

基于二次成像的像面干涉高光谱成像方法

李建欣 孟鑫 周伟 姚良涛 朱日宏

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘要 像面干涉高光谱成像技术主要应用于遥感成像领域, 为了实现不同距离目标的光谱成像探测, 提出了一种基于二次成像的像面干涉高光谱成像方法。通过在无限远成像系统中加入前端成像物镜、中继准直物镜和横向剪切分束器, 构建一个二次成像的干涉系统。通过采用分离式的前端成像物镜方案, 选用变焦镜头或不同焦距的定焦镜头, 有效地兼顾远、近距离目标的成像光谱探测。对该方法的成像系统、光谱分辨率和推扫方式等方面进行了分析, 进一步搭建了实验装置, 对室内近场目标和室外远场目标进行了成像实验, 并对生物组织进行了显微光谱干涉成像实验。实验结果表明, 该成像方法能够有效用于不同距离目标的高光谱成像探测。

关键词 光谱学; 高光谱成像; 二次成像; 像面干涉

中图分类号 O433 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.1230001

Image Plane Interferometric Hyperspectral Imaging Based on Re-Imaging

Li Jianxin Meng Xin Zhou Wei Yao Liangtao Zhu Rihong

(*Institute of Electronic Engineering and Photoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China*)

Abstract Technology of image plane interferometric hyperspectral imaging is mainly applied in remote sensing imaging field. In order to realize spectral imaging of targets at different distances, a method of image plane interferometric hyperspectral imaging is presented. A re-imaging interferometric system is set up by inserting front-end imaging lens, relay collimating lens and transverse shear beam splitter in infinite imaging system. A separated front-end imaging lens method with choice of zoom lens or lens of different focal length is adopted to achieve spectral imaging of targets at long or short distances. The imaging system, resolution of spectrum and push-broom mode are analyzed. Experimental device is set up to detect the targets of near field indoor and far field outdoor. A microscopic spectral imaging test of biological tissue is also carried out with the device. Experimental results show that the proposed imaging method is effectively applied in hyperspectral imaging of targets at different distances.

Key words spectroscopy; hyperspectral imaging; re-imaging; image plane interferometric

OCIS codes 110.4234; 110.3175; 300.6190

1 引 言

像面干涉高光谱成像技术是光谱成像领域中一种前沿的光谱探测技术, 在军用和民用方面具有广阔的应用前景。它通过在无限远成像系统中加入横向剪切分束器引入探测目标的干涉信息, 利用傅里叶变换反演处理得到探测目标的二维空间光强信息和各点光谱信息。与时间型干涉成像光谱仪相比,

像面干涉成像光谱仪内部可以去掉推扫运动部件, 具有结构紧凑、稳定性高的特点; 与空间调制型干涉成像光谱仪相比, 它没有狭缝的限制, 具有高光通量、高空间分辨率等优点。像面干涉高光谱成像技术是国际上成像光谱领域的一个研究热点, 自上世纪 80 年代后期以来, 国际上对该技术进行了深入研究。其中以色列 Cabib 等^[1]提出了一种基于 Sagnac

收稿日期: 2012-06-08; 收到修改稿日期: 2012-06-24

基金项目: 国家自然科学基金(61205016, U1231112)资助课题。

作者简介: 李建欣(1977—), 男, 博士, 讲师, 主要从事干涉成像光谱技术和光学精密测试技术等方面的研究。

E-mail: ljx@vip.163.com

干涉仪的像面干涉成像光谱仪,可实现高通量的光谱成像。美国 Horton 等^[2]提出了一种基于改型 Mach-Zehnder 干涉仪的像面干涉成像光谱仪,可实现可见光、近红外等波段的双通道同时成像。国内董瑛等^[3]提出了大孔径静态干涉成像光谱仪(LASIS),在望远成像系统中加入横向剪切分束器获得探测目标的干涉图像,主要用于对地遥感领域。此外,德国、意大利和法国等国的科研人员也对像面干涉成像光谱技术进行了相关的研究^[4~11]。

像面干涉高光谱成像技术通常以探测目标的平行光入射为条件,在无限远成像系统中加入横向剪切分束器来实现远处探测目标的光谱成像。因此,该技术通常只适用于遥感目标的成像探测。而在工业产品检测、刑侦物证检验和生物医学等应用领域,往往需要对数米、甚至 1 m 以内的近距离目标进行光谱成像探测,此时若采用传统的像面干涉高光谱

成像技术,则不满足目标物点以平行光束入射的条件,无法实现高分辨率的光谱成像探测。本文在分析像面干涉型成像光谱技术原理的基础上,提出一种基于二次成像的像面干涉高光谱成像方法,通过选用不同的分离式前端成像物镜,以实现远、近距离目标的一体化光谱成像探测。

2 光谱成像原理和方法

2.1 像面干涉光谱成像的原理

像面干涉成像光谱仪从原理上来说是一个干涉成像系统,它通过在无限远成像系统中加入横向剪切分束器,在像面上得到探测目标通过自相关调制的干涉图像,其光能量利用率和一般的照相系统相当^[12,13]。它主要由横向剪切分束器、无限远成像系统、电荷耦合器件(CCD)图像采集系统组成,基本原理如图 1 所示。

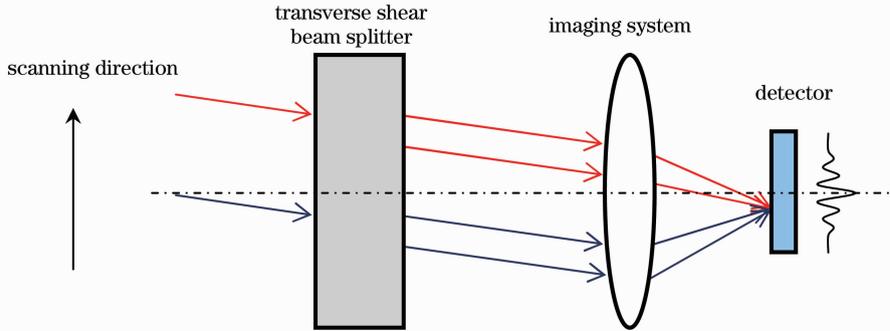


图 1 像面干涉高光谱成像的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of image plane interferometric hyperspectral imaging

在像面干涉高光谱成像技术中,探测目标处于较远的距离,此时可认为目标发出的光束以平行光束的形式进入干涉成像系统,目标上不同的物点对应不同入射角的平行光束。当平行光束进入系统经过横向剪切分束器后,被横向剪切成两束光。这两束光的等光程面与横向剪切分束器的光束出射面平行,而对于后面的成像系统而言,入射平行光束的等光程面垂直于入射光束。当横向剪切分束器的出射面垂直于系统光轴时,对于视场角不为零的光束,两个等光程面不重合,则入射平行光束通过成像系统到达像面同一点时,由于存在光程差(OPD)会形成干涉。目标上不同位置上的物点对应着不同的视场角,因此像面上不同位置的像点对应着不同的光程差,所形成的像是经过光程差调制的干涉图像,如图 2 所示。当系统在推扫成像过程中,每个像点在不同时刻被不同的光程差进行调制,经过完整的推扫后该像点形成干涉条纹。对该干涉条纹数据进行傅

里叶变换计算,即可得到所对应的物点的光谱信息。该干涉成像技术通过空间调制的方式产生光程差,而获取干涉图像序列的方式是时间调制型,因此国际上把该干涉成像系统称为像面干涉仪,其相关的技术亦可称为像面干涉高光谱成像技术^[2]。



图 2 经过光程差调制的干涉图像

Fig. 2 Interferogram modulated by OPD

2.2 二次成像的原理和方法

采用上述的像面干涉成像光谱仪对近距离的目标进行光谱成像时,由于探测目标的成像平面和成像系统的焦平面不重合,而探测器靶面却位于成像系统的焦平面处,导致探测器所接收的图像不清晰。如果把探测器靶面移动至探测目标的清晰成像平面处,却由于近距离物点的光线经过横向剪切分束器后在探测器靶面上形成两个像点,这两个像点的不完全重合将导致干涉条纹的调制度衰减,导致图像中的干涉条纹对比度下降,甚至消失,最终无法提供

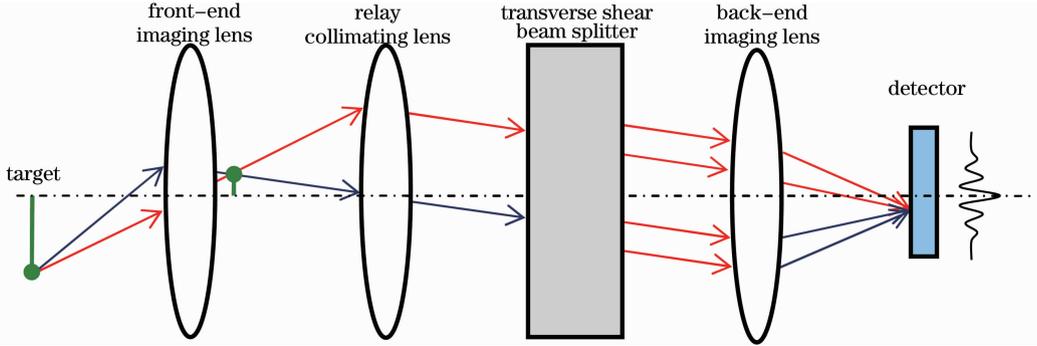


图3 基于二次成像的像面干涉光谱成像系统

Fig. 3 Image plane interferometric spectral imaging system based on re-imaging

在二次成像的像面干涉光谱成像系统中,前端成像物镜的像平面和中继准直物镜的前焦面重合。探测目标上的物点发出的光束首先经过前端成像物镜进行成像,在其像面上得到探测目标的清晰实像。该实像位于中继准直物镜的前焦面处,经过中继准直物镜后,实像上像点发出的光束被准直成为平行光束,并以入射角 θ 进入横向剪切分束器。平行光束经过横向剪切分束器后,每条光线被横向剪切为平行的两条光线,然后进入后端成像物镜。对于后端成像物镜而言,成像面与后焦面重合,因此可以在像面上产生清晰的干涉条纹。

设横向剪切分束器的剪量为 d ,平行光束在像面上产生干涉的光程差 Δ 满足关系式

$$\Delta = d \sin \theta. \quad (1)$$

如果目标上的物点光谱为 $B(\sigma)$ (σ 为波数, $\sigma = 1/\lambda$),则在像面得到的干涉光强分布为

$$I(\Delta) = 2RT \int_0^{+\infty} B(\sigma)(1 + \cos 2\pi\sigma\Delta) d\sigma, \quad (2)$$

式中包含 $I(+\infty)$ 的直流分量,该直流分量不包含光谱信息,在讨论光谱信息与干涉信息之间对应关系时可以省去。 R 和 T 分别为横向剪切分束器的反射率和透射率,它们为常数,亦可不予考虑。将(1)式代入(2)式得

携带光谱的图像数据。因此,如果要获取清晰的干涉图像,需要设计一个中继光学系统,使得物点上的光线经过中继系统准直后进入横向剪切分束器,以满足平行光束进入干涉成像系统的要求。

2.2.1 成像系统

为了兼顾远、近距离目标的光谱成像探测,在干涉成像系统前端加入一个中继光学部件,构成一个二次成像的像面干涉光谱成像系统。其中,中继光学部件由前端成像物镜和中继准直物镜组成。系统的原理框图如图3所示。

$$I(\theta) = \int_0^{+\infty} B(\sigma) \cos(2\pi\sigma d \sin \theta) d\sigma. \quad (3)$$

干涉强度 I 随着入射光束角度 θ 变化。通过对探测目标推扫成像,可获得一系列干涉图像,提取同一物点在不同视场角下的干涉光强信息,并进行傅里叶变换,即可得到该物点的光谱信息

$$B(\sigma) = \mathcal{F}[I(\theta)] = \int_{-\infty}^{+\infty} I(\theta) \exp(2\pi\sigma d \sin \theta) d\theta. \quad (4)$$

上述系统从成像角度而言,可以看成是一个二次成像系统。第一级为前端成像系统,用于将探测目标成像在中继准直物镜的前焦面处。为了兼顾远、近距离目标的探测,前端成像系统可采用变焦成像系统。中继准直物镜与后端成像物镜组成第二级成像系统,对前端成像系统所成的实像进行再次成像。

两级成像系统的视场角关系为

$$\tan \theta_1 = \frac{f_R \tan \theta_2}{l'_1}, \quad (5)$$

式中 θ_1 为第一级成像系统的视场角; θ_2 为第二级成像系统的视场角, $\theta_2 = \theta$; f_R 为中继准直物镜的焦距; l'_1 为第一级成像系统的像距。

根据光学成像关系,第一级成像系统满足

$$\frac{1}{l'_1} - \frac{1}{l_1} = \frac{1}{f_1}, \quad (6)$$

式中 l_1 为探测目标到前端成像物镜的距离, l'_1 为前端成像物镜的像距, f_1 为前端成像物镜的焦距。由(6)式计算 l'_1 得

$$l'_1 = \frac{f_1 l_1}{f_1 + l_1}, \quad (7)$$

代入(5)式得

$$\tan \theta_1 = \frac{f_R (f_1 + l_1) \tan \theta_2}{f_1 l_1}. \quad (8)$$

由(8)式可知,第二级成像系统的视场角在保持不变的情况下,通过选择前端成像物镜的参数,可以实现不同视场角范围成像的目标。一般情况下,当探测目标的距离比较近的时候,需要大视场成像,此时应选用焦距较小的前端成像物镜,以保证像距 l'_1 尽可能的小。当探测目标的距离比较远的时候,应选用长焦距前置前端物镜。

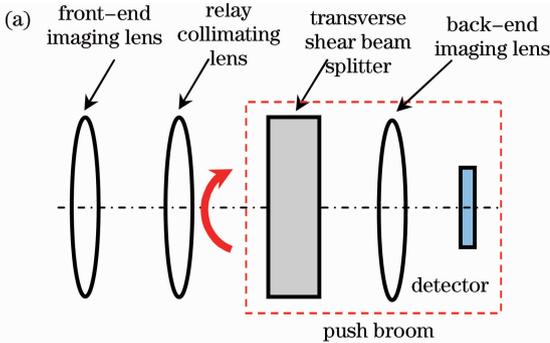
在二次成像系统中,渐晕会引起干涉图像调制度的下降。其中前端成像物镜和中继准直物镜产生的渐晕,会导致干涉图像周边分辨率的降低;后端成像物镜产生的渐晕,则会影响光谱复原的精度,因此要避免成像系统产生渐晕。对于二次成像系统而言,还要保证第一级成像系统的像方孔径角小于第二级成像系统的物方孔径角。

2.2.2 光谱分辨率

在实际成像中,由于所获取的目标物点的干涉光程差是有限的,因此复原的光谱就不再为单色谱线,而是有一定的线宽,其大小与最大光程差 Δ_{\max} 有关,即

$$\delta\sigma = \frac{C}{\Delta_{\max}}, \quad (9)$$

式中 C 为切趾函数决定的常数,如采用矩形窗切趾函数, $C=0.606$; 采用三角窗切趾函数, $C=0.886$ ^[14]。



将(1)式代入(9)式,得到像面干涉成像光谱仪的光谱分辨率为

$$\delta\sigma = \frac{C}{d \sin \theta_2}, \quad (10)$$

可以看出,光谱分辨率 $\delta\sigma$ 和横向剪存量 d 、第二级成像系统的视场角 θ_2 有关,增大剪存量 and 视场角都会增大光谱分辨率。采用传统的像面干涉成像系统对近距离目标进行成像时,由于探测器靶面与后焦面不完全重合,如果横向剪存量过大,会影响像面干涉条纹的调制度,而增加视场角则会增加横向剪切分束器的体积,因此光谱分辨率受到一定限制。在二次成像系统中,后端成像系统的像平面和后焦面重合,增大横向剪存量不会降低干涉条纹的对比度,可有效提高光谱分辨率。

2.2.3 推扫方式

在二次成像系统中,物方视场角 θ_1 会随着探测目标的距离 l_1 不同而发生改变。如果采用系统整体推扫的方式进行成像,物方视场角 θ_1 不变而像面视场角 θ_2 发生改变,光谱分辨率 $\delta\sigma$ 也将会发生改变。为了保证探测目标处于不同距离时光谱分辨率保持恒定,提出两种系统内部推扫的方式来获取不同光程差下的干涉图像序列。这两种内部推扫方式分别为:

1) 横向剪切分束器、后端成像物镜和探测器整体推扫的方式,如图4(a)所示。在这种扫描方式下,探测器获得的干涉图像序列中的干涉条纹位置不变,而探测目标的图像随着推扫产生横向偏移,即探测目标上各物点的干涉信息分布在图像序列的不同位置上,如图4(b)所示。在提取物点A所对应的干涉数据时首先需要进行图像配准处理,确保每幅干涉图上提取的干涉强度值属于同一个物点^[13]。

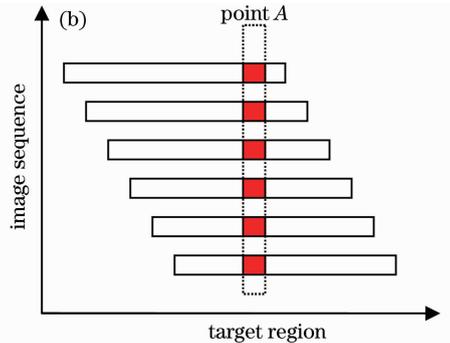


图4 第一种推扫方式和图像序列。(a) 横向剪切分束器、后端成像物镜和探测器的整体推扫; (b) 物点在图像序列中的位置

Fig. 4 First push-broom mode and image sequence. (a) Push broom of the whole including transverse shear beam splitter, back-end imaging lens and detector, (b) position of object point in image sequence

2) 横向剪切分束器推扫的方式,如图 5(a)所示。随着横向剪切分束器的推扫,剪切光束的等光程面相对于探测器靶面来说发生转动,因此靶面上像点的光程差随之改变,干涉图像序列上的干涉条纹产生横向偏移。而探测目标上物点的入射光束的视场角没有发生改变,因此推扫过程中获取的探测目标的图像不会发生偏移。这种推扫方式下采集得

到的干涉图像序列如图 5(b)所示,探测目标上各物点的干涉信息分布于图像序列的同一位置上。因此,在提取物点 B 所对应的干涉信号数据过程中,只需提取每幅图像中 B 点对应的像素数值即可。这种推扫方式省去了干涉图像配准的处理环节,简化了光谱复原过程。

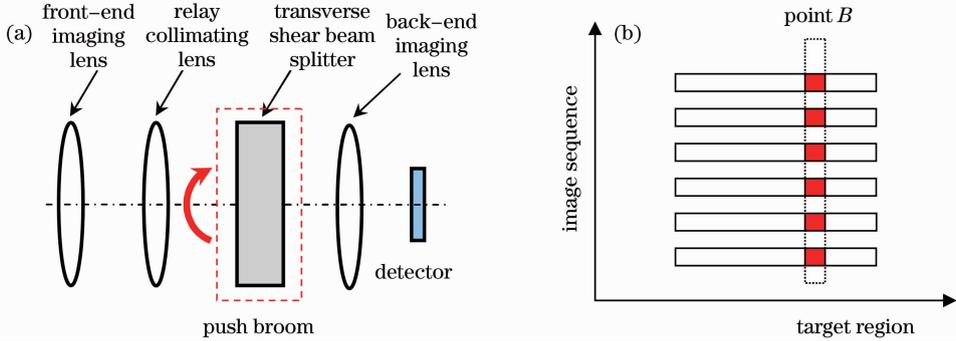


图 5 第二种推扫方式和图像序列。(a) 横向剪切分束器的推扫;(b) 物点在图像序列中的位置

Fig. 5 Second push-broom mode and image sequence. (a) Push broom of transverse shear beam splitter; (b) position of object point in image sequence

采用第一种扫描方式存在两个主要问题:1) 数据采集冗余大,增加图像数据存储量和光谱复原数据处理的负担;2) 在干涉图信息的提取环节需要复杂的图像配准处理,增大光谱复原处理的难度。相比之下,第二种方式的数据采集冗余小,而且不需要图像配准处理,更适合用于二次成像的像面干涉光谱成像系统。如果系统用于机载光谱成像,则不采用内部推扫方式,利用飞行平台本身的移动获取干涉图像序列。此时,采集的干涉图像序列和第一种内部推扫方式相似,提取干涉信息时也需要图像配准处理。

五角棱镜后,出射光线被转折 90° 。五角棱镜也固定在电控转台上,通过控制转台的转动实现直接成像和光谱成像双通道的切换,其切换时间依赖于转台的转动速度。前端成像物镜采用商用 Nikon 镜头和其他工业相机镜头,镜头和装置之间通过标准 C 卡口进行连接。Nikon 镜头为 F 口,可通过 C 卡口转接环进行连接。实验装置采用分离式前端成像物镜的方案,可以针对不同的成像情况很方便地采用不同的镜头,具有应用灵活等优点。中继准直物镜和后端成像物镜采用相同焦距的长焦镜头,因此 CCD 上所成的像和前端成像物镜所成的像大小相同。这样的特性对于其用于显微光谱成像来说尤其

3 实验与结果

3.1 实验装置

按照二次成像干涉系统模型,搭建实验装置进行成像实验,装置如图 6 所示。横向剪切分束器可以采用多种形式,例如 Sagnac、双角反射体和改型 Mach-Zehnder 等横向剪切分束器^[2,15]。在实验装置中,横向剪切分束器采用了三片分立式 Sagnac 剪切分束器,以便针对不同的实验要求调整横向剪切量。其中反射镜 M1 和 M2 镀高反膜,分束镜(BS)镀半反半透膜,有效工作波段范围为 $450\sim 750\text{ nm}$ 。Sagnac 剪切分束器固定在电控转台上,实现横向剪切分束器推扫。为了实现直接成像,实验装置还采用了五角棱镜。当探测目标上的物点入射光线进入

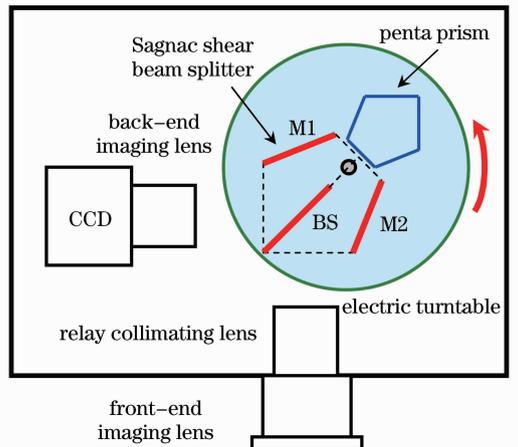


图 6 实验装置示意图

Fig. 6 Schematic diagram of experimental device

重要,它不影响成像系统的放大倍率,便于显微放大倍数的选择。

3.2 实验图像与结果

实验装置对放置于其前 1.2m 处的彩色图片进行了成像实验,实验目标如图 7 所示。由于在室内进行实验,采用了普通荧光灯管进行照明。通过推扫共获得 4000 幅干涉图像,图 8 为其中的 4 幅不同时刻采集的干涉图像。由于采用了 Sagnac 剪切分束器推扫的方式,探测目标的图像位置不变,而干涉条纹向左偏移。从图中可以看出,图像纹理清晰,干涉条纹具有很好的对比度,表明二次成像干涉系统

能够获取近距离目标清晰、高对比度的干涉图像。

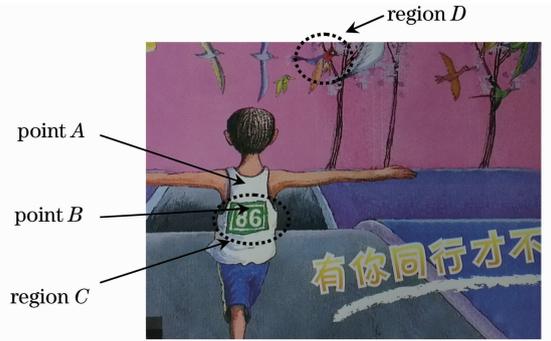


图 7 实验目标

Fig. 7 Experimental target

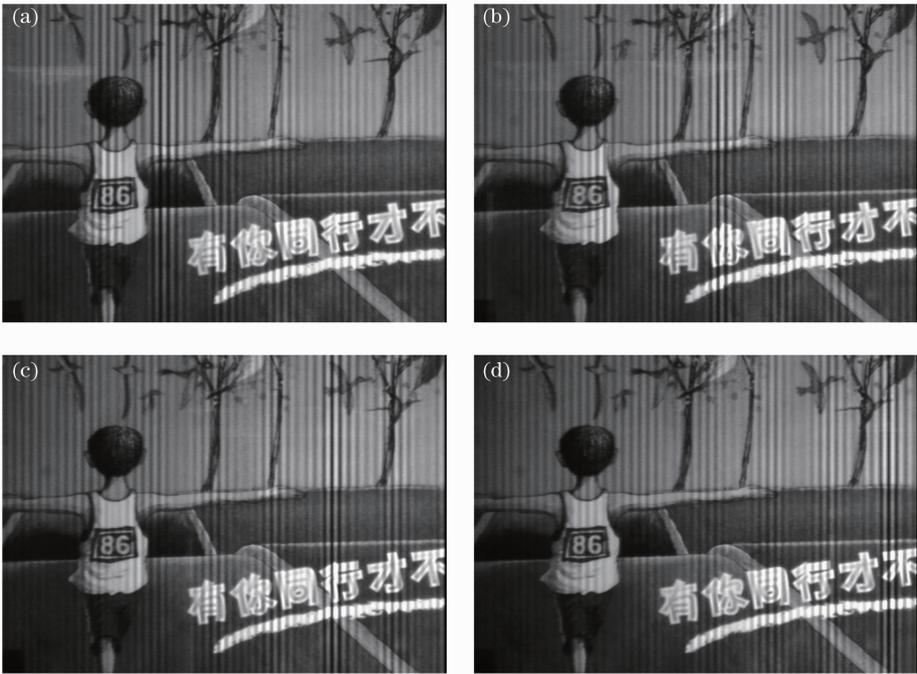


图 8 干涉图像序列

Fig. 8 Interferogram image sequence

从采集的干涉图序列中提取各物点不同光程差的干涉信息,重新组成每列物点的干涉条纹图像,如

图 9 所示。其中图 9(b)为第 150 行的干涉数据曲线。对重排后的干涉数据进行去趋势项处理和相位

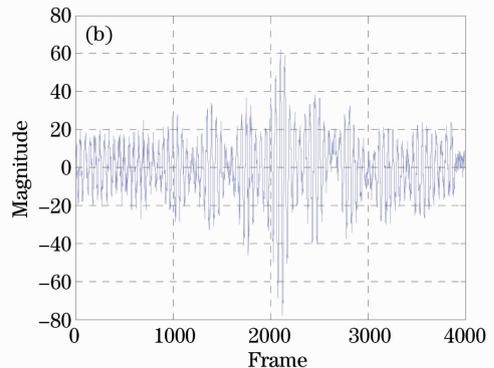
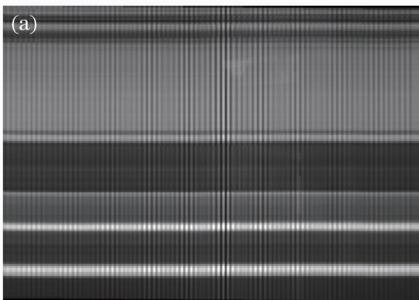


图 9 重新排列后的干涉图像及曲线

Fig. 9 Realigned interferogram image and curve

校正处理后,再利用傅里叶变换即可得到各物点的光谱信息^[16,17]。

图 10 为经过光谱复原处理后得到的目标光谱信息。其中,图 10(a)所示的光谱曲线为目标上物点 A 处的光谱曲线。物点 A 的颜色为白色,其光谱

曲线反应了照明光源的光谱分布,可以看出,照明荧光灯为三色窄带光源,并不是连续的白光光源。图 10(b)所示的光谱曲线为目标上物点 B 处的光谱曲线,物点 B 的光谱为一窄带光谱,主要集中在绿光谱段,与物点 B 的颜色相符合。图 10(c)为区域

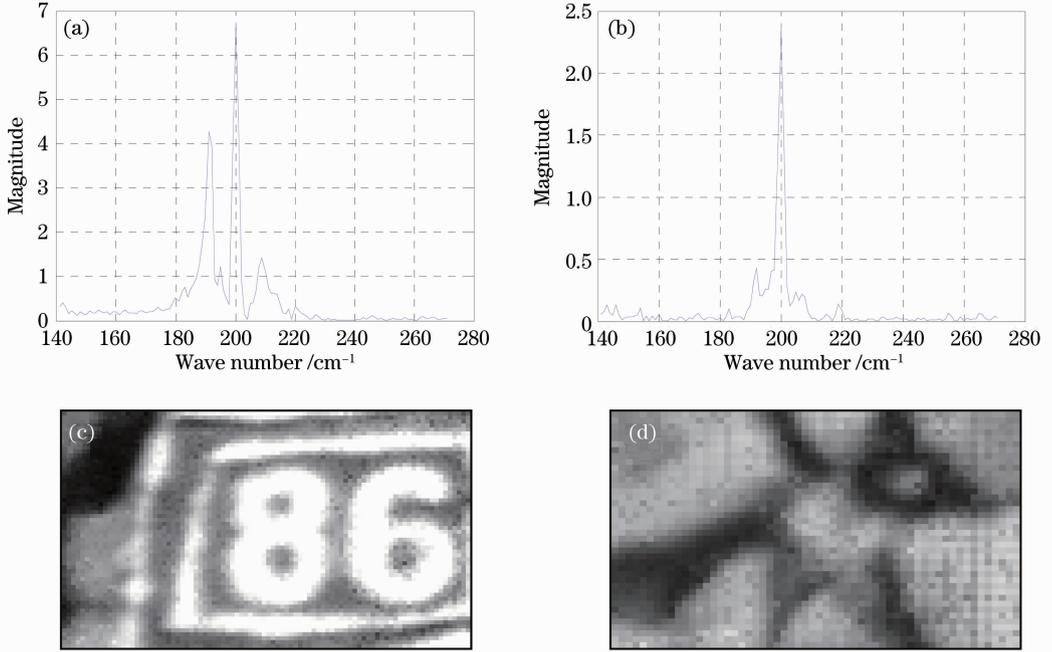


图 10 复原光谱信息

Fig. 10 Recovered spectral information

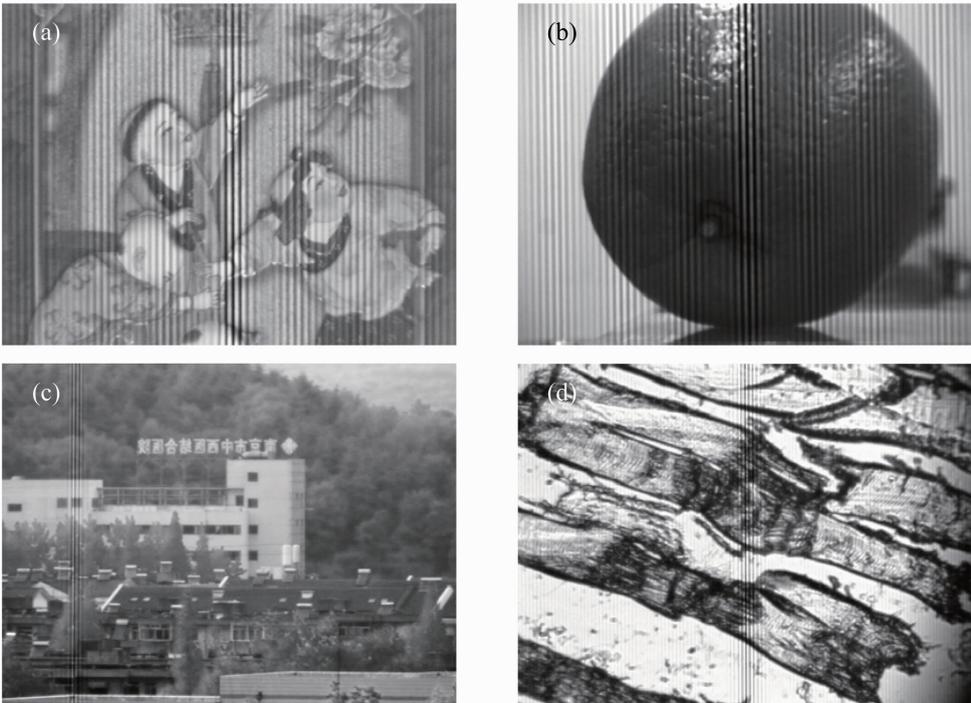


图 11 其他实验目标的干涉图像

Fig. 11 Interferogram of other experimental targets

C 在 202 cm^{-1} 波数上的复原光谱图像,可以看出,在此波段上白色和绿色部分的区域亮度很强。图 10(d)为区域 D 在 153.8 cm^{-1} 波数上的复原光谱图像,可以明显看出红色区域亮度较强。可见,利用二次成像干涉系统可以有效探测近距离目标的图像和光谱信息。

实验装置的前端成像物镜采用变焦镜头或不同焦距的定焦镜头,可以对不同距离的目标进行清晰的干涉成像,图 11 给出了不同距离的干涉成像效果。其中图 11(a)为某食品包装盒在 0.8 m 处的干涉图像,图 11(b)为成熟橙子在 0.4 m 处的干涉图像,图 11(c)为室外远处场景的干涉图像,其中白色建筑物与成像系统的距离超过 1000 m 。从以上 3 个实验结果图像可以看出,采用分离式的前端成像物镜方案,可以满足不同距离目标的成像要求。除了一般的近场和遥感成像,本文把显微物镜用作前端成像物镜,对猪肉组织(尺寸为 $150\text{ }\mu\text{m}$ 左右)进行了显微光谱成像实验,如图 11(d)所示。可以看出,生物组织纹理清晰,干涉条纹对比度高,说明基于二次成像的像面干涉光谱成像系统也可以应用于显微高光谱成像领域。

4 结 论

分析了像面干涉高光谱成像技术的基本原理,在此基础上提出了一种基于二次成像的像面干涉高光谱成像方法。通过在无限远成像系统中加入前端成像物镜、中继准直物镜和横向剪切分束器,构成一个二次成像的干涉系统,解决了像面干涉高光谱成像技术进行近距离成像时所面临的问题。采用分离式的前端成像物镜方案,通过选用变焦镜头或不同焦距的定焦镜头,能够有效兼顾远、近距离目标的成像光谱探测。在系统结构方面,提出了两种内部推扫方式,并且利用横向剪切分束器与五角棱镜的切换,实现光谱成像和直接成像的双通道工作模式。基于二次成像的干涉系统模型,搭建实验装置并对室内近场目标和室外远场目标进行了成像实验,得以清晰的干涉条纹图像。此外,还对生物组织进行了显微光谱干涉成像实验,获得了有意义的实验结果。所提出的二次成像方法具有光通量大、干涉调制度高、目标分辨率高等优点,在食品安全监测、化工污水监测、工业产品检测、刑侦物证检验和生物学等领域具有重要应用价值。

参 考 文 献

- 1 D. Cabib, R. A. Buckwald, Y. Garini *et al.*. Spatially resolved Fourier transform spectroscopy (spectral imaging): a powerful tool for quantitative analytical microscopy [C]. *SPIE*, 1996, **2678**: 278~291
- 2 R. F. Horton. Optical design for a high étendue imaging Fourier transform spectrometer[C]. *SPIE*, 1996, **2819**: 300~315
- 3 Dong Ying, Xiangli Bin, Zhao Baochang. Lateral shearing interferometer in large aperture static imaging spectrometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(11): 991~995
- 4 董 瑛, 相里斌, 赵葆常. 大孔径静态干涉成像光谱仪中的横向剪切干涉仪[J]. *光子学报*, 1999, **28**(11): 991~995
- 5 W. Posselt, K. Holota, H. O. Tittel *et al.*. Compact Fourier transform imaging spectrometer for remote sensing[C]. *Fourier Transform Spectroscopy (FTS)*, 2001, FMD10
- 6 A. Barduccia, V. D. Cosmob, P. Marcoionnic *et al.*. ALISEO: a new stationary imaging interferometer[C]. *SPIE*, 2004, **5546**: 262~270
- 7 Y. Ferrec, J. Taboury, H. Sauer *et al.*. Optimal geometry for Sagnac and Michelson interferometers used as spectral imagers [J]. *Optical Engineering*, 2006, **45**(11): 115601
- 8 R. G. Sellar, G. D. Boreman. Limiting aspect ratios of Sagnac interferometers [J]. *Optical Engineering*, 2003, **42** (11): 3320~3325
- 9 P. G. Lucey, K. A. Horton, T. Williams. Performance of a long-wave infrared hyperspectral imager using a Sagnac interferometer and an uncooled microbolometer array[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(28): F107~F113
- 10 J. P. Allard, M. Chamberland, V. Farley. Airborne measurements in the longwave infrared using an imaging hyperspectral sensor[C]. *SPIE*, 2008, 7014
- 11 Sun Dexin, Yang Cunwu. Research on SWIR band high étendue stationary imaging Fourier transform spectrometer [J]. *J. Applied Optics*, 2002, **23**(4): 1~5
- 12 孙德新, 杨存武. 高光通量短波红外静止干涉成像光谱仪研究 [J]. *应用光学*, 2002, **23**(4): 1~5
- 13 Zhang Chunmin, Zhao Baochang, Xiangli Bin *et al.*. Analysis and calculation of throughput of the polarization interference imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(9): 192~197
- 14 张淳民, 赵葆常, 相里斌 等. 偏振干涉成像光谱仪通量的分析与计算[J]. *光学学报*, 2001, **21**(9): 192~197
- 15 P. J. Minnett, R. G. Sellar. The high efficiency hyperspectral imager—a new instrument for measurements of the Arctic surface [C]. 8th Conference on Polar Meteorology and Oceanography, 2005, P1. 2
- 16 Y. Ferrec, J. Taboury, H. Sauer *et al.*. Experimental results from an airborne static Fourier transform imaging spectrometer [J]. *Appl. Opt.*, 2011, **50**(30): 5894~5904
- 17 Li Suning. Research and Application on Fourier Transform Interference Imaging Spectroscopy [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology Doctoral Dissertation, 2011
- 18 李苏宁. 傅里叶变换干涉成像光谱技术研究及应用[D]. 南京: 南京理工大学博士论文, 2011
- 19 Y. Ferrec, J. Taboury, H. Sauer *et al.*. Compactness of lateral shearing interferometers [J]. *Appl. Opt.*, 2011, **50** (23): 4656~4663
- 20 Li Suning, Zhu Rihong, Li Jianxin *et al.*. Method of reconstruction on Fourier-transform spectroscopy [J]. *J. Applied Optics*, 2009, **30**(2): 268~272
- 21 李苏宁, 朱日宏, 李建欣 等. 傅里叶干涉成像光谱技术中的重构方法[J]. *应用光学*, 2009, **30**(2): 268~272
- 22 Li Suning, Zhu Rihong, Gao Zhishan *et al.*. Fourier conjugate correction spectral reconstruction for Fourier-transform spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0412010
- 23 李苏宁, 朱日宏, 高志山 等. 共轭傅里叶变换校正成像光谱重构 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(4): 0412010

栏目编辑: 李文洁