜单元的阶梯面形误差示意图。(a)阶梯 单元凹面形变;(b)阶梯单元凸面形变

Fig. 2 Sketch map of step surface shape error of multi micro mirror unit. (a) Concave deformation of step element; (b) convex deformation of step element

由图 2 可知,低阶多级微反射镜的各阶梯面在 y 方向的曲率半径 R<sub>1</sub> 对应阶梯矢高 P<sub>1</sub>,高阶多级 微反射镜的各阶梯面在 x 方向的曲率半径 R<sub>2</sub> 对应 阶梯矢高  $P_2$ 。设入射光波为单色平面波,其波数  $\nu_0 = 0.3 \ \mu m^{-1}$ ,其传播方向以零视场、弧矢视场、子 午视场和对角线视场为代表,取( $\theta$ ,  $\omega$ ) = (0, 0)、 ( $\theta$ ,  $\omega$ ) = (0, 0.02 rad)、( $\theta$ ,  $\omega$ ) = ( $\pi/2$ , 0.02 rad) 和( $\theta$ ,  $\omega$ ) = ( $\pi/4$ , 0.03 rad),分别对阶梯面形误差 在两个多级微反射镜上的不同分布情况进行计算。 当两个多级微反射镜上的不同分布情况进行计算。 当两个多级微反射镜的阶梯矢高分别为( $P_1$ ,  $P_2$ ) = (0  $\mu$ m, 0  $\mu$ m), ( $P_1$ ,  $P_2$ ) = (0.3  $\mu$ m, 0  $\mu$ m), ( $P_1$ ,  $P_2$ ) = (0.3  $\mu$ m, 0  $\mu$ m), ( $P_1$ ,  $P_2$ ) = (0  $\mu$ m, 0.3  $\mu$ m)和( $P_1$ ,  $P_2$ ) = (0.3  $\mu$ m, 0.3  $\mu$ m)时,由理论计算模型可得探测器 上干涉像点阵列的光强分布如图 3 所示。

图 3 所示的干涉像点阵列中每 4 个相邻的干涉 像点为一个干涉成像通道,分别对应零视场、弧矢视 场、子午视场和对角线视场。其中亮度比较亮的干 涉像点为相干相长的干涉级次,亮度比较暗的干涉 像点为相干相消的干涉级次。通过对比可以看出, 相较于理想情况下干涉像点阵列的强度分布,多级 微反射镜的阶梯面形误差导致各视场不同级次干涉 像点的光强发生了改变,也就是说干涉图像的强度 受到了多级微反射镜的阶梯面形误差的调制。通过 对图 3 进行图像变维、图像配准与离散傅里叶变 换<sup>[13]</sup>,便可以得到不同的阶梯面形误差分布情况对 应的各视场的复原光谱,如图 4 所示。

由图 4 可以看出:阶梯面形误差分布于不同的 多级微反射镜上时,其复原光谱具有不同的噪声特 征,且不同视场的复原光谱之间也具有细微的差别。 当仅低阶多级微反射镜存在阶梯面形误差时,光谱 噪声在信号谱线两侧呈现高频衰荡;当仅高阶多级 微反射镜存在阶梯面形误差时,光谱噪声为特定波 数上的伴频谱线;当两个多级微反射镜同时存在阶 梯面形误差时,光谱噪声则是以上两种噪声的叠加。 同时,随着视场的变化,光谱噪声的分布特征不变, 但噪声水平却会随之发生改变。

4 分析与讨论

#### 4.1 阶梯面形误差对复原光谱的影响分析

多级微反射镜阶梯面形误差的存在会导致其对



图 3 不同阶梯面形误差分布对应的干涉像点阵列强度。(a)无面形误差;(b)低阶分布;(c)高阶分布;(d)低阶、高阶同时分布 Fig. 3 Intensity of interference image point array corresponding to different step surface shape error. (a) No surface shape error; (b) low order distribution; (c) high order distribution; (d) simultaneous distribution of low order and high order



图 4 不同阶梯面形误差分布对应的复原光谱。(a)无面形误差;(b)低阶分布;(c)高阶分布;(d)低阶、高阶同时分布 Fig. 4 Recovered spectra corresponding to different step surface shape error distributions. (a) No surface shape error; (b) low order distribution; (c) high order distribution; (d) simultaneous distribution of low order and high order

干涉图像进行采样时各干涉像点的光程差发生改变。由多级微反射镜的调制函数可得光程差增量为

$$\delta(x_1, y_1) = \frac{x_1^2}{R_2} - \frac{y_1^2}{R_1} = \frac{8}{(Na)^2} (P_2 x_1^2 - P_1 y_1^2).$$
(11)

根据傅里叶变换光谱学原理,光程差的改变会 导致复原光谱中产生相位误差,从而引起复原光谱 的失真。将第(*m*,*n*)个干涉成像通道对应的光程差 增量表示为  $\delta$  (*m*,*n*) =  $\delta$  (*x*<sub>1</sub>,*y*<sub>1</sub>) × rect $\left(\frac{x_1-a/2-ma}{a}\right)$ rect $\left(\frac{y_1-a/2-na}{a}\right)$ ,而第(*m*,



n)个干涉成像通道对应的理想光程差为Δ(m,n), 因此可以得到相位误差随光程差的变化为

$$\phi(\Delta) = \frac{16\pi\nu}{(Na)^2} (P_2 x_1^2 - P_1 y_1^2) \times \operatorname{rect}\left(\frac{x_1 - a/2 - ma}{a}\right) \operatorname{rect}\left(\frac{y_1 - a/2 - na}{a}\right) .$$
(12)

以零视场( $\theta$ ,  $\omega$ ) = (0, 0)为代表,当两个多级 微反射镜的阶梯矢高分别为( $P_1$ ,  $P_2$ ) = (0  $\mu$ m, 0  $\mu$ m),( $P_1$ ,  $P_2$ ) = (0.3  $\mu$ m, 0  $\mu$ m),( $P_1$ ,  $P_2$ ) = (0  $\mu$ m, 0.3  $\mu$ m)和( $P_1$ ,  $P_2$ ) = (0.3  $\mu$ m, 0.3  $\mu$ m) 时,相位误差随光程差的变化曲线如图 5 所示。



图 5 不同阶梯面形误差分布对应的相位误差随光程差(OPD)的变化。(a)无面形误差;(b)低阶分布;(c)高阶分布; (d)低阶、高阶同时分布

Fig. 5 Phase error corresponding to different step surface shape error varying with optical path difference. (a) No surface shape error; (b) low order distribution; (c) high order distribution; (d) simultaneous distribution of low order and high order

由图 5 可以看出,不同阶梯面形误差分布情况 引起的相位误差随着光程差具有不同的变化规律。 当阶梯面形误差仅分布于低阶多级微反射镜上时, 相位误差呈分段式阶跃变化,梯级步长为 20 μm;当 阶梯面形误差仅分布于高阶多级微反射镜上时,相 位误差呈周期性振荡变化,振荡周期也为 20 μm;而 当阶梯面形误差同时分布于两个多级微反射镜上 时,相位误差也呈周期性振荡变化,但是其振荡基线 发生了拱形弯曲。不同的阶梯面形误差分布引起的 相位误差的变化特点最终反映了复原光谱的噪声特 性,图4中复原光谱伴频谱线的产生就是相位误差 周期性振荡变化的结果。

#### 4.2 阶梯面形误差对多重成像的影响分析

多级微反射镜的阶梯结构与面形误差会导致相 干像点产生离焦,从而引起像点能量发生弥散。对 于单个像场单元来说,离焦量 $\epsilon(x_1, y_1)$ 引起的波 前像差<sup>[14]</sup>的大小为 $\epsilon(x_1, y_1)\frac{x_1^2+y_1^2}{2f^2}$ 。根据多级 微反射镜的调制函数,两个多级微反射镜各阶梯 面不同空间位置处相干像点的离焦量分别为

#### 第 42 卷 第 9 期/2022 年 5 月/光学学报

 $\varepsilon_1(x_1, y_1) = md + \frac{y_1^2}{2R_1} \Re \varepsilon_2(x_1, y_1) = nNd + \frac{x_1^2}{2R_2},$ 

因此两个多级微反射镜所对应的两路成像光场中第 (*m*,*n*)个像场单元对应的波前像差分别为

$$W_{1}(m,n) = \left[md + \frac{4P_{1}y_{1}^{2}}{(Na)^{2}}\right] \frac{(x_{1} - a/2 - ma)^{2} + (y_{1} - a/2 - na)^{2}}{2f^{2}},$$
(13)

$$W_{2}(m,n) = \left[nNd + \frac{4P_{2}x_{1}^{2}}{(Na)^{2}}\right] \frac{(x_{1} - a/2 - ma)^{2} + (y_{1} - a/2 - na)^{2}}{2f^{2}},$$
(14)

利用斯特列尔比来表征阶梯面形误差引起的 相干像点能量的弥散程度,由式(13)和式(14)可 得,发生干涉的两路相干像点所对应的斯特列尔 比分别为

$$\begin{cases} R_{s1}(\Delta) = \exp\{-[2\pi\nu\sigma_{W_1}(m,n)]^2\} \\ R_{s2}(\Delta) = \exp\{-[2\pi\nu\sigma_{W_2}(m,n)]^2\} \end{cases}, \quad (15)$$

式中: $\sigma_{W_i}(m,n)$ 为第(m,n)个像场单元对应的波前 像差的标准差,i=1,2。

斯特列尔比表明阶梯面形误差对各相干像点的 光强分布进行了调制,当两个多级微反射镜的阶梯 面形误差对应的矢高均为 0.3 μm 时,两路相干像 点的斯特列尔比曲线如图 6 所示。

由图 6 可以看出,低阶和高阶多级微反射镜对 应的两路相干像点的斯特列尔比具有不同的光程差 分布特征。也就是说,发生干涉时同一干涉级次的 两个相干像点的复振幅分布受到了两个多级微反射 镜的不同阶梯面形误差量导致的不同程度的调制, 因此干涉光强分布是两个相干像点的复振幅加权叠 加的结果,权重系数取决于两个多级微反射镜的阶 梯面形误差量。由图 6 中的斯特列尔比的数值可 知,其对成像质量的影响基本可以忽略,但对干涉图 质量的影响却不容忽略。





#### 4.3 阶梯面形误差对不同视场的影响分析

由第4.1节可知,阶梯面形误差会导使干涉像 点光程差的改变,从而使复原光谱中产生相位误差。 由式(12)可知,相位误差与多级微反射镜表面的空 间位置有关,而多级微反射镜的空间位置又对应不 同的成像视场,因此阶梯面形误差对于不同的视场 会引入不同的相位误差量。多级微反射镜上第(*m*, *n*)个干涉定域内的空间位置与成像视场的对应关 系如图 7 所示。图 7 中 *k* 为波矢,*C* 为干涉定域 (*m*,*n*)的中心点。



图 7 多级微反射镜上空间位置与成像视场的对应关系

Fig. 7 Corresponding relationship between spatial position and imaging field of view on multi micro mirrors

由图 7 可知,视场(θ,ω)在多级微反射镜第 (*m*,*n*)个干涉定域内成像于 *A*(*x*<sub>1</sub>, *y*<sub>1</sub>)点,其像高 矢量  $r = f \tan \omega \exp(j\theta)$ ,且干涉定域(m, n)的中心 C 的高度矢量 b = (m+1/2)a + j(n+1/2)a,因此

封面文章・研究论文	第 42 卷 第 9 期/2022 年 5 月/光学学报
像点 A 相对于光轴的高度矢量为	$\int x_1 = (m+1/2)a + f \tan \omega \cos \theta \tag{17}$
$\boldsymbol{h} = \boldsymbol{b} + \boldsymbol{r} = (m+1/2)a + f \tan \omega \cos \theta + $	$\int y_1 = (n+1/2)a + f \tan \omega \sin \theta , \qquad (17)$
$j[(n+1/2)a + f \tan \omega \sin \theta], \qquad (16)$	将其代入式(11),则光程差增量与视场角和方位角
从而得到像点 A 的空间位置坐标与成像视场的关系为	的关系为

 $\delta(\theta,\omega) = \frac{8}{(Na)^2} \{ P_2 [(m+1/2)a + f \tan \omega \cos \theta]^2 - P_1 [(n+1/2)a + f \tan \omega \sin \theta]^2 \}, \quad (18)$ 

因此,相位误差为

$$\varphi(\theta,\omega) = \frac{16\pi\nu}{(Na)^2} \left\{ P_2 \left[ (m+1/2)a + f \tan \omega \cos \theta \right]^2 - P_1 \left[ (n+1/2)a + f \tan \omega \sin \theta \right]^2 \right\}_{\circ}$$
(19)

以系统中第(7,7)个干涉成像通道为例,对不 同阶梯面形误差分布情况引起的相位误差的视场分 布特点进行分析。当阶梯面形误差分别分布于低阶 多级微反射镜、高阶多级微反射镜和同时分布于两 个多级微反射镜上时,第(*m*, *n*)=(7, 7)个干涉成 像通道的相位误差随视场角与方位角的变化分别如 图 8(a)~(c)所示。



图 8 不同阶梯面形误差分布对应的相位误差随视场角及方位角的变化。(a)低阶分布;(b)高阶分布;(c)低阶高阶同时分布 Fig. 8 Phase error corresponding to different step surface error distribution varying with field of view and azimuth angle. (a) Low order distribution; (b) high order distribution; (c) simultaneous distribution of low order and high order

由图 8 可以看出,对于任一种阶梯面形误差分 布情况,相位误差都随视场角和方位角发生改变,且 视场角越大,相位误差的变化幅值也越大,且随方位 角的变化会有一个周期性的改变。相位误差随视场 角和方位角发生变化,从而引起不同成像视场之间 复原光谱的差别,这也就是图 4 中不同视场的复原 光谱出现不同噪声水平的原因。

#### 4.4 重建光谱误差计算

多级微反射镜的阶梯面形误差会对干涉像点阵 列的强度分布进行调制,并在复原光谱中引入相位 误差,最终导致复原光谱产生失真。采用重建光谱 误差 Q 来表征阶梯面形误差对复原光谱产生的影 响,即  $Q = \frac{\int_{0}^{\infty} |B(v) - B_{0}(v)| dv}{\int_{0}^{\infty} B_{0}(v) dv}$ ,其中  $B_{0}(v)$ 为理想 的复原光谱;B(v)为实际重建的复原光谱。针对 不同大小分布的阶梯面形误差对应的阶梯矢高,计 算其复原光谱的重建光谱误差。将两个多级微反射 镜的阶梯矢高设定为从  $= 0.6 \ \mu m$  2间 变化,其负的阶梯矢高值表示阶梯凹面形变,正的阶 梯矢高值表示阶梯凸面形变,通过计算得到重建光 谱误差随两个多级微反射镜阶梯矢高的变化关系, 如图 9 所示。



图 9 重建光谱误差与两个多级微反射镜阶梯矢高的关系 Fig. 9 Relationship between reconstructed spectrum error and step sagittal height of two multi micro mirrors

由重建光谱误差随阶梯矢高的变化关系可知, 重建光谱误差随着两个多级微反射镜阶梯矢高绝对 值的增加而单调递增,且符号相反的阶梯矢高对应

的重建光谱误差的递增速率要高于阶梯矢高符号相同的情况。也就是说,相同的阶梯形变类型对应的重建光谱误差要小于不同阶梯形变的情况。由此, 根据重建光谱误差与阶梯矢高之间的变化关系,便可以由系统需求的Q值对多级微反射镜的阶梯面 形精度进行限定。对于所设定的参数,若要求重建 光谱误差Q<1,当两个多级微反射镜的阶梯形变类 型不同时,其阶梯矢高均需满足 $|P| \leq 0.2 \mu m;$ 而当 两个多级微反射镜的阶梯形变类型相同时,其阶梯 矢高均需满足 $|P| \leq 0.3 \mu m$ 。当然,根据实际测量 得到的两个多级微反射镜的阶梯矢高,也可以利用 图 9 对系统性能进行评估。

5 结 论

快照式干涉成像光谱仪利用两个多级微反射镜 对微透镜阵列形成的多重像场进行分布式相位调 制,从而实现快照式干涉成像。受多级微反射镜基 片的加工精度及膜层表面应力作用的影响,阶梯面 会产生弯曲形变,从而引入面形误差。阶梯面形误 差会改变干涉像点阵列的强度分布,同时在复原光 谱中引入噪声。低阶多级微反射镜分布的面形误差 导致信号谱线两侧出现高频衰荡噪声,高阶多级微 反射镜分布的面形误差导致特定波数上出现伴频谱 线,两个多级微反射镜同时分布的面形误差导致的 光谱噪声则是两种光谱噪声的叠加。复原光谱噪声 源于阶梯面形误差在复原光谱中引入的相位误差, 不同阶梯面形误差分布引起的相位误差的变化特点 最终反映了复原光谱的噪声特征。阶梯面形误差对 各相干像点光强分布的调制通过斯特列尔比表征, 其对多重成像质量的影响基本可以忽略。同时,阶 梯面形误差导致的相位误差还随视场角和方位角的 不同而发生变化,从而引起不同视场成像光谱的差 别。采用重建光谱误差表征阶梯面形误差对复原光 谱的影响,重建光谱误差随着两个多级微反射镜阶 梯矢高绝对值的增加单调递增,且相同阶梯形变类 型对应的重建光谱误差要小于不同阶梯形变类型的 情况。根据重建光谱误差与阶梯矢高之间的关系, 由重建光谱需求对多级微反射镜的阶梯面形精度进 行限定,也可由实际多级微反射镜阶梯矢高测量值 评估阶梯面形误差对系统性能的影响。

#### 参考文献

[1] Wolfe W L. Introduction to imaging spectrometers[M]. Washington: SPIE, 1997.

#### 第 42 卷 第 9 期/2022 年 5 月/光学学报

- [2] Hagen N A, Kudenov M W. Review of snapshot spectral imaging technologies [ J ]. Optical Engineering, 2013, 52(9): 090901.
- [3] Hirai A, Inoue T, Itoh K, et al. Application of measurement multiple-image Fourier of fast phenomena transform spectral imaging to measurement of fast phenomena[J]. Optical Review, 1994, 1(2): 205-207.
- [4] Kudenov M W, Dereniak E L. Compact real-time birefringent imaging spectrometer [J]. Optics Express, 2012, 20(16): 17973-17986.
- [5] Kudenov M W, Banerjee B, Chan V C, et al. Compact snapshot birefringent imaging Fourier transform spectrometer for remote sensing and endoscopy [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8542: 854224.
- [6] Kudenov M W, Jungwirth M E L, Dereniak E L, et al. White-light Sagnac interferometer for snapshot multispectral imaging[J]. Applied Optics, 2010, 49 (21): 4067-4076.
- [7] 梁静秋,梁中翥,吕金光,等.空间调制微型傅里叶 变换红外光谱仪研究[J].中国光学,2015,8(2): 277-298.
  Liang J Q, Liang Z Z, Lü J G, et al. Micro spatial modulation Fourier transform infrared spectrometer [J]. Chinese Optics, 2015, 8(2): 277-298.
- [8] 吕金光,赵百轩,梁静秋,等.像场调制傅里叶变换成像光谱仪的建模与实验研究[J].光学学报,2020,40(18):1811002.
   Lü J G, Zhao B X, Liang J Q, et al. Modeling and

experiment of image field modulated Fourier transform imaging spectrometer [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(18): 1811002.

[9] 吕金光,梁静秋,王维彪,等.微小型快照式傅里叶 变换成像光谱仪的建模与分析[J].光学学报,2020, 40(2):0230001.
Lü J G, Liang J Q, Wang W B, et al. Modeling and analysis of miniature snapshot Fourier-transform

imaging spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(2): 0230001.

- [10] 吕金光,梁静秋,王维彪,等.快照傅里叶变换成像 光谱仪阵列非均匀特性的 Monte Carlo 分析[J].光 学学报, 2021, 41(24): 2430001.
  Lü J G, Liang J Q, Wang W B, et al. Monte Carlo analysis of array non-uniformity in snapshot Fourier transform imaging spectrometer [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(24): 2430001.
- [11] 冯明春,刘文清,徐亮,等.迈克耳孙干涉仪中的镜 面面形误差研究分析[J].光学学报,2015,35(4): 0423002.

Feng M C, Liu W Q, Xu L, et al. Analysis of the

mirror surface errors in a Michelson interferometer [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0423002.

[12] 白金林,姜玉刚,王利栓,等.超低面形宽带高反射 薄膜设计及制备技术研究[J].红外与激光工程, 2021,50(2):20200413.
Bai J L, Jiang Y G, Wang L S, et al. Study on the design and preparation technology of ultra-low profile wideband high reflection thin films[J]. Infrared and

Laser Engineering, 2021, 50(2): 20200413. [13] 袁恒,柏财勋,许逸轩,等.快速高精度 Fourier-

#### 第 42 卷 第 9 期/2022 年 5 月/光学学报

Mellin 变换图像配准方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(8): 083001.

Yuan H, Bai C X, Xu Y X, et al. Fast and high precision image registration algorithm based on Fourier-Mellin transform [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(8): 083001.

[14] Wyant J C, Creath K. Basic wavefront aberration theory for optical metrology [M]. New York: Academic Press, 1992: 9-11.