

# 高光谱像面干涉的近场成像机理研究

孟 鑫 李建欣\* 朱日宏 周 伟 姚良涛

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

**摘要** 像面干涉成像光谱技术具有高光通量、高目标分辨率、高光谱分辨率等优点, 主要应用于遥感光谱成像领域。为实现近场目标的探测, 对近场像面干涉成像进行了理论分析, 研究了成像质量的影响因素, 计算了干涉光程差和最小可探测距离。研究了近场干涉图像中条纹调制度的影响因素, 推导了调制度的物理表达式, 并分析了干涉条纹调制度对信噪比以及复原光谱准确度的影响。为提高近场干涉图像的调制度和成像质量, 提出了一种基于二次成像的像面干涉成像光谱方法。搭建了像面干涉成像光谱的实验装置, 对近场目标进行了探测, 并对获取的干涉图像进行了分析; 利用二次成像的像面干涉成像光谱方法, 对近场目标进行干涉成像实验, 获取了调制度较高的近场干涉图像。

**关键词** 光谱学; 像面干涉; 近场探测; 调制度

**中图分类号** O433 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0230001

## Near-Field Mechanism Research on Hyperspectral Image Plane Interferometric Imaging

Meng Xin Li Jianxin Zhu Rihong Zhou Wei Yao Liangtao

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

**Abstract** The technology of image plane interferometric imaging has the advantages of high luminous flux, high target resolution and high spectral resolution. It is mainly applied in remote sensing imaging field. In order to achieve the near-field target detection, the theory of near-field image plane interferometric imaging is analyzed. The factors affecting image quality is studied and the physical expressions of optical path difference and the minimum detection are described. The modulation influencing factors of near-field image plane interferometric fringe are studied and the calculation method of modulation is deduced. The impact of the interferometric fringe modulation on the signal-to-noise ratio and the accuracy of the recovery spectrum is analyzed. For improving the modulation of near-field interferometric imaging and the image quality, a re-imaging interferometric system is set up. Experimental device of imaging plane interferometric spectrometer is set up to detect the near-field targets and the experimental interferometric images are analyzed. A re-imaging experimental device is set up and we get a series of near-field target interferometric images with high modulation.

**Key words** spectroscopy; interferometric imaging; near-field detection; modulation

**OCIS codes** 110.4234; 110.3175; 300.6190

## 1 引 言

干涉成像光谱技术是 20 世纪 80 年代发展起来的新型探测技术, 利用干涉信息与光谱信息之间的傅里叶变换关系来复原目标的光谱信息, 并且获取

目标的二维空间信息<sup>[1]</sup>。20 世纪 90 年代中后期出现的像面干涉成像光谱技术, 通过在无限远成像系统中加入横向剪切分束器, 引入干涉信息; 与时间型干涉成像光谱技术相比, 内部不需要动镜推扫, 具有

**收稿日期**: 2012-08-03; **收到修改稿日期**: 2012-09-11

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

**作者简介**: 孟 鑫(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事干涉成像光谱技术方面的研究。E-mail: njjustmengxin@163.com

**导师简介**: 朱日宏(1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事光学干涉测量与光学精密仪器等方面的研究。

E-mail: zhurihong@mail.njust.edu.com

\* 通信联系人。E-mail: ljx@vip.163.com

结构稳固的优点;与空间型干涉成像光谱技术相比,不受入射狭缝的限制,具有高光通量、高目标分辨率和高光谱分辨率等优点<sup>[2,3]</sup>。像面干涉成像光谱技术现已成为国内外研究的热点<sup>[4~10]</sup>,在工业、农业和医学等领域具有广阔的应用前景。

现有的像面干涉成像光谱技术多用于遥感领域,一般由前置望远系统、横向剪切分束器和成像系统组成。因探测距离较远,物点发射或者反射的光束以平行光的形式进入系统,在成像镜后焦面成像并发生干涉,获取目标的二维空间信息和干涉信息。而在农产品检验、物证检测、污染物监控等领域需要对近场目标进行光谱成像探测,目标距离探测器只有十几米或者几米远。利用像面干涉成像光谱技术对近距离目标进行探测时,物点发射或者反射的光束不再以平行光的形式进入探测系统。结合衍射受限成像理论,本文对近场像面干涉成像进行了理论分析;研究了干涉图像成像质量和干涉条纹调制度的影响因素。为提高近场目标干涉图像的调制度和成像质量,提出了基于二次成像的像面干涉成像光谱方法。

## 2 近场像面干涉成像光谱的理论分析

### 2.1 基本原理

当对近场目标进行探测时,可以去掉起集光作用的望远系统。物点发出的光以发散光束的形式进入探测系统,不同物点对应不同的物高。物高为  $h$  的物点  $s$  发出的光束进入探测系统,首先经过横向剪切分束器,其中的每一条光线被横向一分为二。横向剪切分束器为引入干涉信息的核心组件,同一

光束被横向剪切后形成的两束光的等相位面与横向剪切分束器的出射面平行,而对于后面的成像系统而言,入射平行光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,由于存在光程差会形成干涉。常见的横向剪切分束器有 Sagnac 型、双折射晶体型等。将剪切开来的光线反向延长后相交于两个虚物点  $s_1, s_2$ , 如图 1 所示。点  $s_1, s_2$  与物点  $s$  位于相同的物面上,并且两个虚物点之间距离与横向剪切分束器的剪切量  $d$  相同。剪切开来的两束光经过成像镜在探测器靶面处成像等同于  $s_1, s_2$  两点经过成像镜成像。受到通光孔径的限制,物点  $s_1, s_2$  在成像面上不再成两个点像,而是两个衍射环,其中超过 80% 的能量集中于中心的艾里斑。同一个物点在像面上形成的艾里斑内部相位分布一致<sup>[11]</sup>,因此源自同一物点的两个虚物点经过成像镜后生成的两个艾里斑如果重叠,那么重叠区域内就会发生干涉。干涉光强度为

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

式中  $B(\sigma)$  为物点的光谱信息,其中  $\sigma$  为波数,与波长成倒数关系; $\Delta$  为光程差; $F_t$  为与横向剪切分束器的振幅反射和透射率相关的函数;函数  $F_o$  大小与同一个物点形成的两个艾里斑的重叠区域大小有关。通过推扫,获取目标的一系列干涉图像,从中提取同一个物点在不同光程差下的干涉信息,然后进行傅里叶变换即可复原物点的光谱信息。

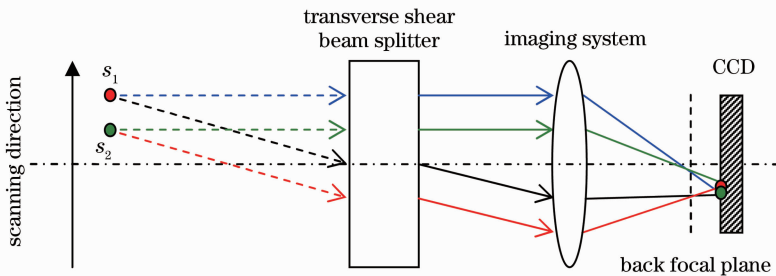


图 1 近场像面干涉成像示意图

Fig. 1 Schematic diagram of near-field image plane interferometric hyperspectral imaging

### 2.2 光程差

由于艾里斑内部相位分布一致,因此同一个物点  $s$  在像面上形成的两个艾里斑之间的光程差为两个虚物点  $s_1, s_2$  主光线之间的光程差,如图 2 所示。当物距为  $l$  时,  $s_1, s_2$  主光线光程差为

$$\Delta = \left[ \sqrt{l^2 + h_1^2} - \sqrt{l^2 + (h_1 - d)^2} \right] \left( \frac{l}{l - f} \right) = \frac{d^2 + 2dh_1}{\sqrt{l^2 + h_1^2} + \sqrt{l^2 + (h_1 - d)^2}}, \quad (2)$$

式中  $h_1$  为虚物点  $s_1$  的物高,  $f$  为成像镜的焦距,  $l$  为

物距,  $d$  为横向剪切分束器的剪切量。由于剪切量远小于物高, 所以上式可以简化为

$$\Delta = \frac{dh_1}{\sqrt{l^2 + h_1^2}} \left( \frac{l}{l-f} \right). \quad (3)$$

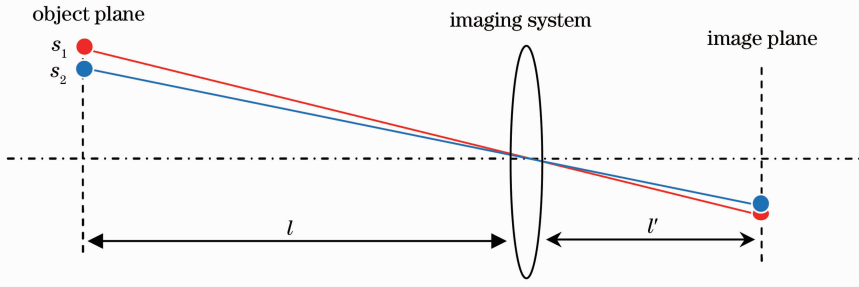


图 2 光程差示意图

Fig. 2 Schematic diagram of optical path difference

干涉成像光谱仪光谱分辨率主要由获取的干涉信息的最大光程差决定, 即

$$\delta\sigma = \frac{C}{\Delta_{\max}}, \quad (4)$$

式中  $C$  为由切趾函数决定的常数, 当采用矩形窗切趾函数时,  $C = 0.604^{[12]}$ 。 $\delta\sigma$  为光谱分辨率,  $\Delta_{\max}$  为最大光程差。在剪切量一定的情况下, 像面干涉成像仪获取的目标物点干涉光程差主要由物距和物高决定。受到探测靶面半宽度  $w$  的限制, 最大物高为  $h_{\max} = w(l-f)/f$ , 代入(3)式得

$$\Delta_{\max} = \frac{wd}{\sqrt{f^2 + w^2 \left(1 - \frac{f}{l}\right)^2}}. \quad (5)$$

将(5)式代入(4)式得

$$\delta\sigma = \frac{C \sqrt{f^2 + w^2 \left(1 - \frac{f}{l}\right)^2}}{wd}. \quad (6)$$

当目标位于成像镜焦面上时光谱分辨率最高, 但无法成像。随着物距的增大, 系统的光谱分辨率逐渐降低并且变化率逐渐减小。假设  $f = 85$  mm, 横向剪切量  $d = 1$  mm, 采用 8.7 mm 的 CCD 成像, 光谱分辨率与探测距离的关系如图 3 所示。由于光谱分辨率受探测距离影响, 因此不同物面的物点光谱分辨率不同。尤其是当探测近距离目标时, 光谱分辨率随着物距的改变会发生较大的变化。因此像面干涉成像光谱仪在进行近场探测时, 为保证目标各点光谱分辨率的一致性, 成像景深不宜过大。

### 2.3 成像质量

物点  $s$  发出的光经过探测系统后在像面形成的 2 个艾里斑中心之间距离  $\tilde{d}$  满足

$$\tilde{d} = d\beta = \frac{df}{l-f}. \quad (7)$$

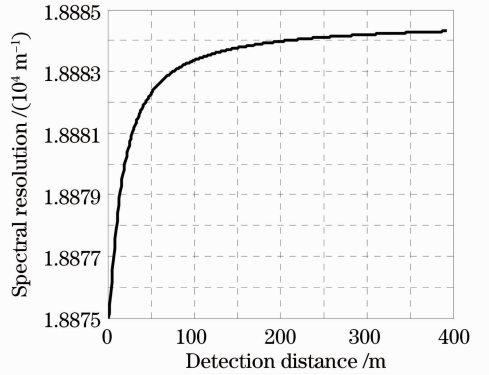


图 3 光谱分辨率随探测距离的变化曲线

Fig. 3 Curve of spectral resolution changing with detection distance

当通光孔为圆形时, 物点经过成像系统形成的艾里斑半径为

$$R = \frac{1.22f}{\sigma D}, \quad (8)$$

式中  $D$  为成像系统的通光孔径。根据瑞利判据, 当两个艾里斑之间的距离小于艾里斑的半径时, 成像系统将无法分辨。为了保证物点  $s$  在像面形成的两个艾里斑不被分辨出来, 必须要满足两个艾里斑的中心距离小于其半径, 即  $\tilde{d} < R$ , 由(7), (8)式可得到满足上述条件的最小探测距离为

$$l_{\min} = \frac{0.82dD}{\lambda} + f. \quad (9)$$

当探测距离小于  $l_{\min}$  时, 同一个物点在像面上形成的两个艾里斑中心距离大于成像系统的分辨率。此时探测到的像是两个目标像的错位叠加, 会导致成像模糊, 影响像面干涉成像光谱装置的目标分辨率。在横向剪切量  $d$  不变的情况下, 通过减小成像系统的通光孔径可以保证像面成像光谱仪对近场目标清晰成像。

### 3 近场像面干涉图像的调制度分析

#### 3.1 调制度的影响因素

##### 3.1.1 宽波段干涉条纹的调制度

像面干涉成像光谱仪获取的是宽波段目标的干涉条纹图像,可以看作由多个不同波数的单色光干涉条纹叠加而成,如图 4(a)所示。设探测谱段内各个波数的光强都为  $I_0$ ,则复色光产生的干涉光强分布为

$$I = \int_{\sigma_{\text{mid}} - \frac{\xi\sigma}{2}}^{\sigma_{\text{mid}} + \frac{\xi\sigma}{2}} I_0 [1 + \cos(2\pi\sigma\Delta)] d\sigma = 2\pi I_0 \xi\sigma \left[ 1 + \frac{\sin(\pi\xi\sigma\Delta)}{\pi\xi\sigma\Delta} \cos(2\pi\sigma\Delta) \right], \quad (10)$$

式中  $\sigma_{\text{mid}}$  为探测谱段的中间波数,  $\xi\sigma$  为探测光谱的带宽。受探测光谱宽度的影响,干涉条纹调制度为

$$K_1 = \left| \frac{\sin(\pi\xi\sigma\Delta)}{\pi\xi\sigma\Delta} \right|. \quad (11)$$

干涉条纹调制度  $K_1$  主要受光程差  $\Delta$  的影响,如图 4(b)所示。当  $\Delta=0$  时干涉条纹调制度最好。理想情况下,像面干涉成像光谱装置获取的余弦信息的调制度为  $K_1$ ,通过提取余弦调制项进行傅里叶变换可以获得光谱信息。

由(1)式可知,获取的干涉光强中包括一直流分量  $\int_0^{+\infty} B(\sigma) d\sigma$  和一余弦分量,其中直流分量不包含光谱信息,余弦分量中  $2F_t F_o$  为调制度表达式。所以,像面干涉成像装置获取的干涉光强调制度还受到横向剪切分束器的分光比函数  $F_t$  和重叠函数  $F_o$  的影响。

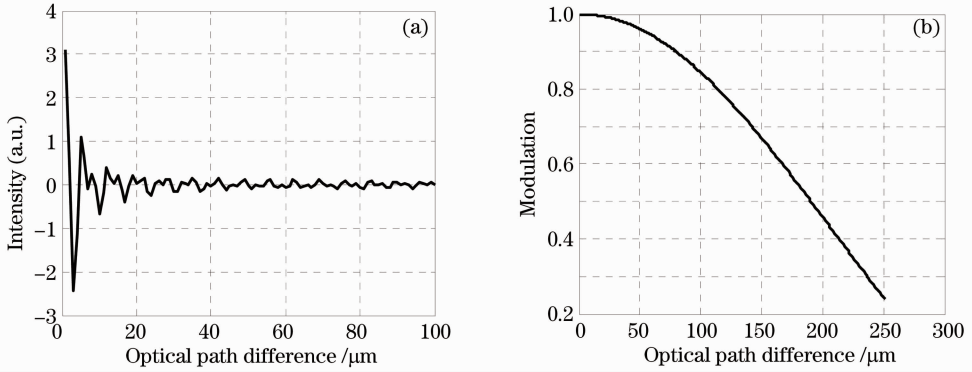


图 4 宽带光谱的干涉信息和调制度曲线。(a)干涉信息;(b)调制度曲线

Fig. 4 Broadband spectrum interference information and modulation curve. (a) Interference information; (b) modulation curve

##### 3.1.2 横向剪切分束器对干涉条纹调制度的影响

在 2 个艾里斑完全重合的情况下,重叠函数  $F_o=1$ ,单色光波干涉条纹调制度主要由横向剪切分束器的分光比决定。设横向剪切分束器对 s 光和

p 光的振幅反射率为  $r_s$  和  $r_p$ ,则 s 光和 p 光的振幅透射率为  $\sqrt{1-r_s^2}$  和  $\sqrt{1-r_p^2}$ 。当入射光是自然光时,通过横向剪切分束器后得到的干涉光强为

$$I = [\bar{E}_s r_s + \bar{E}_s \sqrt{1-r_s^2} \exp(i2\pi\sigma\Delta)] [\bar{E}_s r_s + \bar{E}_s \sqrt{1-r_s^2} \exp(i2\pi\sigma\Delta)]^* + [\bar{E}_p r_p + \bar{E}_p \sqrt{1-r_p^2} \exp(i2\pi\sigma\Delta)] (\bar{E}_p r_p + \bar{E}_p \sqrt{1-r_p^2} \exp(i2\pi\sigma\Delta))^* = I_0 + (r_s \sqrt{1-r_s^2} + r_p \sqrt{1-r_p^2}) I_0 \cos(2\pi\sigma\Delta), \quad (12)$$

式中  $\bar{E}_s$ 、 $\bar{E}_p$  为经过分束器后的 s 光复振幅和 p 光复振幅,  $\Delta$  为两束相干光的光程差,  $\bar{E}$  为入射光复振幅。由(12)式计算得干涉条纹中光强最大值为

$$I_{\text{max}} = \bar{E}^2 + (r_s \sqrt{1-r_s^2} + r_p \sqrt{1-r_p^2}) \bar{E}^2. \quad (13)$$

光强最小值为

$$I_{\text{min}} = \bar{E}^2 - (r_s \sqrt{1-r_s^2} + r_p \sqrt{1-r_p^2}) \bar{E}^2. \quad (14)$$

所以,由横向剪切分束的分光比产生的调制

度为

$$K_2 = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{min}} + I_{\text{min}}} = r_s \sqrt{1-r_s^2} + r_p \sqrt{1-r_p^2}. \quad (15)$$

图 5 给出了调制度  $K_2$  随 s 光和 p 光的振幅反射率  $r_s$  和  $r_p$  变化的曲线。在理想分光比情况下,  $r_s=r_p=\sqrt{2}/2$ ,调制度  $K_2$  达到最高。

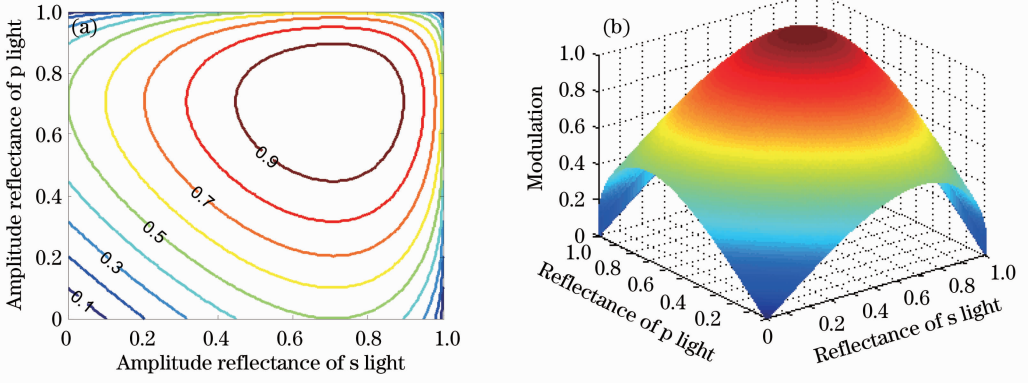


图 5 调制度与横向剪切分束器分束比的关系图

Fig. 5 Schematic diagram of the relation between the splitting ratio of shear beam splitter and modulation

### 3.1.3 艾里斑不完全重叠对干涉条纹调制度的影响

考虑横向剪切分束器理想分光的情况,此时单色光波的干涉条纹调制度主要受到重叠函数  $F$  的影响。物点在像面上的复振幅分布为

$$\bar{E}(x) = \left[ \frac{2J_1(\pi D\sigma x/L)}{\pi D\sigma x/L} \right] \bar{E}_0, \quad (16)$$

式中  $J_1$  为一阶贝塞尔函数,  $x$  为到艾里斑中心的距离,  $\bar{E}_0$  为艾里斑中心的复振幅,  $L$  为艾里斑中心距通光孔径中心的距离, 记  $\pi D\sigma x/L = v$ , 复振幅与  $v$  的关系如图 6(a) 所示。物点  $s$  经过横向剪切分束器后形成的两束光是相干光, 经过成像镜后发生干涉的区域主要在两个艾里斑的重叠区域, 重叠区域内的光强度可以看作是各点光强的叠加, 为

$$I = \iint (\bar{E}_1 + \bar{E}_2)(\bar{E}_1 + \bar{E}_2)^* dx dy = \iint (I_1 + I_2 + \bar{E}_1\bar{E}_2^* + \bar{E}_2\bar{E}_1^*) dx dy, \quad (17)$$

式中  $\bar{E}_1$ 、 $\bar{E}_2$  为两个艾里斑在重叠区域各点的光强,

$I_1$ 、 $I_2$  为对应的光强。则受重叠函数  $F$  影响的干涉条纹调制度为

$$K_3 = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{\left| \iint (\bar{E}_1\bar{E}_2^* + \bar{E}_2\bar{E}_1^*) dx dy \right|}{2I_A}, \quad (18)$$

式中  $I_A$  为每个艾里斑的光强积分, 满足

$$I_A = 2 \iint_0^{2\pi R} \left[ \frac{2J_1(\pi D\sigma \tilde{x}/L)}{\pi D\sigma \tilde{x}/L} \right]^2 dr d\theta,$$

式中  $\tilde{x}$  为到点  $s_1$  的距离。

为保证成像质量, 需要保证 2 个艾里斑之间的距离小于艾里斑的半径, 如图 6(b) 所示, 图中 2 个艾里斑中心为  $s_1$ 、 $s_2$ 。重叠区域内的光强积分满足

$$\left| \iint (\bar{E}_1\bar{E}_2^* + \bar{E}_2\bar{E}_1^*) dx dy \right| = \int_0^{\theta} \int_0^{\sqrt{R^2 - \tilde{d}^2 + 2\tilde{x}\tilde{d}\cos\theta}} Y(\tilde{x}, d) d\tilde{x} d\theta, \quad (19)$$

式中

$$Y(\tilde{x}, d) = \left[ \frac{2J_1(\pi D\sigma \tilde{x}/L)}{\pi D\sigma \tilde{x}/L} + \frac{2J_1(\pi D\sigma \sqrt{\tilde{x}^2 + \tilde{d}^2 - 2\tilde{x}\tilde{d}\cos\theta}/L)}{\pi D\sigma \sqrt{\tilde{x}^2 + \tilde{d}^2 - 2\tilde{x}\tilde{d}\cos\theta}/L} \right]^2, \quad (20)$$

故

$$K_3 = \frac{\int_0^{\theta_0} \int_0^{\sqrt{R^2 - \tilde{d}^2 + 2\tilde{x}\tilde{d}\cos\theta}} \left[ \frac{2J_1(\pi D\sigma \tilde{x}/L)}{\pi D\sigma \tilde{x}/L} + \frac{2J_1(\pi D\sigma \sqrt{\tilde{x}^2 + \tilde{d}^2 - 2\tilde{x}\tilde{d}\cos\theta}/L)}{\pi D\sigma \sqrt{\tilde{x}^2 + \tilde{d}^2 - 2\tilde{x}\tilde{d}\cos\theta}/L} \right]^2 d\tilde{x} d\theta}{2 \iint_0^{2\pi R} \left[ \frac{2J_1(\pi D\sigma \tilde{x}/L)}{\pi D\sigma \tilde{x}/L} \right]^2 dx dy}, \quad (21)$$

式中  $\sqrt{\tilde{x}^2 + \tilde{d}^2 - 2\tilde{x}\tilde{d}\cos\theta}$  为到点  $s_2$  的距离;  $\theta_0$  与中心距、艾里斑半径有关, 表达式为  $\theta_0 = \pi - \arccos(\tilde{d}/2R)$ 。调制度  $K_3$  主要取决于艾里斑半径  $R$  和中心距  $\tilde{d}$  的大小。当探测无穷远目标时,  $K_3 = 1$ ,

获取的干涉条纹调制度最高。随着探测距离的减小, 中心距  $\tilde{d}$  逐渐增加, 调制度  $K_3$  值降低。为增加近场探测时的干涉条纹调制度, 需要选用短焦距镜头、小通光孔径并且提高探测器的灵敏度。

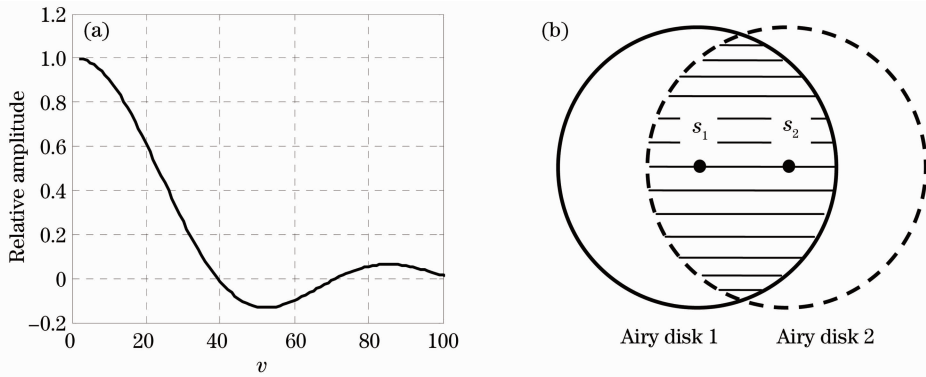


图 6 艾里斑振幅分布和重叠示意图。(a)艾里斑振幅分布;(b)两个艾里斑重叠图

Fig. 6 Schematic diagram of Airy disk amplitude distribution and overlap of two Airy disks. (a) Distribution of Airy disk; (b) overlap of two Airy disks

像面干涉成像系统获取的目标干涉条纹的调制度主要受上述 3 个因素的影响,表达式为

$$K = K_1 K_2 K_3, \quad (22)$$

式中  $K$  为干涉条纹的总调制度。此外像面干涉成像装置获取的干涉信息还受到探测器靶面大小、系统装配误差等因素的影响<sup>[13]</sup>。

### 3.2 干涉条纹调制度对信噪比的影响

噪声是影响复原光谱信息的重要参数,像面干涉成像光谱装置的噪声主要分为两类:1)光信号本身的噪声  $N_p$ , 主要以光子噪声为主;2)与光信号无关的噪声  $N_d$ , 包括量化噪声、仪器噪声等<sup>[14,15]</sup>。像面干涉成像光谱装置的信噪比为

$$R_{SN} = \frac{S}{N_p + N_d}, \quad (23)$$

式中  $S$  为有效光信号。像面干涉成像光谱仪获取的目标干涉信息中包含直流项和余弦调制项,其中直流项不包含光谱信息,因此获取的目标的有效光信息  $S = |I_0 K(\Delta) \cos(2\pi\alpha\Delta)| = I_0 K(\Delta)$ 。代入(19)式得

$$R_{SN}(\Delta) = \frac{I_0 K(\Delta)}{\sqrt{I_0 + N_d}}, \quad (24)$$

式中  $I_0$  为进入像面干涉系统的光强。信噪比主要受干涉条纹调制度的影响;随着调制度下降,有效光信号  $S$  下降,导致信噪比降低。干涉成像光谱装置通过对获取的干涉信息进行傅里叶变换获取目标光谱信息,在这一过程中信号的信噪比不会发生变化。因此干涉信息的信噪比降低会导致复原光谱信息的信噪比减小,影响光谱的复原精度。

有效光信号  $S$  下降也会降低光谱分辨率。由于像面干涉成像光谱装置获取的是宽波段的干涉信息,干涉信息的调制度随着光程差的增大而衰减,当有效光信号的强度小于噪声时,干涉信息将被噪声淹没,影响光谱复原精度。因此在复原光谱信息时

要进行有效的截断,要求最大光程差对应的信噪比满足

$$R_{SN}(\Delta_{max}) \geq 1, \quad (25)$$

即

$$\frac{I_0 K(\Delta_{max})}{\sqrt{I_0 + N_d}} \geq 1. \quad (26)$$

在噪声信号大小一定的情况下,随着干涉条纹调制度的降低,满足(26)式的有效干涉信息长度将变小,会导致光谱分辨率的降低。为提高像面干涉成像光谱装置的光谱复原精度和光谱分辨率,需要提高干涉信息的调制度。

## 4 基于二次成像的像面干涉成像光谱方法

受到光通量和视场角的限制,通过减小成像镜的焦距和通光孔径只能实现几米的目标的干涉成像,要想获取调制度较高的干涉图像,要求探测距离至少在十几米。如果对 2~3 m 甚至 1 m 之内的物体进行成像光谱探测,传统的像面干涉成像光谱装置得到的剪切开的两个目标图像之间距离增大,会影响目标分辨率;同时像面处的干涉条纹调制度降低,甚至消失。为了改善干涉图像中的条纹调制度和成像质量,本文提出了一种基于二次成像的像面干涉成像光谱方法,在现有像面干涉成像光谱装置前加入前置成像物镜和准直物镜,利用二次成像的方法可以获取近距离目标清晰的干涉图像,原理如图 7 所示。

近场目标物点发出的发散光束首先经过前置成像物镜,在其像面上得到目标倒立的清晰实像,该像位于准直物镜的前焦面处。经过准直物镜后,实像物点的扩散光束准直成不同视场角的平行光束并经

过横向剪切分束器, 其中的每条光线被横向剪切成为两条平行光束。两束平行光束经过后置成像物镜后

在其后焦面处的探测器上形成的 2 个艾里斑完全重合, 因此可以在像面处得到清晰的物像和干涉条纹。

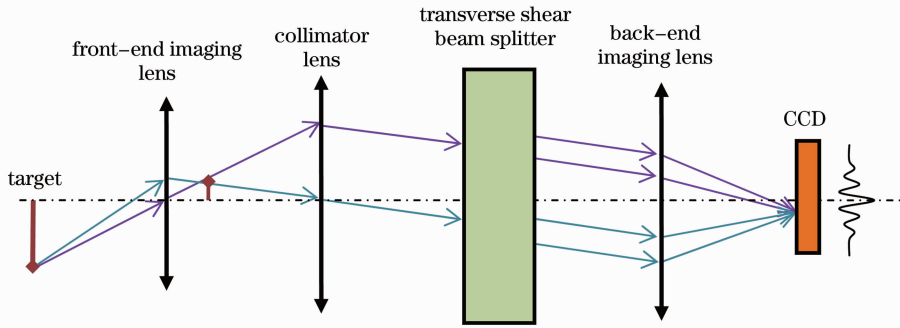


图 7 二次成像的像面干涉光谱成像系统

Fig. 7 Image plane interferometric spectral imaging system based on re-imaging

## 5 实验与分析

### 5.1 实验装置

为验证像面干涉成像光谱技术中成像质量与系统参数的关系, 研究探测距离、系统参数对干涉图像调制度的影响, 搭建了像面干涉成像光谱装置进行实验。实验装置由两部分组成: 横向剪切分束器和成像系统, 如图 8 所示。横向剪切分束器采用分离式 Sagnac 结构, 由两片高反镜和一片半透半反镜组成, 横向剪切量可以通过装载高反镜的二维调整架来调节。成像系统由成像镜和探测器组成。实验装置的光谱探测范围是 450~750 nm。通过横向剪切分束器的推扫获取探测目标的一系列干涉图像。与传统的整体推扫相比, 该方法获取的干涉图序列在提取物点干涉信息时不需要图像匹配, 数据处理量小; 而且光谱复原精度受成像系统的渐晕影响较小, 可以使用小通光孔径进行成像探测。

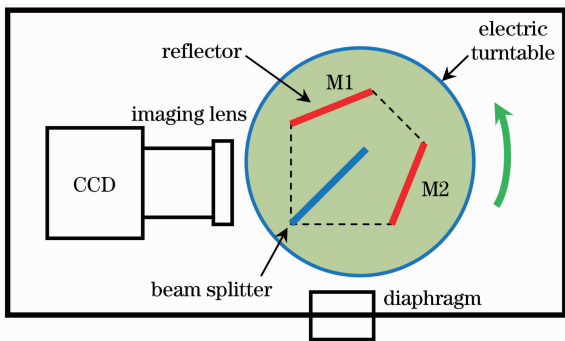


图 8 实验装置结构图

Fig. 8 Schematic diagram of experimental device

### 5.2 近场实验与分析

实验装置中横向剪切分束器的剪切量为 0.5 mm, 采用 85 mm 焦距镜头进行探测, 根据(9)式计算得到最

小探测距离与系统通光孔径之间的关系曲线如图 9 所示。

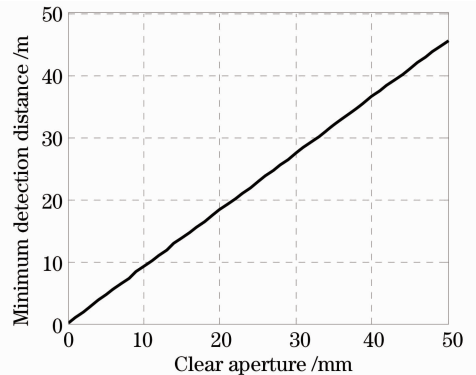


图 9 最小探测距离与系统通光孔径的关系

Fig. 9 Relationship between minimum detection distance and clear aperture

为验证探测距离对干涉条纹调制度的影响, 选用 85 mm 焦距镜头对同一目标进行不同距离的探测。实验中采用普通的荧光灯管照明, 固定成像镜光圈为  $F5.6$ , 图 10 中给出了同一个目标在不同探测距离下的四幅干涉图像; 随着探测距离的增加, 同一目标场景的视场角变小, 所占的像素数变少, 所以放大成同一比例后干涉条纹越来越粗, 且像素数变少。图 10(a) 对应的探测距离为 5 m, 图 10(b) 为 7 m, 图 10(c) 为 10 m, 图 10(d) 为 13 m; 随着探测距离的增加, 干涉条纹调制度越来越高, 探测距离与实验获取的干涉条纹的最大调制度的关系曲线如图 12(a) 所示。

干涉条纹的调制度除了受探测距离影响外, 还受到系统通光孔径的影响。利用搭建的实验装置对 6 m 外的目标进行成像光谱探测, 通过调节焦距为 85 mm 的成像镜的光圈来控制系统的通光孔径。

得到的干涉图像如图 11 所示,图 11(a)对应的光圈为  $F2.8$ ,图 11(b)对应的光圈为  $F5.6$ ,图 11(c)对应的光圈为  $F8$ ,图 11(d)对应的光圈为  $F16$ 。随着

光圈数变大,成像系统的通光孔径减小,干涉条纹调制度越来越高,通光孔径与干涉条纹的最大调制度的关系曲线如图 12(b)所示。

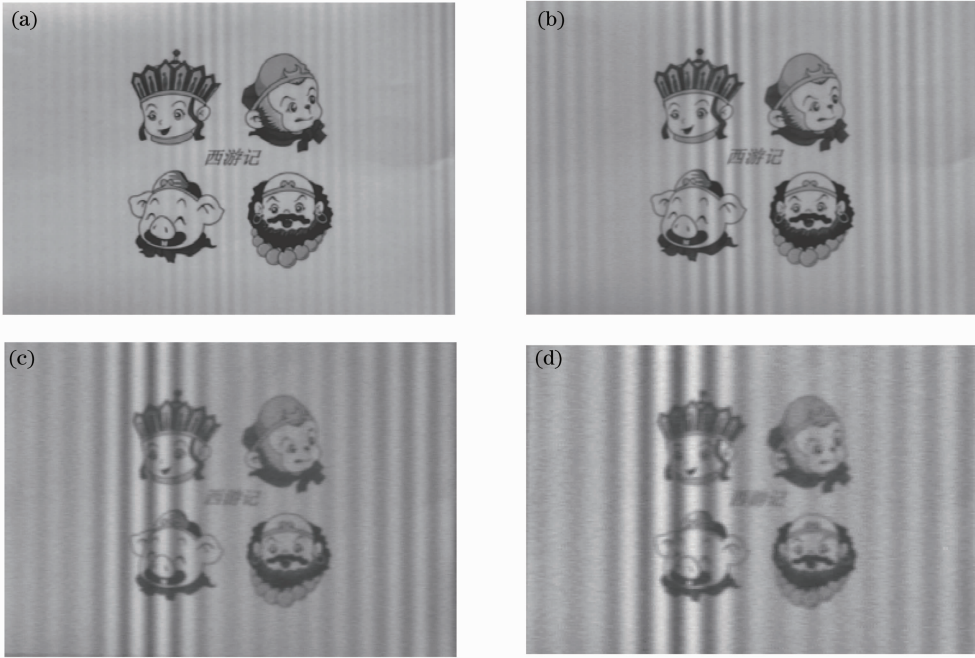


图 10 同一目标在不同距离的干涉图像

Fig. 10 Interferograms of the same target with different distances

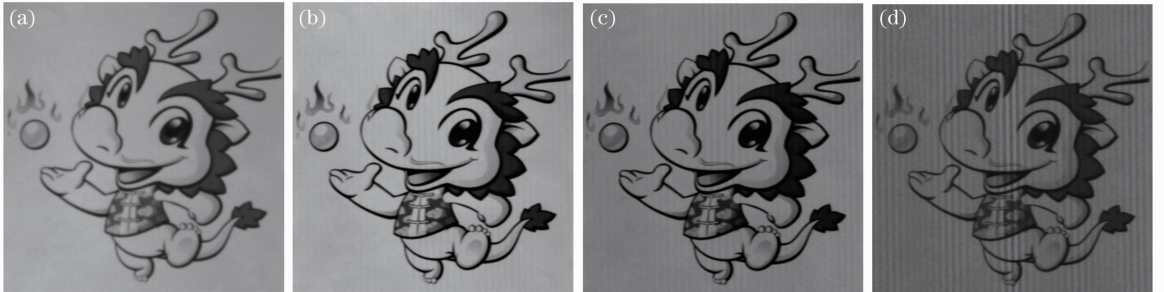


图 11 同一目标在不同通光孔径的干涉图像

Fig. 11 Interferograms of the same target with different clear apertures

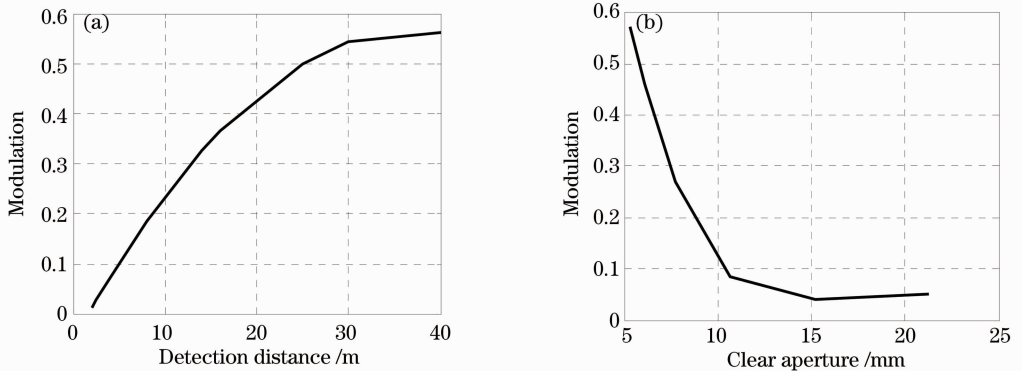


图 12 调制度与探测距离和通光孔径的关系。(a)调制度与探测距离的关系;(b)调制度与通光孔径的关系  
Fig. 12 Dependences of modulation on detection distance and clear aperture. (a) Relationship between modulation and detection distance; (b) relationship between modulation and clear aperture



随着探测距离的增加和通光孔径的减小,像面干涉成像光谱装置获取的干涉条纹的调制度逐渐提高。但是入射光通量会减少,影响系统的信噪比,并且可能出现比较明显的渐晕。在近距离目标探测时要选取合适的探测系统参数。

### 5.3 基于二次成像的像面干涉成像光谱实验与分析

在搭建的像面干涉成像光谱装置前面加入前置成像物镜和准直物镜,组成基于二次成像的像面干涉成像光谱装置,对近场目标进行探测,获取的干涉图像如图 13 所示。

图 13(a)对应的探测距离为 1.5 m,干涉条纹最大

调制度为 0.585;图 13(b)对应的探测距离为 0.8 m,干涉条纹最大调制度为 0.5634,图中干涉条纹清晰可见,调制度较高。与图 10 和图 11 中获取的 5 m 之内干涉图像相比,干涉条纹调制度有了显著的提高。图 13(c)为猪肉纤维的干涉图像,图中猪肉纤维的宽度为 150  $\mu\text{m}$ 左右;图 13(d)为 1000 m 外场景的干涉图像。采用二次成像的方法进行近距离目标像面干涉成像光谱探测,能够克服现有的像面干涉成像光谱技术进行近场探测时存在的目标分辨率低、干涉条纹调制度低等优点,并且也能够对远距离目标和显微目标进行干涉成像光谱探测。



图 13 基于二次成像的像面干涉成像光谱装置获取的干涉图像

Fig. 13 Interferograms using image plane interferometric spectral imaging system based on re-imaging

## 6 结 论

像面干涉成像光谱技术具有高光通量、高目标分辨率、高光谱分辨率等优点,主要应用于航空航天遥感领域,将其用于近场成像光谱探测是一个需要研究的问题。以近场物点发出的光以发散形式进入探测系统为前提,结合衍射受限成像理论,对近场像面干涉成像进行了理论分析,推导了光程差的计算公式。研究了干涉条纹调制度的影响因素,分析了干涉条纹调制度对信噪比和复原光谱信息的影响。随着干涉条纹调制度的降低,系统信噪比逐渐降低,会使光谱复原精度下降,并降低光谱分辨率。为获取近距离目标的高调制度干涉图像,提出了基于二

次成像的像面干涉成像光谱方法,在现有像面干涉成像装置前加入成像物镜和中继镜头,使得近场目标物点发出的光以平行光的形式通过横向剪切光束器,能够获取近场目标清晰的干涉图像。搭建了像面干涉成像光谱实验装置,对近场目标进行了探测,对获取的干涉图像的条纹调制度进行了实验分析;加入前置镜头和中继镜头组成基于二次成像的像面干涉成像实验装置,对近场目标进行了探测,得到了调制度较高的干涉图像,表明本文所提出的基于二次成像的像面干涉成像光谱技术能够对近场目标进行有效的探测。

## 参 考 文 献

- 1 J. B. Breckinridge. Evolution of imaging spectrometry: past, present and future[C]. *SPIE*, 1996, **2819**: 121~132
- 2 R. F. Horton. Optical design for a high étendue imaging Fourier transform spectrometer[C]. *SPIE*, 1996, **2819**: 300~315
- 3 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
- 4 Dong Ying, Xiangli Bin, Zhao Baochang. Lateral shearing interferometer in large aperture static imaging spectrometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(11): 991~995  
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 A. Barduccia, V. D. Cosmob, P. Marcoionnic *et al.*. ALISEO: a new stationary imaging interferometer[C]. *SPIE*, 2004, **5546**: 262~270
- 6 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**(2): 192~197  
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**(2): 192~197
- 7 Y. Ferrec, J. Taboury, H. Sauer *et al.*. Optimal geometry for Sagnac and Michelson interferometers used as spectral imagers [J]. *Opt. Eng.*, 2006, **45**(11): 115601
- 8 R. G. Sellar, G. D. Boreman. Limiting aspect ratios of Sagnac interferometers[J]. *Opt. Eng.*, 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, **7086**: 70860K
- 11 M. Born, E. Wolf. Principles of Optics [M]. Yang Jiasun Transl.. Beijing: Science Press, 2009. 411~415  
玻 恩, 沃尔夫. 光学原理[M]. 杨葭孙译. 北京:科学出版社, 2009. 411~415
- 12 Li Suning. Research and Application on Fourier Transform Interference Imaging Spectroscopy [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2011. 17~18  
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, 2011. 17~18
- 13 Tao Ran, Xiangli Bin, Du Shusong *et al.*. The analysis of the high étendue imaging Fourier transform spectrometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(5): 675~679  
陶 然, 相里斌, 杜述松 等. 高通量傅里叶变换成像光谱仪调制度分析[J]. *光子学报*, 2006, **35**(5): 675~679
- 14 Chen Qi, Yang Jianfeng, Qiao Weidong *et al.*. Analysis for signal-to-noise ratio of large aperture static imaging spectroscopy [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(10): 1889~1892  
陈 琦, 杨建峰, 乔卫东 等. 大孔径静态干涉成像光谱仪的信噪比分析[J]. *光子学报*, 2007, **36**(10): 1889~1892
- 15 A. Barducci, D. Guzzi, C. Lastri *et al.*. Theoretical aspects of Fourier transform spectrometry and common path triangular interferometers[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(11): 11622~11649

栏目编辑: 李文喆