

# 微小型快照式傅里叶变换成像光谱仪的建模与分析

吕金光<sup>1\*\*</sup>, 梁静秋<sup>1\*</sup>, 王维彪<sup>1</sup>, 秦余欣<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>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** 为了实时探测运动场景、迅变目标的图像与光谱,提出了一种微小型快照式傅里叶变换成像光谱仪,利用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,实现了干涉图谱信息的实时获取。根据微透镜阵列与多级微反射镜对光场的相位调制特性,建立了多重干涉成像的理论模型,计算表明,不同视场的干涉像点位于探测平面的不同区域,但大视场情况下相邻通道之间的干涉图像单元会发生串扰,并导致复原光谱失真。分析表明,为了抑制相邻干涉成像通道间发生串扰,视场角应控制在微透镜阵列和多级微反射镜的衍射与离焦效应所限定的极限视场角之内。同时,视场角还会引入相位误差,并导致归一化光谱误差随视场角的增大而单调递增。根据归一化光谱误差关系曲面可以对系统的视场角进行合理的设计,从而实现对目标场景中特定区域的有效探测。

**关键词** 光谱学; 傅里叶变换光谱仪; 快照; 多重成像

中图分类号 O433.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0230001

## Modeling and Analysis of Miniature Snapshot Fourier-Transform Imaging Spectrometer

Lü Jinguang<sup>1\*\*</sup>, Liang Jingqiu<sup>1\*</sup>, Wang Weibiao<sup>1</sup>, Qin Yuxin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;

<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** A miniature snapshot Fourier-transform imaging spectrometer is proposed to realize the real-time detection of images and spectra of moving scenes and fast-changing targets. Interferometric imaging spectra are acquired in real time using two multi-stage micro-mirrors to modulate the distributed phase of multiple image fields formed by a micro-lens array. Based on phase modulation by the micro-lens array and multi-stage micro-mirrors on the optical field, a theoretical model is established for multiple interferometric imaging. Numerical results show that the interferometric image points with different field of view (FOV) are located at different areas on the detector plane. However, in the case of a large FOV, the interferometric image units between adjacent channels have crosstalk and the recovered spectrum is distorted. To suppress the crosstalk between adjacent channels, the FOV angle can be controlled within the limited FOV determined by the diffraction and defocusing effects of the micro-lens array and multi-stage micro-mirrors. Simultaneously, the FOV introduces phase errors, which causes monotonously increasing normalized spectral errors according to the FOV angle. Based on the normalized spectral error analysis results, the FOV can be rationally designed to achieve effective detection of a specific area in target scenes.

**Key words** spectroscopy; Fourier-transform spectrometer; snapshot; multiple imaging

**OCIS codes** 300.6190; 300.6300; 110.4190; 110.4234

## 1 引言

傅里叶变换光谱仪具有多通道、高通量、波数精

度高、杂散光影响小等优点<sup>[1-2]</sup>,可以实现对弱辐射目标的高信噪比探测,因此基于傅里叶变换的成像光谱仪在目标探测与信息识别方面具有显著优

收稿日期: 2019-07-24; 修回日期: 2019-08-27; 录用日期: 2019-09-09

基金项目: 国家自然科学基金(61805239, 61627819, 61575193, 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)

\* E-mail: liangjq@ciomp.ac.cn; \*\* E-mail: jinguanglv@163.com

势<sup>[3-4]</sup>。目前普遍应用的傅里叶变换成像光谱仪大多基于动态干涉系统<sup>[5]</sup>,通过动镜对光程差进行一维扫描获取光谱信息,同时利用扫描反射镜对目标场景进行二维扫描来获取图像。由于光谱与图像信息的获取总共需要一个三维的扫描过程来完成,因此不适合用于运动场景或迅变目标的探测。本项目组研制了一种基于多级微反射镜静态干涉系统的空间调制傅里叶变换光谱仪<sup>[6-8]</sup>,它可以实现光谱的实时获取,但对于目标场景的图像获取仍然需要扫描反射镜的二维扫描过程。此外,本项目组在多级微反射镜静态干涉系统的基础上,研制了一种时空联合调制傅里叶变换成像光谱仪<sup>[9-10]</sup>,它只需要对目标场景进行一维扫描,便可以获取目标场景的图像与光谱信息,但一维的扫描过程仍然限制了图谱信息获取的实时性。为了提高傅里叶变换成像光谱仪实时测量运动场景或迅变目标图谱的能力,本文在前期研究的空间调制与时空联合调制傅里叶变换成像光谱仪的基础上,提出了一种基于微透镜阵列与多级微反射镜的快照式傅里叶变换成像光谱仪,它无需扫描即可同时获取目标场景的图像与光谱信息。由于该快照式傅里叶变换成像光谱仪取消了传统傅里叶变换成像光谱仪中庞大的反射镜扫描机构和动镜驱动机构,减小了仪器的体积和质量,具有微型化特点。本文将通过分析微透镜阵列与多级微

反射镜对光场的调制作用,对该快照式傅里叶变换成像光谱仪的多重干涉成像特性进行理论建模与分析。

## 2 系统工作原理

本项目组基于微透镜阵列与多级微反射镜设计了微小型快照式傅里叶变换成像光谱仪,其工作原理如图 1 所示。设微透镜阵列的数目为  $N \times N$ ,其对来自远距离目标场景的光场进行多重成像,每个微透镜单元对应一个成像通道。两个阶梯级数均为  $N$  的多级微反射镜位于微透镜阵列的焦平面上,其阶梯方向相对于分束器正交,从而将微透镜阵列的焦平面分割成  $N \times N$  个干涉定域,每个干涉定域就是一个干涉单元,对应一个干涉通道。每个干涉定域对应一个特定微透镜单元的成像区域,从而保证微透镜阵列的各个成像通道与两个多级微反射镜形成的干涉通道一一对应。设阶梯沿  $x$  轴方向排列的横向多级微反射镜的阶梯高度为  $d$ ,为了实现光程差的互补,阶梯沿  $y$  轴方向排列的纵向多级微反射镜的阶梯高度为  $N \times d$ ,从而横向多级微反射镜沿  $x$  轴方向的第  $m$  个阶梯与纵向多级微反射镜沿  $y$  轴方向的第  $n$  个阶梯形成的第  $(m, n)$  个干涉通道所对应的光程差为

$$\Delta(m, n) = 2(Nn - m)d. \quad (1)$$

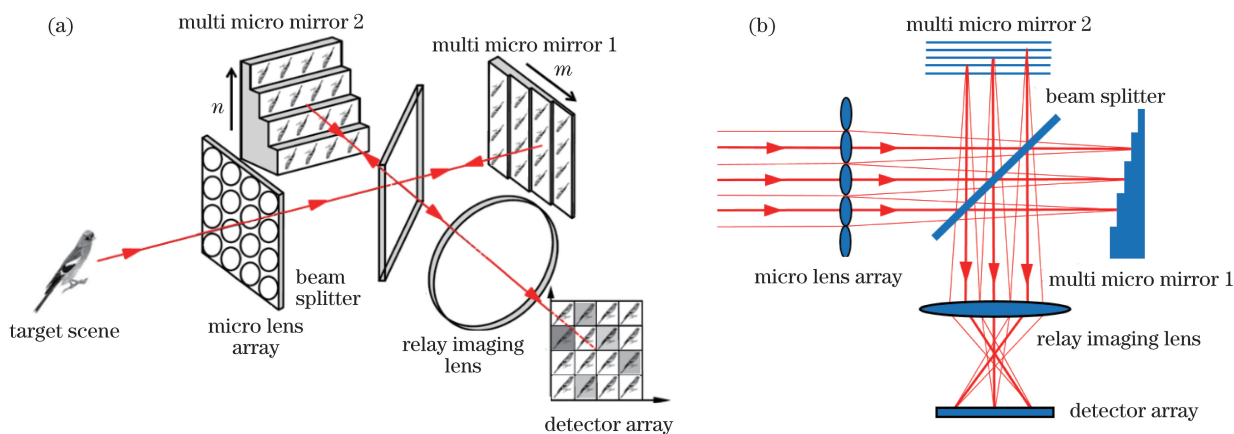


图 1 微小型快照式傅里叶变换成像光谱仪的结构图和光路图。(a)结构图;(b)光路图

Fig. 1 Structure and optical path of miniature snapshot Fourier-transform imaging spectrometer.

(a) Structure; (b) optical path

各成像通道中的光场经各自的干涉通道调制后再经过中继成像系统,在探测器平面上发生干涉,形成干涉图像阵列,每个干涉图像单元在探测器平面上对应一个特定通道的干涉成像区域。将干涉图像阵列进行图像变维,即可得到三维干涉图像数据立方  $I[x, y, \Delta(m, n)]$ 。将干涉图像数据立方进行离

散傅里叶变换运算,便可以反演出目标场景的三维图谱数据立方,即

$$B(x, y, \nu) = 2d \sum_m \sum_n I[x, y, \Delta(m, n)] \times \exp[-j4\pi\nu(Nn - m)d], \quad (2)$$

式中: $\nu$  为光波的波数, $\nu = 1/\lambda$ , $\lambda$  为光波的波长。

### 3 系统建模与数值计算

#### 3.1 系统理论建模

假设来自远距离目标场景的光波为单位振幅的平面波,其中零视场的光波的传播方向与光轴平行,而非零视场的光波的传播方向与光轴之间存在一定的夹角,如图 2 所示。

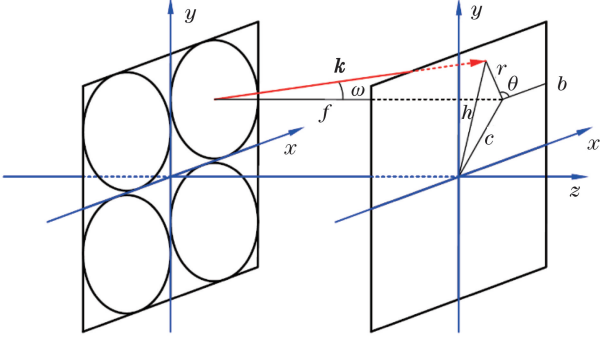


图 2 光波传播方向对应的视场角和方位角关系图  
(以 2×2 阵列为例)

Fig. 2 Relationship between field of view and azimuth angle corresponding to light wave propagation direction (take 2×2 array as example)

图 2 中,目标场景某一特定的视场可以用视场角  $\omega$  和方位角  $\theta$  表示,其中  $\omega$  为光波传播方向相对于光轴( $z$  轴)的视场角, $\theta$  为光波传播方向在  $x$ - $y$  平面上的投影相对于  $x$  轴的方位角, $c$  为多级微反射镜平面上某一特定干涉定域的中心高, $r$  为视场  $(\theta, \omega)$  的光波在该干涉定域上的成像高度, $h$  为成像点相对于中心光轴的投射高度。设平面波的波矢为  $\mathbf{k} = (k_x, k_y, k_z)$ ,由图 2 可以将波矢分解为  $k_x = |\mathbf{k}| \sin \omega \cos \theta, k_y = |\mathbf{k}| \sin \omega \sin \theta, k_z = |\mathbf{k}| \cos \omega$ ,其中  $|\mathbf{k}| = 2\pi/\lambda = 2\pi\nu$ 。由于平面波的波函数为  $\exp[j(k_x x + k_y y + k_z z)]$ ,将  $k_x, k_y, k_z$  和  $|\mathbf{k}| = 2\pi\nu$  代入平面波函数,并将微透镜阵列所在的表面设为  $z=0$  平面,可得微透镜阵列表面的光场分布为

$$u_0(x_1, y_1) = \exp[j2\pi\nu(x_1 \cos \theta + y_1 \sin \theta) \sin \omega], \quad (3)$$

式中: $x_1$ 和  $y_1$ 为微透镜阵列平面和多级微反射镜平面的空间位置坐标。

当光场入射到微透镜阵列上时,微透镜阵列对入射光场的相位进行阵列调制。设每个微透镜单元的尺寸均为  $a$ ,每个微透镜单元的焦距均为  $f$ ,由于单个微透镜单元对光场引入的相位调制因子为  $\exp\left[-j\frac{\pi}{\lambda f}(x_1^2 + y_1^2)\right]$ ,因此微透镜阵列的屏函数可以表示为

$$t(x_1, y_1) = \left\{ \exp\left[-j\frac{\pi}{\lambda f}(x_1^2 + y_1^2)\right] \text{rect}\left(\frac{x_1}{a}\right) \text{rect}\left(\frac{y_1}{a}\right) \right\} * \left[ \frac{1}{a^2} \text{comb}\left(\frac{x_1 - a/2}{a}\right) \text{comb}\left(\frac{y_1 - a/2}{a}\right) \right] \times \text{rect}\left(\frac{x_1}{Na}\right) \text{rect}\left(\frac{y_1}{Na}\right) \quad (4)$$

式中: $*$ 表示卷积运算; $\text{rect}$ 表示矩形函数; $\text{comb}$ 表示梳状函数。

基于微透镜阵列的屏函数,入射光场经微透镜阵列调制后,其透射光场变为  $u_0(x_1, y_1)t(x_1, y_1)$ ,并在微透镜阵列焦平面上形成多重像场。根据标量衍射理论可以得到微透镜阵列焦平面上的多重像场为

$$u_1(x_1, y_1) = \text{FT}^{-1}\{\text{FT}[u_0(x_1, y_1)t(x_1, y_1)]H_1(f_{x_1}, f_{y_1})\}, \quad (5)$$

式中: $\text{FT}$ 表示傅里叶变换; $\text{FT}^{-1}$ 表示傅里叶逆变换; $f_{x_1}$ 和  $f_{y_1}$ 为微透镜阵列平面的空间频率坐标; $H_1(f_{x_1}, f_{y_1}) = \exp(j2\pi\nu f) \exp[-j\pi\lambda f(f_{x_1}^2 + f_{y_1}^2)]$ 为菲涅耳衍射传递函数<sup>[11]</sup>。

两个多级微反射镜相对于分束器镜像放置,且均位于微透镜阵列的焦平面上,利用其阶梯结构对多重像场的相位进行分布式调制。设两个多级微反射镜的阶梯宽度均为  $b$ ,阶梯高度分别为  $d$  和  $Nd$ ,则横向多级微反射镜和纵向多级微反射镜的屏函数可分别表示为

$$s_1(x_1, y_1) = \left[ \text{rect}\left(\frac{x_1 - b/2}{b}\right) * \sum_{m=-\infty}^{\infty} \exp(j4\pi\nu m d) \delta(x_1 - mb) \right] \text{rect}\left(\frac{x_1}{Nb}\right) \text{rect}\left(\frac{y_1}{Nb}\right), \quad (6)$$

$$s_2(x_1, y_1) = \left[ \text{rect}\left(\frac{y_1 - b/2}{b}\right) * \sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp(j4\pi\nu n Nd) \delta(y_1 - nb) \right] \text{rect}\left(\frac{x_1}{Nb}\right) \text{rect}\left(\frac{y_1}{Nb}\right), \quad (7)$$

式中: $\delta(\cdot)$ 为狄拉克函数。

基于多级微反射镜的屏函数,多重像场经横向多级微反射镜调制后的出射像场变为  $u_1(x_1, y_1) \times$

$s_1(x_1, y_1)$ ,经纵向多级微反射镜调制后的出射像场变为  $u_1(x_1, y_1)s_2(x_1, y_1)$ 。中继成像镜分别将两个多级微反射镜调制后的出射像场成像到探测器平面

上,设其放大倍率为  $\beta$ ,则被两个多级微反射镜调制后的出射像场在探测器平面上成的几何光学理想像分别为  $u_{g1}(x_2, y_2) = u_1(x_2/\beta, y_2/\beta)s_1(x_2/\beta, y_2/\beta)/\beta$  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  $x_2 = \beta x_1$  和  $y_2 = \beta y_1$  为探测器平面的空间位置坐标。设中继成像镜为衍射受限的光学系统,其出射光瞳的口径为  $D$ ,出射光瞳距探测器平面的距离为  $z$ ,则中继成像镜的相干传递函数为  $H_2(f_{x2}, f_{y2}) = \text{circ}\left(\frac{2\lambda z}{D}\sqrt{f_{x2}^2 + f_{y2}^2}\right)$ ,其中  $f_{x2}$  和  $f_{y2}$  为探测器平面的空间频率坐标,  $\text{circ}$  表示圆函数。

基于中继成像镜的相干传递函数,被两个多级微反射镜调制后的出射像场经中继成像镜相干传递后在探测器平面发生干涉,形成多重干涉像场。根据标量衍射理论,探测器平面上的多重干涉像场可以表示为

$$u_i(x_2, y_2) = \text{FT}^{-1}\{\text{FT}[u_{g1}(x_2, y_2)]H_2(f_{x2}, f_{y2})\} + \text{FT}^{-1}\{\text{FT}[u_{g2}(x_2, y_2)]H_2(f_{x2}, f_{y2})\} = \text{FT}^{-1}\{\text{FT}[u_{g1}(x_2, y_2) + u_{g2}(x_2, y_2)]H_2(f_{x2}, f_{y2})\}。 \quad (8)$$

因此,探测器平面上干涉图像阵列的强度分布为

$$I(x_2, y_2) = |u_i(x_2, y_2)|^2 = \left| \text{FT}^{-1}\{\text{FT}[u_{g1}(x_2, y_2) + u_{g2}(x_2, y_2)]H_2(f_{x2}, f_{y2})\} \right|^2。 \quad (9)$$

将干涉图像阵列进行图像分割与配准,得到干涉图像数据立方  $I[x_2, y_2, \Delta(m, n)]$ ,将其代入(2)式,便可得到目标场景中各空间位置处物点辐射的光信号的光谱。

### 3.2 数值计算

采用光学系统设计过程中对成像质量进行分析的方法,以目标场景中的零视场、子午视场、弧矢视场和对角线视场为代表,对该系统的干涉成像特性进行分析。取微透镜单元的口径  $a = 2 \text{ mm}$ ,焦距  $f = 40 \text{ mm}$ ,多级微反射镜的级数  $N = 16$ ,阶梯高度  $d = 0.625 \text{ }\mu\text{m}$ ,阶梯宽度  $b = 2 \text{ mm}$ ,中继成像镜的放大倍率  $\beta = -0.1$ ,出瞳距与出瞳口径之比  $z/D = 2$ ,并假设来自各视场的光波均为同一波长的单色波,即入射光谱  $B_0(\nu) = \delta(\nu - \nu_0)$ ,波数  $\nu_0 = 0.3 \text{ }\mu\text{m}^{-1}$ 。对于目标场景中的零视场(0, 0)、弧矢视场(0,  $\pi/125$ )、子午视场( $\pi/2, \pi/125$ )和对角线视场( $\pi/4, \pi/90$ ),探测器平面上干涉像点阵列的光强分布如图3所示。为了便于观察和对比,图3只给出了各视场对应的干涉像点阵列中四分之一区域的光强分布情况。

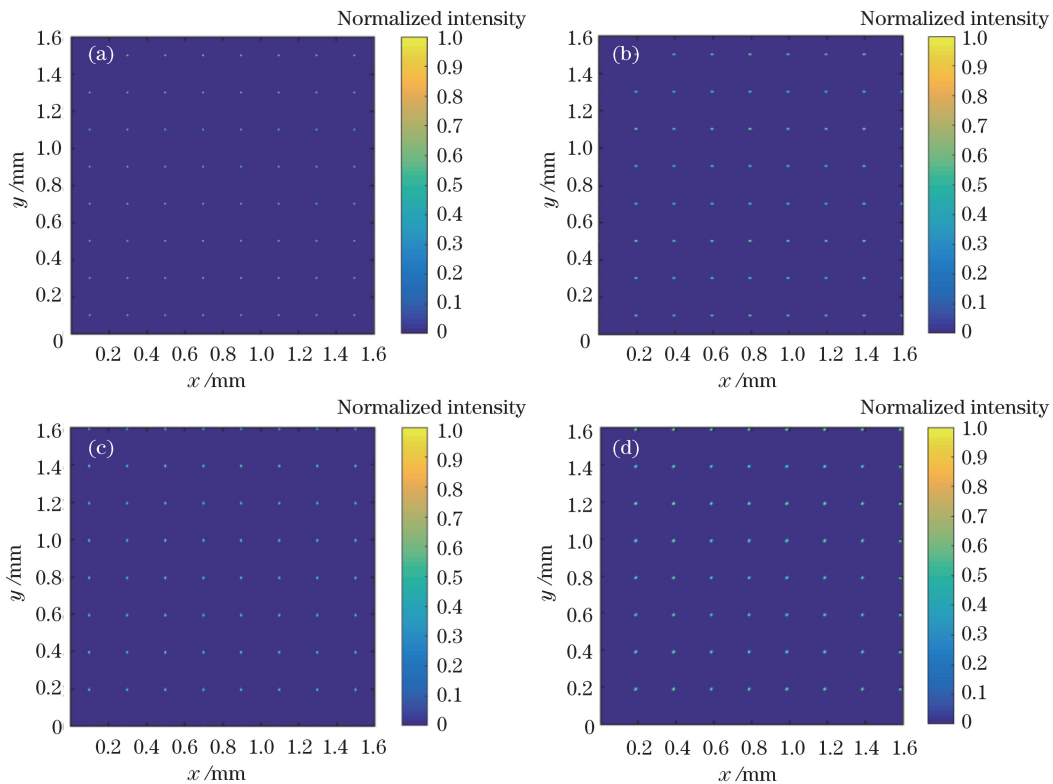


图3 不同视场对应的干涉像点阵列的光强分布。(a)零视场;(b)弧矢视场;(c)子午视场;(d)对角线视场  
Fig. 3 Intensity distributions of interferometric image-point array corresponding to different field of view.  
(a) Zero field of view; (b) sagittal field of view; (c) meridional field of view; (d) diagonal field of view

对比图 3 可见,相对于零视场的干涉像点阵列,弧矢视场、子午视场和对角线视场的干涉像点阵列的位置分别沿  $x$  轴、 $y$  轴和对角线方向发生了平移。由于不同的视场对应于目标场景中不同空间位置的物点,因此图 3 表明目标场景中不同空间位置的物点在探测器平面的不同区域形成了干涉像点,从而可以在探测器平面上将目标场景中不同物点的干涉图像分离开来。

为了进一步分析各视场的干涉像点在探测器平面上的光强分布情况,将各视场的干涉像点阵列的光强分布进行叠加。下面以探测器平面上的一个干涉成像区域为例进行分析,对于  $m=0, n=0$  的零级干涉成像区域,该区域内各视场的干涉像点的光强分布情况如图 4 所示。

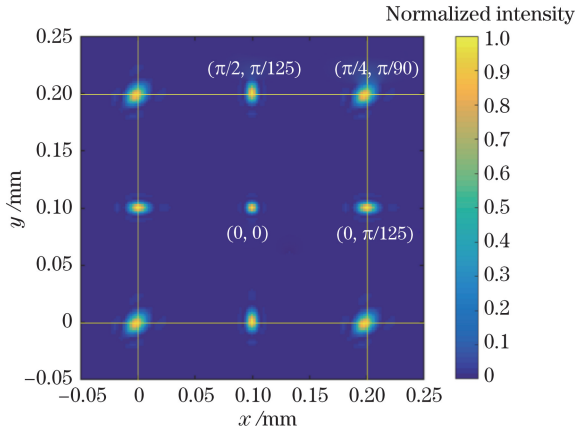


图 4 零级干涉成像区域内各视场的干涉像点的光强分布  
Fig. 4 Intensity distribution of interferometric image points in zero-order interferometric imaging region

图 4 中,坐标  $x \in [0, 0.2]$  且  $y \in [0, 0.2]$  所对应的区域为  $(m, n) = (0, 0)$  的零级干涉成像区域,其余区域为相邻通道的干涉成像区域。由于微透镜阵列与多级微反射镜的孔径衍射效应,各视场干涉像点的能量均向周围弥散,形成弥散斑。在零级干涉成像区域内,相对于零视场  $(0, 0)$  的干涉像点,弧矢视场  $(0, \pi/125)$  干涉像点中的部分能量向  $(m, n) = (1, 0)$  通道的干涉成像区域弥散,子午视场  $(\pi/2, \pi/125)$  干涉像点中的部分能量向  $(m, n) = (0, 1)$  通道的干涉成像区域弥散,而对角线视场  $(\pi/4, \pi/90)$  干涉像点中的部分能量向  $(m, n) = (1, 0)$ 、 $(m, n) = (0, 1)$  和  $(m, n) = (1, 1)$  通道的干涉成像区域弥散。同时,周围通道的干涉像点的能量也向该零级干涉区域弥散。干涉像点的能量分布向相邻通道干涉成像区域弥散,必然会引起相邻通道间干涉图像单元的串扰和混叠,进而导致复原光

谱失真。

对于图 3(a)~(d),分别提取其干涉像点阵列中各干涉像点的强度,将各干涉像点的强度按照光程差的顺序进行数据寻址,得到干涉图序列,然后对其进行离散傅里叶变换<sup>[12-13]</sup>,便可以得到零视场  $(0, 0)$ 、弧矢视场  $(0, \pi/125)$ 、子午视场  $(\pi/2, \pi/125)$  和对角线视场  $(\pi/4, \pi/90)$  所对应的光信号的复原光谱曲线,如图 5 所示。

对比图 5 可见:对于目标场景中的零视场  $(0, 0)$ ,通过光谱复原可以得到理想的单色谱线,其光谱分辨率为  $32 \text{ cm}^{-1}$ ;对于目标场景中的非零视场,其复原光谱的光谱分辨率虽然没有下降,但谱线两侧出现了不同形式和不同程度的噪声波动;对于弧矢视场  $(0, \pi/125)$ ,光谱噪声主要由基频及其高次谐频组成,基频位于  $0.05 \mu\text{m}^{-1}$  处,高次谐频为基频的整数倍,且频次越高,幅值越弱;对于子午视场  $(\pi/2, \pi/125)$ ,复原光谱在全频段的光谱范围内出现了高频次的噪声起伏,且低频区域的噪声幅值要远高于高频区域;对于对角线视场  $(\pi/4, \pi/90)$ ,光谱噪声则兼具弧矢视场和子午视场光谱噪声的综合特征。

## 4 分析与讨论

### 4.1 干涉像点的串扰分析

根据光学成像原理,在每个成像通道中,若微透镜单元的焦距与成像区域一定,则当视场角  $\omega$  超出一定的角度范围时,成像点将会落入到相邻微透镜单元的成像区域内,从而导致相邻通道之间产生串扰。由图 2 可知,每个微透镜单元的成像区域为一个干涉定域,在不考虑干涉像点弥散的情况下,当刚好不发生通道间串扰时,几何视场角与方位角之间的关系为

$$\omega_0(\theta) = \begin{cases} \arctan[b/(2f \cos \theta)], & -\pi/4 \leq \theta < \pi/4 \\ \arctan[b/(2f \sin \theta)], & \pi/4 \leq \theta < 3\pi/4 \\ -\arctan[b/(2f \cos \theta)], & 3\pi/4 \leq \theta < 5\pi/4 \\ -\arctan[b/(2f \sin \theta)], & 5\pi/4 \leq \theta < 7\pi/4 \end{cases} \quad (10)$$

但是,微透镜阵列与多级微反射镜的孔径衍射会导致干涉像点发生衍射弥散,根据标量衍射理论,衍射弥散斑半径对应的衍射弥散角为  $\alpha = 1.22 \frac{\lambda}{a}$ 。同时,多级微反射镜的阶梯结构会导致干涉像点产生离焦弥散,由于离焦量的大小为光程差  $\Delta$  的一

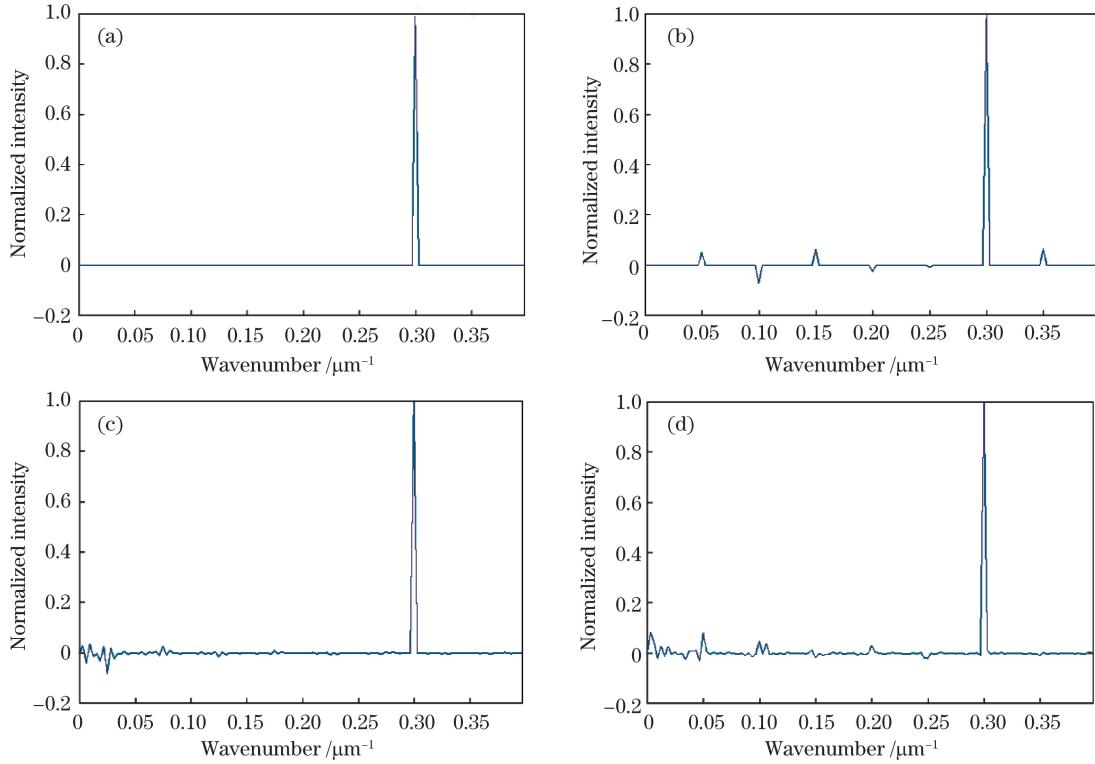


图 5 不同视场对应的复原光谱。(a)零视场;(b)弧矢视场;(c)子午视场;(d)对角线视场

Fig. 5 Recovered spectra corresponding to different field of view. (a) Zero field of view; (b) sagittal field of view; (c) meridional field of view; (d) diagonal field of view

半,因而离焦弥散斑半径所对应的离焦弥散角可以表示为  $\epsilon(\Delta) = \frac{a|\Delta|}{4f^2}$ 。综上,在考虑衍射和离焦的情况下,为了抑制相邻通道间发生串扰,系统所能接受的极限视场角为

$$\omega_g(\theta, \Delta) = \omega_0(\theta) - \alpha - \epsilon(\Delta) = \omega_0(\theta) - 1.22 \frac{\lambda}{a} - \frac{a|\Delta|}{4f^2}, \quad (11)$$

式中:  $\omega_0(\theta)$  为几何视场角。

考虑衍射和离焦效应的极限视场角与方位角、光程差的关系曲面如图 6 所示。

由图 6 可知:极限视场角随光程差变化的幅度不大,因此离焦所引起的极限视场角的变化可以忽略;极限视场角随方位角发生周期性变化,方位角  $\theta$  为  $0, \pi/2, \pi$  和  $3\pi/2$  时对应的弧矢视场和子午视场的极限视场角为  $\omega_{g1} = 0.023$  rad,方位角  $\theta$  为  $\pi/4, 3\pi/4, 5\pi/4$  和  $7\pi/4$  时对应的对角线视场的极限视场角为  $\omega_{g2} = 0.033$  rad。当  $\theta = 0$  时[对应图 3(b)]和  $\theta = \pi/2$  [对应图 3(c)],视场角  $\omega = \pi/125 = 0.025$  rad  $\geq \omega_{g1}$ ,当  $\theta = \pi/4$  [对应图 3(d)]时,视场角  $\omega = \pi/90 = 0.035$  rad  $\geq \omega_{g2}$ ,视场角的大小均超过了该方位角所对应的极限视场角,因此干涉像点会串扰到相邻通道的干涉成像区域中。通过对数值计算

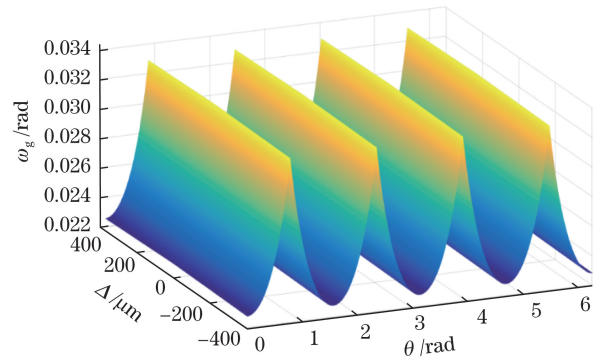


图 6 极限视场角随方位角、光程差的变化曲面

Fig. 6 Variation in limited field of view with azimuth angle and optical path difference

的仿真实验结果(图 3、4)与理论推导结果(图 6)进行对比分析不难看出,仿真实验结果与理论值是一致的。

#### 4.2 光谱失真分析

来自目标场景的具有一定视场的光场经微透镜阵列透射后,其成像光场的主光线相对于光轴会产生倾斜。成像光场主光线的倾斜会导致其发生干涉时干涉像场光程差发生改变。对于目标场景中  $(\theta, \omega)$  视场的光场,其在多级微反射镜平面上第  $(m, n)$  个干涉定域内的成像情况如图 7 所示。

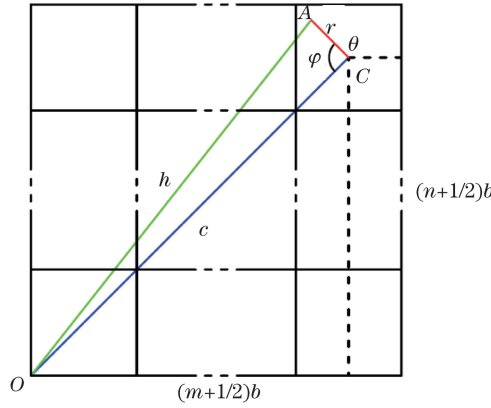


图 7  $(\theta, \omega)$  视场在第  $(m, n)$  个干涉定域上的成像情况

Fig. 7 Imaging graphic of field of view  $(\theta, \omega)$  on interferometric localization  $(m, n)$

由图 7 可以看出,  $(\theta, \omega)$  视场的光场在多级微反射镜平面上第  $(m, n)$  个干涉定域内成像于 A 点, 其一次像高可以表示为  $r = f \tan \omega \exp(j\theta)$ 。同时, 第  $(m, n)$  个干涉定域的中心高可以表示为  $c = (m + 1/2)b + j(n + 1/2)b$ , 一次像高矢量与干涉定

域中心高之间的夹角为  $\varphi = \pi - \theta + \arg(c)$ 。由此, 根据余弦定理可知视场为  $(\theta, \omega)$  的光场在多级微反射镜平面上第  $(m, n)$  个干涉定域内的一次像点相对于光轴的投射高度为

$$h = \sqrt{[(m + 1/2)^2 + (n + 1/2)^2]b^2 + (f \tan \omega)^2 + 2bf \tan \omega \sqrt{(m + 1/2)^2 + (n + 1/2)^2} \cos[\theta - \arg(c)]} \quad (12)$$

由(12)式可知, 不同干涉定域内的成像点的投射高度与视场变量  $(\theta, \omega)$  有关, 因此具有不同光程

差的投射高度经过中继成像镜后, 干涉像点的实际光程差会受到视场变量  $(\theta, \omega)$  的影响, 如图 8 所示。

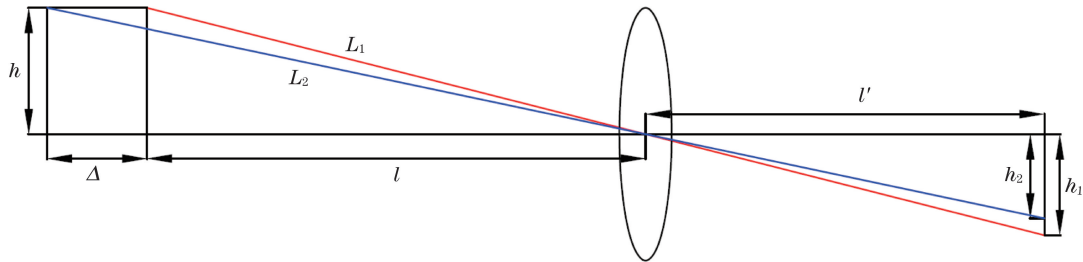


图 8 中继成像镜对具有一定光程差的投射高度的成像关系

Fig. 8 Imaging graphic of two projection heights with certain optical path difference by relay imaging lens

设多级微反射镜零级阶梯到中继成像镜的物距为  $l$ , 中继成像镜的放大倍率为  $\beta$ , 则中继成像镜到探测器的像距  $l' = -\beta l$ , 投射高度  $h$  在探测器上的像高  $h_1 = -\beta h$ , 从而物像之间的光程为  $L_1 = \sqrt{l^2 + h^2} - \beta \sqrt{l^2 + h^2}$ 。对于第  $(m, n)$  个干涉通道, 其所对应的物面与零级阶梯之间会存在一个距离为光程差  $\Delta$  大小的平移, 从而投射高度  $h$  所对应的像高为  $h_2 = -\frac{\beta l}{l + \Delta} h$ , 因此物像之间的光程变为  $L_2 = \sqrt{(l + \Delta)^2 + h^2} - \beta \sqrt{l^2 + \left(\frac{l}{l + \Delta} h\right)^2}$ 。为了保证像面干涉, 两个像高之差应小于探测器一个像元的宽

度  $p$ , 即  $|h_1 - h_2| \leq p$ , 通过整理可得  $\left| \frac{l}{\Delta} + 1 \right| \geq -\frac{\beta h}{p}$ 。由于  $h_{\max} = \frac{\sqrt{2} N b}{2}$ , 从而可得像面干涉的条件为

$$l \geq \left( -\frac{\sqrt{2} \beta b}{2p} N + 1 \right) |\Delta|_{\max} \quad (13)$$

由此, 在保证像面干涉的条件下, 发生像面干涉时的实际光程差为

$$\Delta' = \sqrt{(l + \Delta)^2 + h^2} - \beta \sqrt{l^2 + \left(\frac{l}{l + \Delta} h\right)^2} - \sqrt{l^2 + h^2} + \beta \sqrt{l^2 + h^2} \quad (14)$$

对其进行傍轴近似,整理后可得

$$\Delta' \approx \Delta + \frac{(\beta - 1)\Delta^2 + (2\beta - 1)l\Delta}{2l(l + \Delta)^2} h^2. \quad (15)$$

由(15)式可以看出,实际光程差除了理想光程差  $\Delta$  之外,还存在一个附加光程差。附加光程差的存在会使得复原光谱中产生相位误差,即

$$\phi = 2\pi\nu(\Delta' - \Delta) \approx 2\pi\nu \frac{(\beta - 1)\Delta^2 + (2\beta - 1)l\Delta}{2l(l + \Delta)^2} h^2. \quad (16)$$

由(12)式可知,投射高度  $h$  与视场  $(\theta, \omega)$  有关,因此相位误差也随视场  $(\theta, \omega)$  发生变化。以系统中  $(m, n) = (0, 0)$ 、 $(m, n) = (7, 0)$ 、 $(m, n) = (0, 7)$  和  $(m, n) = (7, 7)$  这 4 个干涉成像通道为例,在极限视场角范围内对不同干涉成像通道中相位误差的分布特点进行分析。对于上述 4 个干涉成像通道,相位误差随视场角、方位角的变化如图 9 所示。

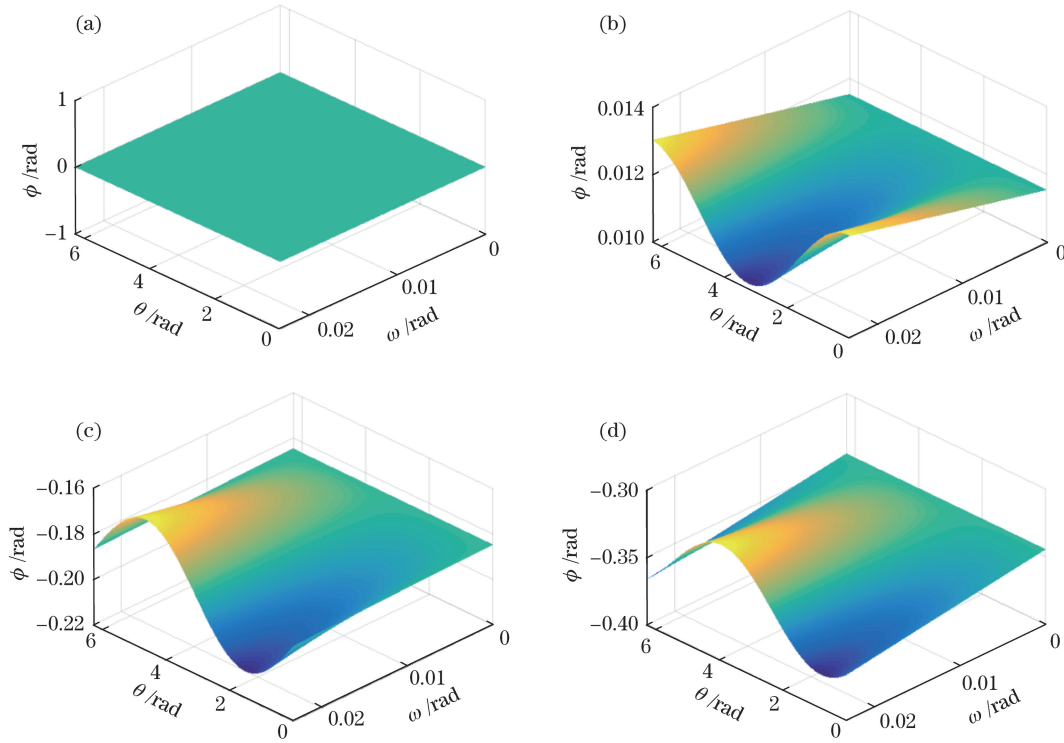


图 9 不同干涉成像通道中的相位误差随视场角、方位角的变化曲面。(a)干涉成像通道(0, 0);(b)干涉成像通道(7, 0);  
(c)干涉成像通道(0, 7);(d)干涉成像通道(7, 7)

Fig. 9 Variation in phase error with field of view and azimuth angle in different interferometric imaging channels.  
(a) Interferometric imaging channel (0, 0); (b) interferometric imaging channel (7, 0); (c) interferometric imaging channel (0, 7); (d) interferometric imaging channel (7, 7)

由图 9 可以看出,除了  $(m, n) = (0, 0)$  的零级干涉成像通道内的相位误差为零外,其余干涉成像通道内均存在相位误差,且对于不同的干涉成像通道,相位误差随视场角、方位角的分布具有不同的变化形式与变化幅值。相位误差的存在会引起干涉像点的强度发生变化,进而导致复原光谱失真。

由(11)式可知,在衍射和离焦所限定的极限视场角范围内,采用归一化光谱误差  $Q$  来表征不同视场条件下极限视场角内复原光谱的性能,即  $Q =$

$$\frac{\int_0^\infty |B(\nu) - B_0(\nu)| d\nu}{\int_0^\infty B_0(\nu) d\nu}, \text{ 其中 } B_0 \text{ 为理想光谱, } B \text{ 为实}$$

际得到的复原光谱。针对不同的视场角与方位角,计算复原光谱的归一化光谱误差,得到归一化光谱误差随视场角与方位角的变化,如图 10 所示。

由归一化光谱误差随视场角与方位角的变化曲面可以看出,归一化光谱误差受视场角的影响比较大,而受方位角的影响比较小,方位角只是使归一化光谱误差在一个很小的范围内波动。归一化光谱误差随着视场角的增大整体表现为一个单调递增的曲面。对于视场角比较小的情形,归一化光谱误差随视场角的递增速率约为  $0.023 \text{ mrad}^{-1}$ 。由此,根据归一化光谱误差的变化关系曲面,基于微透镜阵列与多级微反射镜的几何光学参数,便可以对微小



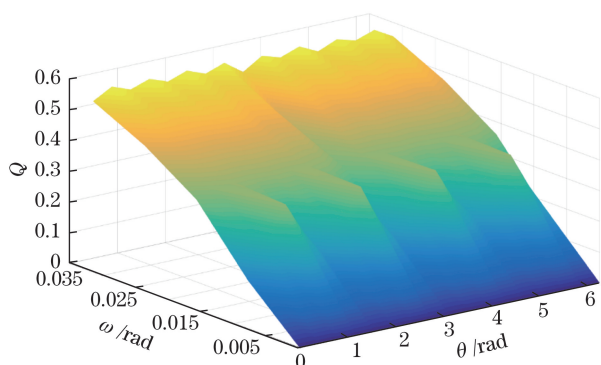


图 10 归一化光谱误差随视场角与方位角的变化曲面

Fig. 10 Variation in normalized spectral error with field of view and azimuth angle

型快照式傅里叶变换成像光谱仪的视场角进行合理的设计, 以实现目标场景中特定区域的有效探测。进一步来讲, 对于视场角引起的归一化光谱失真, 可以通过适当的相位校正算法对复原光谱中的相位误差进行校正, 从而降低归一化光谱的误差。具体的相位校正算法是通过干涉图函数进行数据切趾, 然后利用频域光谱乘积校正和空域干涉图卷积校正的方法<sup>[14]</sup>, 从含有附加光程差的干涉图函数中解调出理想的复原光谱。虽然相位校正算法可以降低视场角对归一化光谱误差的影响, 进而提高系统的设计视场角, 但是不能超过系统的极限视场角。

## 5 结 论

基于微透镜阵列与多级微反射镜的微小型快照式傅里叶变换成像光谱仪, 无需对目标场景和光程差进行扫描即可同时获取目标的图像与光谱, 可应用于运动场景或迅变目标的探测与识别。微透镜阵列将目标场景多重成像到两个多级微反射镜上, 两个多级微反射镜对多重像场进行分布式相位调制, 经过中继成像镜后在探测器平面上形成干涉图像阵列。由于微透镜阵列与多级微反射镜的衍射与离焦效应, 不同视场的干涉像点会发生不同程度的弥散, 从而当视场角超过一定值时, 干涉像点的能量就会串扰到相邻的干涉成像通道中。为了抑制干涉成像通道间发生串扰, 视场角应该被控制在衍射与离焦所限定的极限视场角之内。同时, 不同的视场还会引起光程差的改变, 从而在复原光谱中产生相位误差。对于不同的干涉成像通道, 随着视场角和方位角增大, 相位误差具有不同的变化形式与变化幅值。相位误差导致的复原光谱的归一化光谱误差受方位角的影响比较小, 但随着视场角增大, 复原光谱的归

一化光谱误差表现为大幅度的单调递增。根据归一化光谱误差与视场角之间的关系, 可以合理地设计系统的视场角, 从而实现对目标场景中特定区域的有效探测。

## 参 考 文 献

- [1] Weng S F. Fourier transform infrared spectroscopy [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 34-56.  
翁诗甫. 傅里叶变换红外光谱仪[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 34-36.
- [2] Griffiths P R, de Haseth J A. Fourier transform infrared spectrometry [M]. 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2007: 19-41.
- [3] Kudenov M W, Dereniak E L. Compact real-time birefringent imaging spectrometer[J]. Optics Express, 2012, 20(16): 17973-17986.
- [4] Hagen N, Kudenov M W. Review of snapshot spectral imaging technologies [J]. Optical Engineering, 2013, 52(9): 090901.
- [5] Saptari V. Fourier-transform spectroscopy instrumentation engineering [M]. USA: SPIE Press, 2003.
- [6] Liang J Q, Liang Z Z, Lü J G, et al. Micro spatial modulation Fourier transform infrared spectrometer [J]. Chinese Optics, 2015, 8(2): 277-296.  
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): 277-296.
- [7] Lü J G, Liang J Q, Liang Z Z, et al. Optical field analysis and diffraction restraint of microminiature Fourier transform spectrometer [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(11): 1130002.  
吕金光, 梁静秋, 梁中翥, 等. 微小型傅里叶变换光谱仪光场分析与衍射抑制 [J]. 光学学报, 2016, 36(11): 1130002.
- [8] Lü J G, Liang J Q, Liang Z Z, et al. Wavefront aberration analysis and spectrum correction of microminiature Fourier transform spectrometer [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(2): 0230001.  
吕金光, 梁静秋, 梁中翥, 等. 微小型傅里叶变换光谱仪波前像差分析与光谱修正 [J]. 光学学报, 2018, 38(2): 0230001.
- [9] Lü J G, Liang J Q, Liang Z Z, et al. Analysis and design of interference imaging system in Fourier transform imaging spectrometer based on multi-micro-mirror [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(5): 1554-1559.  
吕金光, 梁静秋, 梁中翥, 等. 基于多级微镜的傅里叶变换成像光谱仪干涉成像系统分析与设计 [J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(5): 1554-1559.
- [10] Wang W C, Liang J Q, Liang Z Z, et al. Design of

- spatio-temporally modulated static infrared imaging Fourier transform spectrometer[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(16): 4911-4914.
- [11] Lü N G. Fourier optics[M]. Beijing: China Machine Press, 2007: 89-90.  
吕乃光. 傅里叶光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 89-90.
- [12] Feng Y T, Sun J, Li Y, et al. Broad-band spatial heterodyne interferometric spectrometer[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(1): 48-55.  
冯玉涛, 孙剑, 李勇, 等. 宽谱段空间外差干涉光谱仪[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(1): 48-55.
- [13] Bayanheshig, Li T T, Pan M Z, et al. Tunable spatial heterodyne spectroscopy with grating-mirror structure[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(12): 3295-3302.  
巴音贺希格, 李涛涛, 潘明忠, 等. 光栅-平面镜型可调式空间外差光谱仪[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(12): 3295-3302.
- [14] Lü J G, Liang J Q, Liang Z Z. Study on spectrum inversion of spatially modulated Fourier transform spectrometer[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(6): 1694-1699.  
吕金光, 梁静秋, 梁中翥. 空间采样傅里叶变换光谱仪光谱反演研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(6): 1694-1699.