

·封面文章·

像场调制傅里叶变换成像光谱仪的建模与实验研究

吕金光^{1**}, 赵百轩^{1,2}, 梁静秋^{1*}, 王维彪¹, 秦余欣^{1,2}, 陶金¹

¹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;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为了明确像场调制傅里叶变换成像光谱仪的工作机理, 通过分析多级微反射镜对成像光场的相位调制特性, 建立了像场调制干涉成像的理论模型。数值计算结果表明, 通过对获得的干涉图像数据立方体进行图像剪切与图像拼接, 可以重构目标场景的全景图像; 通过对剪切后的干涉图像单元进行条纹拼接与光谱解调, 可以复原场景中各目标物点的光谱信息。为了验证该仪器的工作原理, 利用研制的样机进行了目标场景的干涉成像扫描实验, 获取了场景目标的干涉图像数据立方体。通过对各帧干涉图像进行边缘检测与特征配准, 实现了干涉图像单元的剪切与全景图像的拼接。同时, 通过对干涉图像单元进行条纹拼接、基线校正、寻址切趾与离散傅里叶变换, 获得了特征目标的复原光谱, 并通过非均匀采样校正与经验模态分解对光谱进行优化, 提高了复原光谱的性能。

关键词 成像系统; 光谱学; 成像光谱仪; 像场调制; 干涉成像

中图分类号 O433.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1811002

Modeling and Experiment of Image Field Modulated Fourier Transform Imaging Spectrometer

Lü Jinguang^{1**}, Zhao Baixuan^{1,2}, Liang Jingqiu^{1*}, Wang Weibiao¹, Qin Yuxin^{1,2}, Tao Jin¹

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

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In order to clarify the working mechanism of the image field modulated Fourier transform imaging spectrometer, we establish the theoretical model of an image field modulated interference imaging spectrometer by analyzing the phase modulation characteristics of the imaging field induced by a multi-micro-mirror. The numerical calculation shows that the panoramic image of the target scene can be reconstructed by image shearing and image splicing on the obtained interference image data cube. In addition, the spectral information of each target point in the scene can be recovered by fringe splicing and spectral demodulation on the sheared interference image unit. In order to verify the working principle of this instrument, we conduct the interference imaging scanning experiment of the target scene with the developed prototype and obtain the interference image data cube of the scene target. Through the edge detection and feature registration on each frame interference image, we realize the shearing of the interference image unit and the splicing of the panoramic image. Meanwhile, by means of fringe splicing, baseline correction, addressing apodization, and discrete Fourier transform, we recover the spectrum of the feature object. Finally, the recovered spectrum is optimized by means of non-uniform sampling correction and empirical mode decomposition, and the spectral performance is effectively improved.

Key words imaging systems; spectroscopy; imaging spectrometer; image field modulation; interference imaging

OCIS codes 110.3175; 300.6190; 300.6300; 110.4234

1 引言

傅里叶变换成像光谱仪由于具有多通道、波数

精度高、杂散光影响小等优点, 在生化分析、环境监控、气象观测、航空遥感、空间探测等领域具有广泛的应用^[1]。傅里叶变换成像光谱仪按照工作原理分

收稿日期: 2020-05-06; 修回日期: 2020-05-25; 录用日期: 2020-06-09

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)

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

为时间调制、空间调制和时空联合调制三种类型。时间调制傅里叶变换成像光谱仪大多基于动态干涉系统,通过动镜对光程差进行扫描以获取光谱信息,例如美国研制的穿轨红外垂直探测仪 CrIS^[2]、法国研制的红外大气探测干涉仪 IASI^[3]、德国研制的被动大气探测迈克耳孙干涉仪 MIPAS^[4]、日本研制的碳观测热与近红外传感器 TANSO-FTS^[5]等。由于视场角对光程差的限制,仪器的视场角一般不会很大,并且动态干涉系统会降低仪器的稳定性和使用寿命。空间调制傅里叶变换成像光谱仪一般是利用横向剪切干涉仪对狭缝光场进行剪切干涉以获取光谱信息,其干涉系统实现了静态化,例如美国研制的傅里叶变换超光谱成像仪 FTHSI^[6]、对地静止成像傅里叶变换光谱仪 GIFTS^[7]等,但是其狭缝结构会限制仪器的光通量。时空联合调制傅里叶变换成像光谱仪同样采用静态干涉系统,无需狭缝即可获得光谱信息,在稳定性与光通量方面具有相对显著的优势。2014年,本项目组采用研制的多级微反射镜静态干涉系统,提出了基于时空联合调制原理的像场调制傅里叶变换成像光谱仪结构,并进行了干涉成像系统的分析与设计^[8-9]。为了进一步明确像场调制傅里叶变换成像光谱仪的工作机理,本文通过分析多级微反射镜对成像光场的调制作用,利用传递函数理论,建立了像场调制干涉成像的光场传输理论模型,并进行了数值计算与实验测试,分析结果验证了系统的成像光谱探测能力。

2 系统工作原理

基于多级微反射镜干涉系统的像场调制傅里叶变换成像光谱仪的光学结构如图1所示,系统的核心器件为多级微反射镜,将多级微反射镜零级阶梯所在的平面定义为多级微反射镜的参考平面,多级微反射镜的参考平面与平面反射镜相对于分束器呈镜像对称,且都位于望远成像系统的像方焦面上,平面反射镜与多级微反射镜的参考平面即为整个系统的中间像面。来自目标场景的入射光场经望远成像系统在平面反射镜与多级微反射镜的参考平面上形成两个相干的中间像场,多级微反射镜利用其结构特点对中间像场进行分布式相位调制。设多级微反射镜的阶梯步长为 d ,阶梯级数为 N ,阶梯宽度为 a ,则多级微反射镜第 n 级阶梯对中间像场的调制会产生 $\Delta(n) = 2nd$ 的光程平移量,从而产生的相位调制量为

$$\varphi(n) = 2\pi\nu\Delta(n) = 4\pi\nu nd, \quad (1)$$

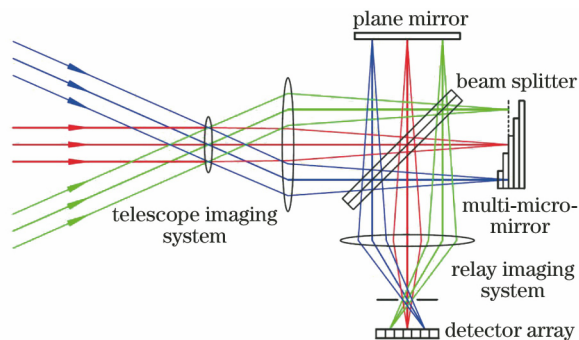


图1 像场调制傅里叶变换成像光谱仪的原理图

Fig. 1 Principle diagram of image field modulated Fourier transform imaging spectrometer

式中: $\nu = 1/\lambda$ 为光的波数, λ 为光的波长。

经多级微反射镜调制形成的调制像场与被平面反射镜反射的中间像场分别通过中继成像系统再次成像到探测器平面上,并在探测器平面上发生干涉,形成了干涉图像。设目标场景中 (x, y) 位置处的物点在多级微反射镜第 n 个阶梯上所对应的干涉图像强度为 $I(x, y, n)$,且该物点的辐射光谱为 $S(x, y, \nu)$,则根据傅里叶变换光谱学原理,干涉图像的强度可以表示为

$$I(x, y, n) = \int_0^\infty S(x, y, \nu) \exp(j4\pi\nu nd) d\nu. \quad (2)$$

将像场调制傅里叶变换成像光谱仪沿着垂直于阶梯的方向进行线性推扫,以采集干涉图像序列。将扫描步长设置为一个阶梯宽度,则每进行一次步进扫描,多级微反射镜各级阶梯上的中间像点便会逆着推扫的方向移动到相邻级次阶梯上的对应位置处。经过一个扫描周期之后,目标场景中各个物点的中间像场便会逆着推扫的方向遍历多级微反射镜的每一个阶梯,从而形成干涉图像数据立方体,如图2所示。

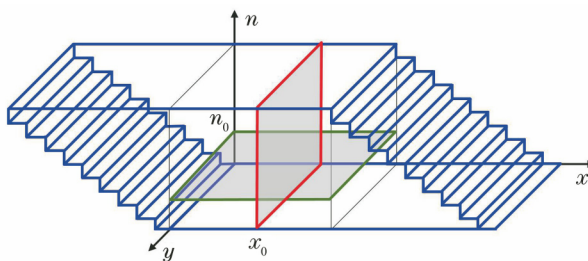


图2 像场调制傅里叶变换成像光谱仪的数据结构

Fig. 2 Data structure of image field modulated Fourier transform imaging spectrometer

像场调制傅里叶变换成像光谱仪每次采集的单帧干涉图像是受到不同干涉级次调制的全景图像,其中既含有二维图像信息,又含有一维干涉信息,如

图 2 中干涉图像数据立方体的阶梯形侧面所示。将采集的每一帧干涉图像沿着阶梯的方向进行剪切,使其成为对应各个不同干涉级次的干涉图像单元,然后将相同干涉级次(n_0)的干涉图像单元按照场景的空间顺序进行图像拼接,便可获得场景目标的全景图像 $I_{im}(x, y, n_0)$,即图 2 中干涉图像数据立方体中的 $n=n_0$ 平面。将相同目标场景(x_0, y)处的干涉图像单元按照光程差的顺序进行条纹拼接,便可获得场景中某一线物的干涉图 $I_{in}(x_0, y, n)$,即图 2 中干涉图像数据立方体中的 $x=x_0$ 平面。通过对其进行离散傅里叶变换,便可以解调出 $x=x_0$ 平面上各物点(x_0, y)的复原光谱信息,即

$$S(x_0, y, \nu) = 2d \sum_n I_{in}(x_0, y, n) \exp(-j4\pi\nu nd). \quad (3)$$

3 系统建模与数值计算

3.1 系统理论建模

来自目标场景的光场首先经望远系统成像到平面反射镜和多级微反射镜的参考平面上,设目标场景的光场在平面反射镜和多级微反射镜参考平面上所对应的几何光学理想像为 $u_{g0}(x_1, y_1)$,其中 x_1 和 y_1 为平面反射镜和多级微反射镜参考平面的空间位置坐标。同时,设望远成像系统为无像差的光学系统,则其作为衍射受限的相干成像系统,对光场复振幅的传递是线性空间不变的^[10]。根据光学成像系统的频率响应特性,对于口径为 D_1 ,焦距为 f 的望远成像系统,其相干传递函数可以表示为

$$H_1(f_{x1}, f_{y1}) = \text{circ}\left(\frac{2\lambda f}{D_1} \sqrt{f_{x1}^2 + f_{y1}^2}\right), \quad (4)$$

式中: f_{x1} 和 f_{y1} 为平面反射镜和多级微反射镜参考平面的空间频率坐标; $\text{circ}(\cdot)$ 表示圆域函数。

根据光学成像系统的传递函数理论,目标场景的光场经望远系统成像后在平面反射镜和多级微反射镜参考平面上形成的中间像场的复振幅分布为

$$u_1(x_1, y_1) = F^{-1}\{F[u_{g0}(x_1, y_1)]H_1(f_{x1}, f_{y1})\}, \quad (5)$$

式中: $F(\cdot)$ 为傅里叶变换; $F^{-1}(\cdot)$ 为傅里叶逆变换。

经望远系统相干传递后的成像光场被分束器分为透射成像光路和反射成像光路,反射成像光路中的中间像场位于平面反射镜上,而透射成像光路中的中间像场位于多级微反射镜的参考平面上。多级微反射镜作为一个相位调制屏,对其参考平面上的中间像场进行调制,具体调制过程如图 3 所示。

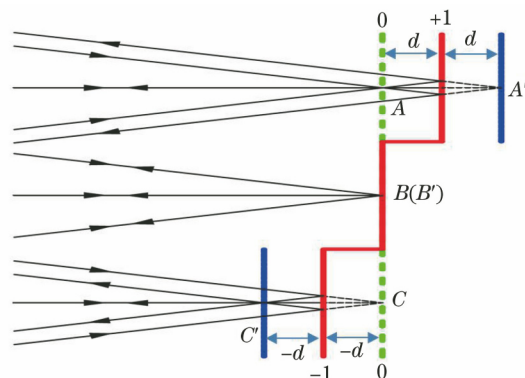


图 3 多级微反射镜对像场的光程调制过程图示

Fig. 3 Illustration of optical path modulation to image field by multi-micro-mirror

以多级微反射镜中的第+1级、0级和-1级阶梯为例,多级微反射镜各级阶梯对中间像场中不同像点的调制作用如图 3 所示。假设目标场景中的三个物点分别成像到多级微反射镜+1级、0级和-1级三个阶梯所对应的参考平面上,形成 A、B、C 三个像点,这三个像点分别经多级微反射镜+1级、0级和-1级阶梯调制之后又形成了 A'、B'、C' 三个调制像点,且三个调制像点位于三个不同的平面上。由图 3 可以看出,调制像面是多级微反射镜参考平面相对于多级微反射镜各级阶梯面的镜像平面,因此调制像点相对于原像点将会产生两倍阶梯步长大小的光程平移量。以上分析表明,多级微反射镜第 n 级阶梯对中间像点进行调制所引入的光程平移量为 $\Delta(n) = 2nd$,从而引入的相位调制量为 $\varphi(n) = 2\pi\nu\Delta(n) = 4\pi\nu nd$ 。因此,多级微反射镜对中间像场的调制函数可以表示为

$$M(x_1, y_1) = \left[\text{rect}\left(\frac{x_1 - a/2}{a}\right) * \sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp(j4\pi\nu nd) \delta(x_1 - na) \right] \text{rect}\left(\frac{x_1}{Na}\right) \text{rect}\left(\frac{y_1}{Na}\right), \quad (6)$$

式中: $*$ 表示卷积运算; $\text{rect}(\cdot)$ 表示矩形函数; $\delta(\cdot)$ 表示脉冲函数。

多级微反射镜对其参考平面上的中间像场进行

调制后,调制像场的复振幅分布为

$$u_2(x_1, y_1) = u_1(x_1, y_1) M(x_1, y_1). \quad (7)$$

平面反射镜上的中间像场 $u_1(x_1, y_1)$ 和多级

微反射镜对应的调制像场 $u_2(x_1, y_1)$ 经中继成像系统后, 分别再次成像到探测器平面上, 并在探测器平面上发生干涉。在中继成像系统中, 探测器平面与平面反射镜为物像关系, 探测器平面与多级微反射镜也为物像关系。设中继成像系统的垂轴放大率为 β , 则平面反射镜上的中间像场与多级微反射镜对应的调制像场在探测器平面上的几何光学理想像分别为 $u_{g1}(x_2, y_2) = u_1(x_2/\beta, y_2/\beta)/\beta$ 和 $u_{g2}(x_2, y_2) = u_2(x_2/\beta, y_2/\beta)/\beta$, 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。

设中继成像系统为衍射受限的光学成像系统, 其出射光瞳的口径为 D_2 , 出射光瞳与探测器平面的距离为 z , 则中继成像系统的相干传递函数可以表示为

$$H_2(f_{x2}, f_{y2}) = \text{circ}\left(\frac{2\lambda z}{D_2} \sqrt{f_{x2}^2 + f_{y2}^2}\right), \quad (8)$$

式中: f_{x2} 和 f_{y2} 为探测器平面的空间频率坐标。

根据传递函数理论, 平面反射镜上的中间像场 $u_1(x_1, y_1)$ 与多级微反射镜对应的调制像场 $u_2(x_1, y_1)$ 经中继成像系统后分别在探测器平面上形成二次像场:

$$u_{i1}(x_2, y_2) = F^{-1}\{F[u_{g1}(x_2, y_2)]H_2(f_{x2}, f_{y2})\}, \quad (9)$$

$$u_{i2}(x_2, y_2) = F^{-1}\{F[u_{g2}(x_2, y_2)]H_2(f_{x2}, f_{y2})\}. \quad (10)$$

中间像场 $u_1(x_1, y_1)$ 对应的二次像场 $u_{i1}(x_2, y_2)$ 与调制像场 $u_2(x_1, y_1)$ 对应的二次像场 $u_{i2}(x_2, y_2)$ 在探测器平面上发生干涉, 形成了干涉像场。干涉像场的复振幅分布可以表示为

$$u_i(x_2, y_2) = u_{i1}(x_2, y_2) + u_{i2}(x_2, y_2) = F^{-1}\{F[u_{g1}(x_2, y_2) + u_{g2}(x_2, y_2)]H_2(f_{x2}, f_{y2})\}. \quad (11)$$

因此, 探测器平面上干涉图像的强度分布为

$$I(x_2, y_2) = |F^{-1}\{F[u_{g1}(x_2, y_2) + u_{g2}(x_2, y_2)]H_2(f_{x2}, f_{y2})\}|^2. \quad (12)$$

将 (4) 式、(6) 式和 (8) 式代入 (12) 式, 便可以得到探测器平面上干涉图像的强度分布。利用干涉图像构建其数据立方体, 结合 (3) 式, 便可以获得目标场景的复原光谱信息。

3.2 数值计算分析

中继成像系统的轴向放大率 $\alpha = \beta^2$, 因此对于中间像点的最大光程平移量 $\pm Nd$, 干涉像点的最大离焦量为 $\pm \beta^2 Nd$ 。根据波像差理论与瑞利判据, 当最大离焦量位于中继成像系统的焦深 $\pm 2\lambda F^2$ 之内时 (F 为中继成像系统的工作 F 数), 离焦并不会对干涉成像的质量产生影响。取望远成像系统的相对孔径 $D_1/f = 0.12$, 多级微反射镜的阶梯步长 $d = 0.625 \mu\text{m}$, 阶梯级数 $N = 200$, 阶梯宽度 $a = 0.25 \text{ mm}$, 中继成像系统的垂轴放大率 $\beta = 0.24$, 出瞳到探测器光敏面的距离与出瞳口径之比 $z/D_2 = 2$, 探测器的像元尺寸为 $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$, 像元数目为 800×800 , 探测器像元与多级微反射镜的匹配关系为每个阶梯宽度对应 4 行像元。采用单色光照明的沿垂直方向线性衰减的渐变中性滤光片来模拟目标场景的光场, 并假设单色光波数 $\nu_0 = 3000 \text{ cm}^{-1}$, 则目标场景的出射光强分布如图 4 所示。将该傅里叶变换成像光谱仪沿着 x 轴方向进行线性扫描, 探测器像平面上单帧干涉图像的强度分布如图 5 所示。

图 4 是目标场景的光强分布, 图 5 是像场调制



图 4 目标场景的光强分布

Fig. 4 Light intensity distribution of target scene

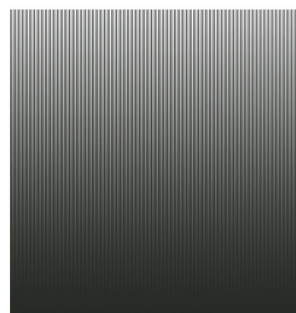


图 5 干涉图像的强度分布

Fig. 5 Intensity distribution of interference image

傅里叶变换成像光谱仪沿着 x 轴方向推扫时获得的多帧干涉图像序列中的某一帧干涉图像的强度分布。从图 5 可以看出, 目标场景图像的强度受到了由多级微反射镜不同阶梯引入的干涉级次相位差的

调制,形成了多个定域干涉条纹。对于不同级次的干涉条纹,其干涉强度与其所在的阶梯级次有关;而对于相同级次的干涉条纹,其干涉强度正比于目标场景的光强分布。因此,干涉图像中耦合有目标场景的一维干涉(光谱)信息与二维图像信息。

对探测器采集的多帧干涉图像序列进行数据处理,处理过程及处理结果如图 6 所示,其中 OPD 为光程差。首先将每一帧干涉图像进行剪切,使其成为对应各级阶梯的干涉图像单元,并将零级阶梯对应的干涉图像单元按照扫描顺序进行图像拼接,得

到目标场景的全景图像,如图 6(a)所示;然后选取某一列特征线物目标,将其所对应的干涉图像单元按照阶梯级次顺序进行条纹拼接,获得该线物目标的干涉图像,并对干涉图像进行去直流处理,得到该线物目标的干涉图,如图 6(b)所示;最后对线物目标的干涉图序列进行光程差匹配与离散傅里叶变换解调,从而复原出线物目标的光谱图像,如图 6(c)所示。图 6(d)为复原光谱图像中等间隔采样的目标物点的复原光谱曲线簇。

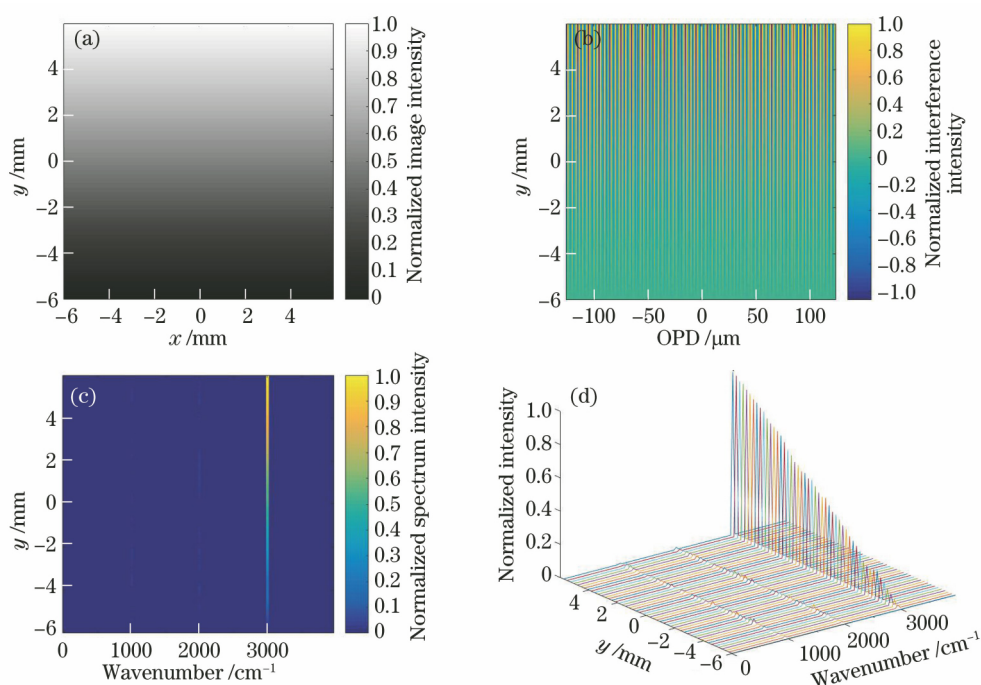


图 6 干涉图像的数据处理过程及结果。(a)图像拼接后的全景图像;(b)条纹拼接后的干涉图;(c)复原光谱图像;(d)线物目标采样点的复原光谱曲线簇

Fig. 6 Data processing and results of interference image. (a) Panoramic image by image splicing; (b) interferogram by fringe splicing; (c) recovered spectral image; (d) recovered spectral curves of line object sampling point

由图 6(a)可以看出,通过图像剪切与图像拼接可以有效地复原出目标场景的全景图像;由图 6(c)可以看出,通过条纹拼接与光谱解调,也可以有效地复原出对应波数的光谱信息。从复原光谱曲线簇 6(d)可以看出,系统可以得到比较理想的复原光谱曲线,谱线的峰值波数即为目标场景出射的单色光波数。同时,谱线峰值强度沿着 y 轴方向线性增强,与目标场景的出射光强沿着垂直方向线性增加相对应,说明复原光谱的谱线强度与目标场景的出射光强呈线性正相关。复原光谱在低频区域出现少量的伴线噪声,这主要是由多级微反射镜边缘阶梯的衍射效应造成的,其幅值很小可以忽略不计。因此,通过对基于像场调制干涉成像原理获得的干涉图像数

据立方体进行处理,可以有效地重构目标场景的图像信息和光谱信息。

4 实验测试与数据处理

基于该原理,我们设计了基于多级微反射镜的像场调制傅里叶变换成像光谱仪样机^[11],其波长范围为中波红外,整体焦距为 48 mm,视场角为 $11^\circ \times 9^\circ$,如图 7 所示。由于实际探测器的像元数目为 640×512 ,像元尺寸为 $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$,故多级微反射镜实际工作的有效阶梯级数为 128。利用该样机对远距离处的空间场景目标进行扫描,使各目标场景依次遍历每一个阶梯,从而最终获得整个目标场景完整的干涉图像数据立方体,如图 8 所示,其具有



图 7 像场调制傅里叶变换成像光谱仪样机

Fig. 7 Prototype of image field modulated Fourier transform imaging spectrometer

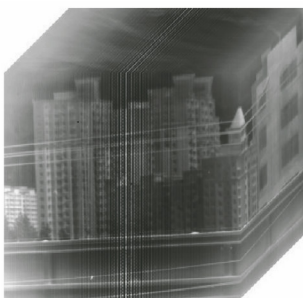


图 8 干涉图像数据立方体

Fig. 8 Interference image data cube

图 2 所示的数据结构特点。

对于获取的干涉图像数据立方体,首先进行图像剪切,将每一帧干涉图像沿着阶梯的边缘进行剪切,使其成为对应各级阶梯的干涉图像单元。由于多级微反射镜各级阶梯引入的光程差会导致均匀光场的干涉图像强度在相邻阶梯之间产生跃变,基于场景中的准均匀背景,采用边缘检测与插值拟合相结合的方法,对多级微反射镜各级阶梯的边缘进行检测识别。首先利用极坐标 Hough 变换方法对场景中的准均匀背景进行边缘检测,通过控制检测长度得到有效的纵向边缘信息,然后利用阶梯参数进行插值,获得未检测出的边缘信息,最后通过最小二乘法拟合出相应的直线,即为干涉图像的剪切线,如图 9 所示。

利用获得的干涉图像剪切线,便可以将干涉图像剪切为对应各级阶梯的干涉图像单元。图像拼接是将处于零级阶梯的干涉图像单元拼接为目标场景的全景图像。为了实现零级干涉图像单元的拼接,本文在各零级干涉图像单元剪切线的两侧分别保留部分相邻干涉级次的冗余信息,采用基于特征的图像拼接方法对其进行拼接。首先进行特征提取,采用尺度不变特征变换,通过检测和定位尺度空间极值点,确定特征点的位置;然后进行图像配准,通过局部特征点所在区域的相关性匹配,获得具有最大可信度的特征配准。配准拼接图像如图 10 所示。

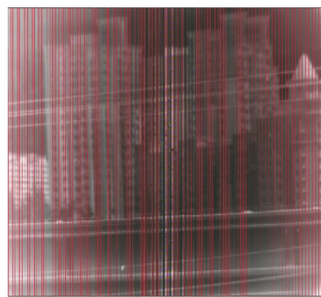


图 9 边缘检测与插值拟合后的图像剪切线

Fig. 9 Image shearing line by edge detection and interpolation fitting



图 10 特征配准拼接后的图像

Fig. 10 Image after feature registration splicing

由图 10 可以看出,拼接图像的各图像单元之间出现拼接缝隙,且拼接缝隙具有周期性特征。本文采用频域滤波的方法对拼接效应进行抑制,首先对拼接图像进行傅里叶变换,获取拼接图像的频谱;然后采用滤波函数对其进行滤波,滤除拼接缝隙的傅里叶谱;最后对滤波后的频谱进行傅里叶逆变换,得到频域滤波后的场景图像,如图 11 所示。与图 10 相对比可以看出,拼缝效应得到了较好的抑制。



图 11 频域滤波后的拼接图像

Fig. 11 Spliced image after frequency domain filtering

为了实现光谱复原,首先进行干涉条纹拼接。本文选取二维场景中的一条线物目标,将其遍历各级阶梯的干涉图像单元按照阶梯级次顺序进行拼接。干涉条纹拼接同样采用上述图像拼接的方法,拼接后的干涉条纹如图 12 所示。

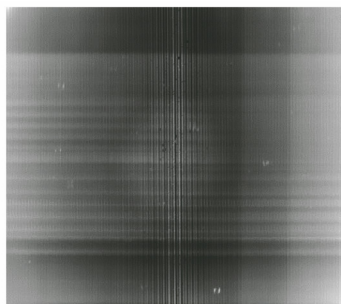


图 12 干涉条纹拼接后的干涉图

Fig. 12 Interferogram after interference fringe splicing

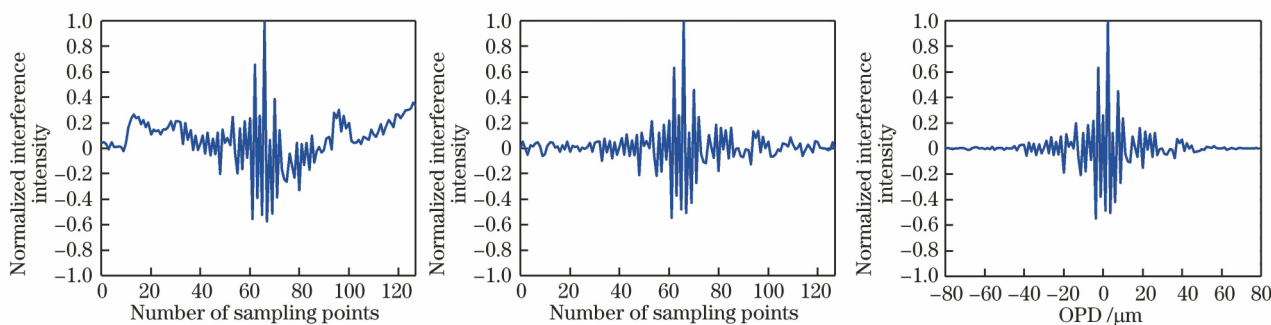


图 13 干涉图序列的数据处理。(a)提取;(b)基线校正;(c)寻址切趾

Fig. 13 Data processing of interferogram sequence. (a) Extraction; (b) baseline correction; (c) addressing apodization

由于多级微反射镜制作精度的限制,阶梯高度会存在一定的误差,从而在复原光谱中会出现相位误差。为了消除阶梯高度误差对复原光谱的影响,本文采用插值拟合的方法对干涉图序列进行非均匀性采样校正,如图 14(a)所示。利用非均匀采样校

正后的干涉图序列,通过离散傅里叶变换解调,便可以得到特征目标点的复原光谱。由于系统噪声的影响,复原光谱的分辨率和信噪比会受到一定的限制,为此本文对复原光谱采用经验模态分解算法进行了光谱优化,光谱复原的结果如图 14(b)所示。

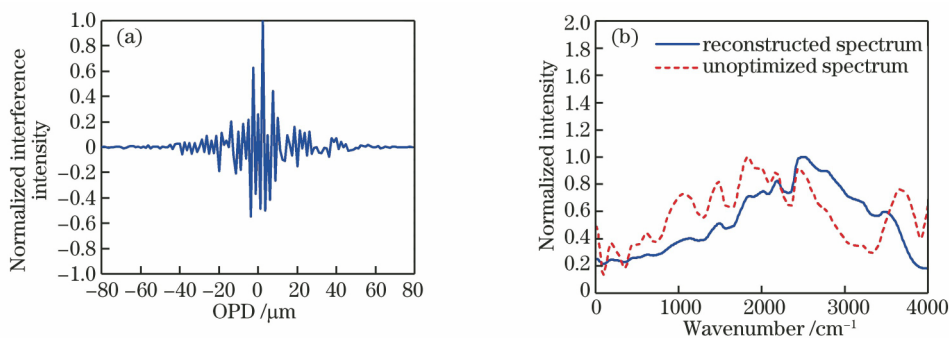


图 14 复原光谱的数据处理。(a)非均匀采样校正;(b)光谱解调

Fig. 14 Data processing of recovered spectra. (a) Non-uniform sampling correction; (b) spectral demodulation

对干涉图序列直接进行离散傅里叶变换,解调得到的复原光谱如图 14(b)中虚线所示,经过非均匀采样校正和经验模态分解算法优化后的复原光谱如图 14(b)中实线所示。通过对比可以看出,校正优化后的复原光谱与校正优化前的光谱相比,光谱噪声得到了有效的抑制。由图 14(b)还可以看出,校正优化前后复原光谱的峰值略有不同,说明非均匀采样校正对光谱的波数漂移具有一定的改善作

用。由于所选择的光谱复原目标的成分并不确定,并且其辐射光谱在开放空间的大气传输过程中受到大气辐射吸收的影响,因此在接下来的研究中,我们将对目标辐射光谱的反演方法及大气辐射校正等进行研究。

5 结 论

利用建立的像场调制干涉成像的理论模型,通

过数值计算与数据处理获取了目标场景的全景图像,并复原了与目标场景波长及光强相关的光谱信息。利用研制的像场调制傅里叶变换成像光谱仪样机扫描获得的目标场景的干涉图像数据立方体,基于边缘检测与特征配准,实现了干涉图像单元的剪切与全景图像的拼接;通过对干涉图像单元进行条纹拼接、基线校正、寻址切趾与离散傅里叶变换,实现了目标场景的光谱复原;利用非均匀采样校正与经验模态分解对光谱进行优化,有效改善了复原光谱的性能。

参 考 文 献

- [1] Griffiths P R, de Haseth J A. Fourier transform infrared spectrometry[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2007: 19-41.
- [2] Glumb R J, Williams F L, Funk N, et al. Cross-track Infrared Sounder(CrIS) development status[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5152: 1-8.
- [3] Blumstein D, Chalon G, Carlier T, et al. IASI instrument: technical overview and measured performances[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5543: 196-207.
- [4] Fischer H, Birk M, Blom C, et al. MIPAS: an instrument for atmospheric and climate research[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2007, 8(8): 2151-2188.
- [5] Kuze A, Suto H, Nakajima M, et al. Thermal and near infrared sensor for carbon observation Fourier-transform spectrometer on the Greenhouse Gases Observing Satellite for greenhouse gases monitoring[J]. Applied Optics, 2009, 48(35): 6716-6733.
- [6] Yarbrough S, Caudill T R, Kouba E T, et al. MightySat II.1 hyperspectral imager: summary of on-orbit performance[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4480: 186-197.
- [7] Smith W L, Revercomb H E, Zhou D K, et al. Geostationary Imaging Fourier Transform Spectrometer (GIFTS): science applications [J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6405: 64050E.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Lü N G. Fourier optics[M]. Beijing: China Machine Press, 2007: 148-155.
吕乃光. 傅里叶光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 148-155.
- [11] Zhao B X, Lv J, Ren J, et al. Data processing and performance evaluation of a tempo-spatially mixed modulation imaging Fourier transform spectrometer based on stepped micro-mirror[J]. Optics Express, 2020, 28(5): 6320-6335.
- [12] 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.
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.
- [13] Zhang Z N, Li L B, Hu B L, et al. Nonlinear interference spectrum data reconstruction algorithm for image plane interference[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(6): 0630002.
张智南, 李立波, 胡炳樑, 等. 像面干涉中非线性干涉光谱数据重构算法[J]. 光学学报, 2017, 37(6): 0630002.
- [14] 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.