

## 基于分体式 Sagnac 干涉仪的长波红外干涉成像光谱系统

孟合民, 高教波, 郑雅卫, 张磊, 范喆, 骆延令, 李明伟

(西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 介绍了基于分体式 Sagnac 干涉仪的静态高通量干涉成像光谱技术的基本原理, 设计并实现了长波红外宽波段“等比消偏振”分光膜系, 给出了干涉仪尺寸的设计方法并利用 TracePro 软件验证了设计的干涉光路。使用制冷型和非制冷型探测器对该红外干涉成像光谱仪方案进行了塑料薄膜透过率测试, 实验结果与高精度 Michelson 光谱仪测量值有较高的吻合度, 证实了该方案的正确性。最后进行了推扫实验, 给出了数据重排、基线校正和“切趾”等数据预处理方法, 验证了该系统方案工作模式的可行性。

**关键词:** 成像光谱; Sagnac 干涉仪; 长波红外; 等比消偏振分光

**中图分类号:** TN744.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)01-0019-07

## Long-wave infrared interferential imaging spectroscopy system based on split-type Sagnac interferometer

Meng Hemin, Gao Jiaobo, Zheng Yawei, Zhang Lei, Fan Zhe, Luo Yanling, Li Mingwei

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** Based on split-type Sagnac interferometer, principles of static high-flux interferential imaging spectroscopy were introduced. Equal-ratio depolarizing beam-splitting films working in long-wave infrared were designed and achieved. Design methods of interferometer sizes were given, and interferential light path was verified through TracePro software. By utilizing cryogenic and noncryogenic detectors, the project of infrared interferometer imaging spectrometer was tested with a plastic film transmittance. Measured values from the test turned out to be highly matching with those of high precise Michelson spectrometer, which verified the accuracy of that project. In the end, methods about data rearrangement, baseline correction and apodization were given to preprocess data from push-broom experiment. The results, in turn, verified the feasibility of that systematic working mode.

**Key words:** imaging spectroscopy; Sagnac interferometer; long-wave infrared; equal-ratio depolarizing beam-split

收稿日期: 2013-05-11; 修订日期: 2013-06-13

基金项目: 西安应用光学研究所创新基金(MY11-06-03)

作者简介: 孟合民(1988-), 男, 助理工程师, 主要从事红外干涉成像光谱技术方面的研究。Email: menghemin@126.com

## 0 引言

不同物质成分在一定的环境条件下都有自己独特的“光谱指纹”,为分析识别目标的属性提供了依据。成像光谱技术由于其获取光谱和图像组成的“数据立方体”的能力,具有极高应用价值。在军事上,成像光谱技术相对于传统的照相侦察技术能有效识别伪装目标的类型,无论是隐藏在树林中的坦克、车辆,还是埋在土下的地雷以及水下航行的潜艇,都会因为自身的热辐射以及对周围环境的影响而造成光谱特征的异常。在民用方面,成像光谱技术可用于大气和水等污染状况的监测、矿物资源探测及农作物灾害预警等方面<sup>[1]</sup>。

对于长波红外波段的成像光谱探测,由于常温目标与背景温差较小,为获得较高的光通量和信噪比,应采用无狭缝的高通量干涉系统。目前较为成熟的应用是 2002 年美国 Telops 公司研制的基于动镜的时间调制型干涉成像光谱仪 FIRST,工作波段 8~11  $\mu\text{m}$ ,分辨率 2~32  $\text{cm}^{-1}$  可调。该成像光谱仪中,动镜的存在使得结构复杂,且对冲击、震动敏感。而 Sagnac 干涉仪是基于三角共光路原理,具有较高的抗干扰性。Sagnac 干涉仪的多种形式<sup>[2]</sup>,考虑到红外胶透过率很低,红外光学材料昂贵,应尽量避免需要胶合的方案和实体型方案,因此采用由两片反射镜和一片分光镜组成的分体式干涉仪方案。

文中的研究中,使用镀膜的 ZnSe 材料作为分光镜制作了分体式 Sagnac 干涉仪,使用制冷型探测器和非制冷探测器进行的塑料薄膜光谱透过率静态测试、使用非制冷探测器进行了推扫实验。

## 1 Sagnac 干涉成像光谱原理

基于分体式 Sagnac 干涉仪的静态高通量干涉成像光谱系统,属于时空混合调制型,光学系统如图 1 所示。两面反射镜与分光面成相同角度,其中一面反射镜相对于对称位置沿分光面方向有错位量  $\Delta$ 。入射光被“半透半反”分光膜分成透射光和反射光两束,并相反的方向经过三角形光路,最后以相同角度和一定的错位(即横向剪切量  $d$ )投射在出射端面上。在出射端面放置成像系统,探测器焦平面阵列(FPA)在成像物镜的后焦面上,由于两束平行光在出

射端面处是等光程的,而后置成像系统在光线的垂面上是等光程的,两者不重合,因此这两束平行光将以一定的光程差  $\delta$  会聚在 FPA 的同一位置并发生干涉。

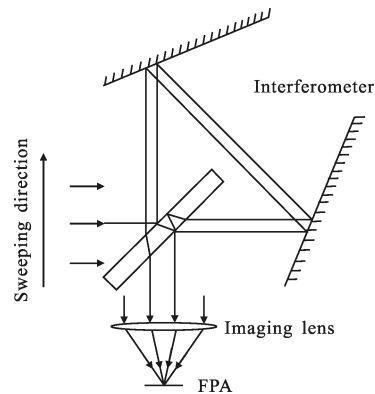


图 1 分体式 Sagnac 静态高通量干涉成像光谱系统

Fig.1 Static high-flux interferential imaging spectroscopy system based on a split-type Sagnac interferometer

当干涉仪相对目标平移或转动时,同一目标发出的光以不同角度入射到干涉仪,被干涉仪分成的两束光在探测器上的光程差  $\delta$  也随之变化。在不同时刻,FPA 上不同点得到这一目标随光程差变化的干涉结果。将 FPA 在不同时刻记录的同一目标的像进行抽取、重排,得到这一目标的干涉条纹,进而根据傅里叶光学原理反演出目标的辐射光谱。

复色光产生的干涉图方程<sup>[3]</sup>为:

$$I(\delta) = \int_{\nu_1}^{\nu_2} B(\nu) \cos(2\pi\nu\delta) d\nu \quad (1)$$

复色光的光谱由下式得到:

$$B(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} I(\delta) \cos(2\pi\nu\delta) d\delta \quad (2)$$

式中: $I(\delta)$ 是光强随光程差  $\delta$  的分布; $B(\nu)$ 表示频率为  $\nu$  的单色光强。

## 2 等比消偏振分光膜系

### 2.1 干涉效率分析

对于三角共光路的 Sagnac 干涉仪所分出的两束光,一束被分光面两次透射,一束被两次反射。 $p$  分量和  $s$  分量经“半透半反”分光面后分别变为  $I_p'$ 、 $I_p''$  和  $I_s'$ 、 $I_s''$ ,这四个分量在 FPA 上会聚时,偏振方向相同的分量才能发生干涉,那么  $p$  分量、 $s$  分量和总干涉效率计算如下:

$$\begin{cases} \eta_p = \min(I_p', I_p'') = \min(R_p R_p, T_p T_p) \\ \eta_s = \min(I_s', I_s'') = \min(R_s R_s, T_s T_s) \\ \eta = \eta_p + \eta_s \end{cases} \quad (3)$$

当光学薄膜等比消偏振分光时,入射光束的  $p$  分量和  $s$  分量分光比均为 1,  $\eta=0.5$ 。

## 2.2 分光膜系设计

薄膜分光很难实现完全消偏振,尤其是在较宽波段内。笔者设计了长波红外波段的等比消偏振分光膜系,其中  $\alpha=45^\circ$ ,  $\lambda=8\sim 12\ \mu\text{m}$ ,  $p$  方向和  $s$  方向典型波段的干涉效率计算如表 1 所示。

表 1 分光膜系的干涉效率

Tab.1 Interferential efficiency of beam-splitting coating

$\lambda/\mu\text{m}$	$R_p$	$T_p$	$R_s$	$T_s$	$\eta$
8	48.75	50.29	48.03	51.20	0.468
10	49.65	50.13	50.41	49.37	0.490
12	47.37	52.46	50.80	49.21	0.467

根据上述技术要求,选用硬度和强度较高,吸收率较低的 ZnSe、Ge、YbF<sub>3</sub> 和 ZnSe 四种镀膜材料,在解决了膜层材料之间的应力匹配的同时解决薄膜消偏振折射率匹配问题,还保证了红外膜层的强度、牢固度。经过不断的设计与分析,最终膜系定为:ZnSe/0.288 7 H 0.393 6 L 0.617 5 H 1.144 6 L 1.077 2 H 0.2 M 1.264 4 B 0.009 7 M/Air。其中,H 为 Ge,L 为 ZnSe,M 为 ZnS。

该分光膜系的理论偏振光谱透过率如图 2 所示。

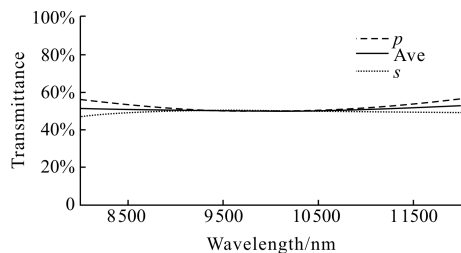


图 2 分光膜系的理论偏振光谱透过率

Fig.2 Theoretical polarized spectral transmittance of the beam-splitting coating

为进一步验证该分光膜系的干涉效率,采用 ZnSe 基底制作了镀制该膜系的分光镜,测量其实际偏振光谱透过率如图 3 所示。

从图 3 可以看出,在  $8\sim 12\ \mu\text{m}$  的偏振度小于 5%,分光比在大部分区间优于 0.8,基本满足红外干涉成像光谱系统对宽波段内等比消偏振分光的需求。

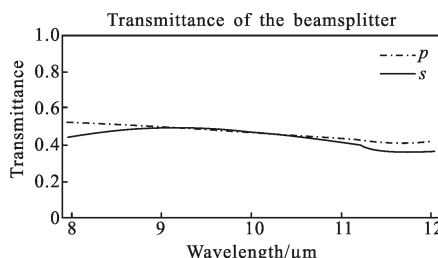


图 3 分光膜系的实际偏振光谱透过率

Fig.3 Measured polarized spectral transmittance of beam-splitting coating

## 3 干涉光路设计

### 3.1 干涉仪的几何尺寸

在前期的研究中,笔者详细分析了光谱分辨率和最小可分辨波长指标对横向剪切量  $d$  的要求,以及分体式 Sagnac 干涉仪横向剪切量的三部分组成:反射镜的非对称布置、分光镜的偏折作用和分光镜的折射附加光程差<sup>[4]</sup>。

分光镜偏折作用产生的横向剪切量为:

$$d_2 = t \left[ (\tan\theta_3 - \tan\theta_1) \frac{\cos\theta_3}{\cos\theta} - (\tan\theta_2 - \tan\theta_1) \frac{\cos\theta_1}{\cos\theta} \right] \quad (4)$$

式中: $t$  为分光镜厚度; $\theta$  为入射光线与光轴夹角; $\theta_1$  和  $\theta_3$  为透射光相对于分光镜的两次入射角; $\theta_2$  和  $\theta_4$  是对应的折射角; $\theta_3$  和  $\theta_4$  分别为反射光的入射角和折射角。

透射光和反射光在分光镜中的折射光程不同,会产生附加光程差,可将其折算成等效横向剪切量,表示为:

$$d_3 = \frac{-\Delta l}{\sin\theta} = \frac{nt}{\sin\theta} \left( \frac{1}{\cos\theta_2} - \frac{1}{\cos\theta_4} \right) - \frac{t}{\sqrt{2} \sin\theta \cos\theta} \cdot (\tan\theta_2 - \tan\theta_4) \quad (5)$$

当出射光线相对入射时偏转  $90^\circ$  时,反射镜的非对称布置产生的横向剪切量为:

$$d_1 = (2 - \sqrt{2}) \Delta \quad (6)$$

分光镜材料和厚度确定后,就已知  $d_2$  和  $d_3$  了,可根据总横向剪切量  $d$  求得  $d_1$  和  $\Delta$ 。假设分光镜厚度为零,将干涉光路展开,如图 4 所示。根据成像物

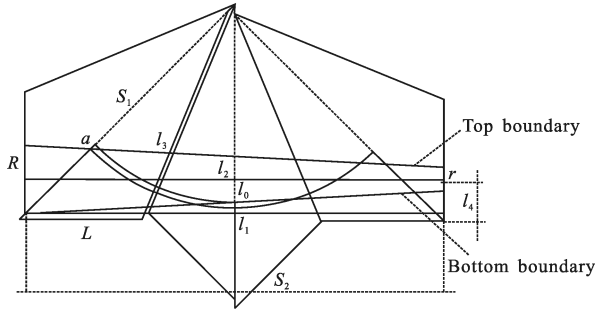


图 4 光路展开

Fig.4 Optical path expansion

$$L = \frac{r + \sqrt{2} a(1 + \tan\theta) + \left(\frac{\sqrt{2}}{2} - \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \tan\theta\right)(1 + \tan\theta)\Delta}{(\sqrt{2} + 1)\left(\frac{\sqrt{2}}{2} - \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \tan\theta\right)(1 + \tan\theta) - (4 + 2\sqrt{2})\tan\theta} \quad (7)$$

$$R = r + (4 + 2\sqrt{2})L\tan\theta \quad (8)$$

$$l_1 = (S_2 - \Delta) - S_3 = \left(1 - \frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \tan\theta\right) \cdot [( \sqrt{2} + 1)L - \Delta] - a \quad (9)$$

$$l_2 = \left(1 - \frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \tan\theta\right)\Delta + \frac{R+r}{2} + 2a \quad (10)$$

$$l_4 = \frac{R}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2}\Delta \quad (11)$$

$$h = D + (4 + 2\sqrt{2})L\tan\omega + 2a \quad (12)$$

### 3.2 光路追迹

根据成像光谱仪光谱分辨率  $11 \text{ cm}^{-1}$  的指标要求, 利用 3.1 节中各公式设计出横向剪切量  $d$  为  $18.6 \text{ mm}$  的干涉仪。利用 TracePro 软件对设计的干涉仪进行光路追迹, 验证横向剪切量  $d$  是否准确以及分光区与增透区是否分离。结果如图 5 和图 6 所示。

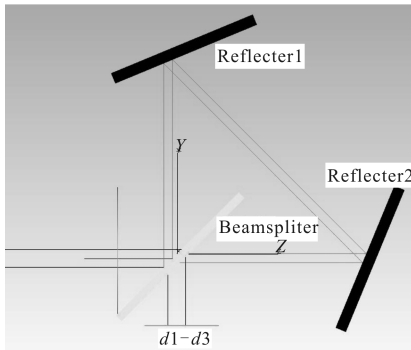


图 5 光线追迹验证横向剪切量

Fig.5 Verification of lateral shearing by ray tracing

图 5 显示, 光线在出射面上投影位置间距与设计结果一致, 说明横向剪切量的计算是正确的。值得

镜口径、视场角及分光面分光区和增透区的分离限制计算干涉仪的最小几何尺寸<sup>[5]</sup>。

图 4 中,  $r$  为成像物镜口径,  $\theta$  为横向半视场角,  $\omega$  为纵向半视场角,  $R$  为光阑横向尺寸,  $L$  为干涉仪端面横向尺寸,  $l_1$  为分光区横向尺寸,  $l_2$  为增透区横向尺寸,  $l_4$  为出口中心与端面下侧距离,  $h$  为各部件纵向尺寸,  $a$  为安全余量。

在分光面上分光区和增透区分离的条件下, 根据展开光路中的几何关系, 得到干涉仪的尺寸参数如下:

注意的是, 这里直观显示的横向剪切量叠加了折射附加光程差等效的横向剪切量。图 6 显示, 在设计要求的视场角和成像物镜口径条件下, 分光镜所在平面上的分光区和增透区没有重叠, 光阑、分光镜的尺寸也有较小的余量, 说明干涉仪的设计满足系统指标要求。

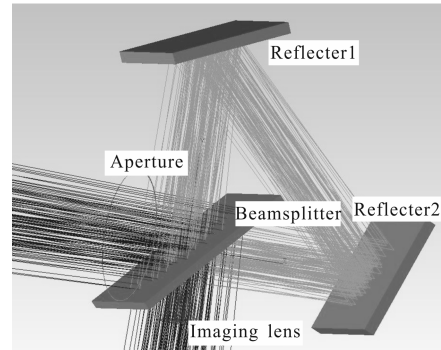


图 6 光线追迹验证分光区

Fig.6 Verification of beam-splitting area by ray tracing

## 4 实验及分析

### 4.1 薄膜透过率实验

在前期研究<sup>[4]</sup>中, 根据上述红外高通量干涉成像光谱仪的设计方案, 使用制冷热型像仪 SC7300L (成像物镜  $f=120 \text{ mm}$ ,  $F/2$ )、面源黑体、分光镜、反射镜和 PC 机等搭建了实验装置, 如图 7 所示。将充满视场的面源黑体作为稳定、均匀的光源, 这样干涉仪不需要相对光源进行“推扫”和图像重排, 而将 FPA 上不同位置的光强看作同一物点以不同光程差干涉成像得到的, 可以直接对干涉条纹进行傅里叶变换反演出光源的光谱分布。黑体温度设置为  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ , 将均匀

的薄膜样品置于黑体前,可以测量样品的光谱透过率。之后,又使用非制冷型热像仪 TCC-LW2 进行了类似的实验并比较了两者的结果。该实验也可作为初步的光谱标定:由于装调误差的存在,成像光谱仪的采样步长与设计值可能会有微小偏差,在对整个光学系统进行非均匀性校正后,调整光谱反演计算时的采样步长参数使光谱曲线的“峰谷”与薄膜的透过率“峰谷”吻合。由于干涉成像光谱仪的光谱数据是按波数均匀分布的,确定采样步长的准确值即初步实现了光谱标定。

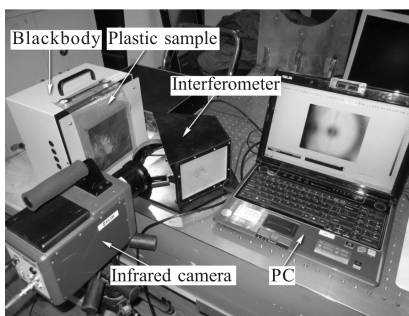


图 7 使用制冷型热像仪的实验装置  
Fig.7 Experiment setup used cryogenic IR camera

使用一片在长波红外波段有特定吸收峰的有机塑料薄膜,验证该装置复原光谱的准确性<sup>[6]</sup>。反演光谱的理论光谱分辨率为  $11\text{ cm}^{-1}$ , 试验结果还与分辨率为  $0.48\text{ cm}^{-1}$  的 Michelson 光谱仪的测量结果进行了比较,如图 8 和图 9 所示。

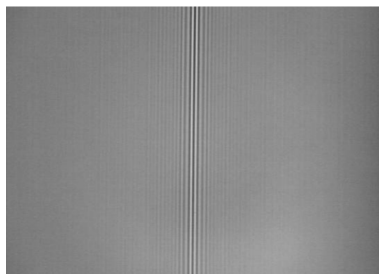
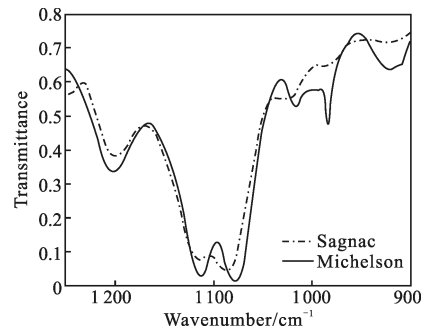


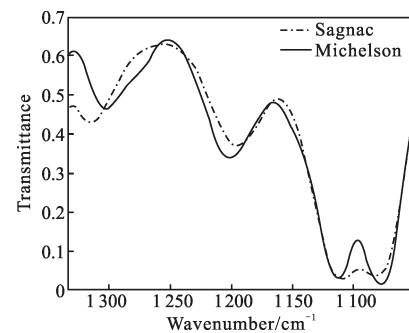
图 8 非制冷热像仪的干涉图像  
Fig.8 Interferogram acquired by noncryogenic IR camera

由图 9 可知,利用黑体进行的薄膜光谱透过率测试中,制冷型和非制冷性探测器采集的干涉图像都能反演出准确的光谱,与 Michelson 光谱仪的结果基本吻合。成像光谱仪的光谱分辨率相对较低,不能分辨较窄的“峰谷”细节。在探测器响应波段的边缘,由于信号变弱,误差增大。实验结果验证了该长波红

外干涉成像光谱系统的原理和可行性。



(a) 非制冷  
(a) Noncryogenic



(b) 制冷  
(b) Cryogenic

图 9 样品光谱透过率测试结果

Fig.9 Experiment result of the spectrum transmittance of a plastic sample

#### 4.2 推扫实验

为验证该干涉成像光谱系统在实际工作时的性能,将非制冷热像仪(成像物镜  $f=120\text{mm}$ ,  $F\#2$ )和干涉仪固定在一起,并放置在转台上进行推扫实验,结构如图 10 所示。

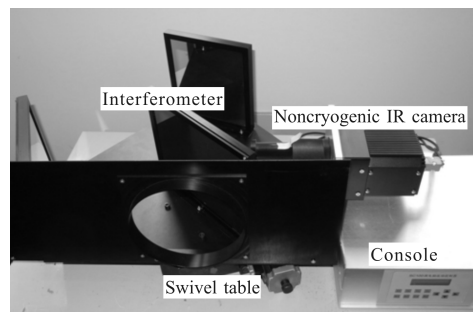


图 10 推扫实验装置

Fig.10 Setup of push-broom experiment

对于时空混合调制型干涉成像光谱仪,干涉条纹是叠加在二维图像上的,如图 11 所示。推扫中各

帧图像上的同一像素点是不同物点以相同光程差干涉的强度分布,光程差在行方向上等间隔分布。



图 11 推扫实验干涉图像

Fig.11 Interferogram of push-broom experiment

干涉数据像经“预处理”后反演出像素位置处的光谱,其中天空处光谱如图 12 所示。可以看出在  $1050\text{ cm}^{-1}$  处附近的“谷”,这与大气光谱透过率曲线中  $\text{CO}_2(9.4\text{ }\mu\text{m})$ 和  $\text{O}_3(9.6\text{ }\mu\text{m})$ 吸收峰位置照应。

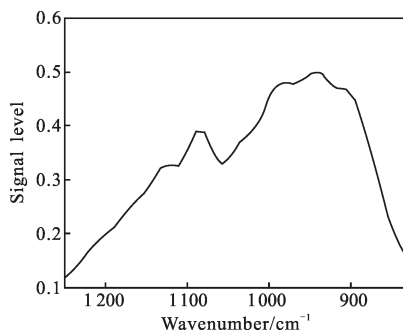


图 12 天空的光谱

Fig.12 Spectra of the sky

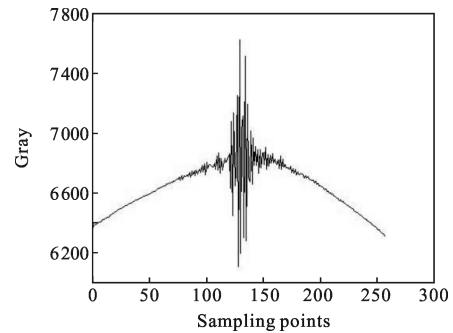
#### 4.3 数据预处理

(1) 数据重排:推扫时,成像光谱系统在一帧的时间里相对于目标转过一个瞬时视场角(IFOV)。为获得各物点的干涉光强分布,需要提取该点在各帧图像的不同像元上的干涉强度,并按照光程差顺序重新排列。数据重排前后分别如图 11 和图 8 所示。

(2) 基线校正:光谱反演是对干涉强度的交流分量进行,变换前要先减去直流分量。另外,“渐晕”也使干涉强度的基线随光程差的增大而向下弯曲,阻碍了准确光谱的获得。因此在光谱反变换前必须进行“基线校正”处理。基线校正前后的干涉强度如图 13 所示。

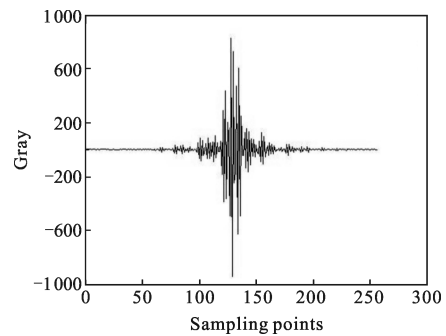
多项式拟合是最常用的基线校正方法,将每个光程差位置点的光强对称叠加前后若干个点的

强,其均值作为该点的“准基线位置”,再将这些准基线位置进行高阶多项式拟合作为基线。该方法较为直观,但运算繁琐,叠加左右点的个数及多项式阶数的不同选择会造成基线的偏移。



(a) 基线校正前

(a) Before baseline correction



(b) 基线校正后

(b) After baseline correction

图 13 基线校正过程

Fig.13 Process of baseline correction

此外,还可以用微分函数进行基线校正。根据傅里叶变换的微分性质,如果有:

$$\begin{cases} x(t) \rightarrow X(\omega) \\ \frac{dx(t)}{dt} \rightarrow j\omega X(\omega) \end{cases} \quad (13)$$

即时域(空域)信号微分,频域信号乘以自身频率。因此将干涉条纹强度在空域微分后作傅里叶变换,得到的光谱需要再除以各自频率位置  $\omega$  即得到原始信号的光谱。在数字信号的处理中,微分实际是一个差分过程,微分的结果比原始信号少一个数据点。

(3) 切趾:公式(2)傅里叶光谱变换的空域积分上、下限是无穷大,即要求干涉仪产生的光程差无限长,而实际干涉图的最大光程差受到限制,即被一个矩形“窗函数”截断。为减轻矩形窗函数造成的“光谱泄漏”,这种效应需要对干涉条纹强度进行“切趾”处理,选择函数值由中心向两边逐渐变小的窗函数,缓

和在干涉条纹两端的突变。常用的切趾窗函数有三角窗、高斯窗和汉宁窗等。

## 5 结 论

分光膜系的测量结果表明:所涉及的长波红外宽波段等比消偏振分光膜基本满足要求,光路追迹证明了干涉仪尺寸的设计方法。

使用制冷型和非制冷型探测器对该红外干涉成像光谱仪方案进行的塑料薄膜透过率测试结果与高精度 Michelson 光谱仪的有较高的吻合度,证实了该方案的正确性。

推扫实验验证基于分体式 Sagnac 干涉仪的无狭缝干涉成像光谱系统的高光通量优势,结果表明使用非制冷探测器的长波红外干涉成像光谱系统探测常温目标是可行的。在改进分光膜系和成像物镜  $F$  数,以及非制冷探测器性能提高的条件下,可以期望更高光谱分辨率和信噪比的长波红外干涉成像光谱仪。

### 参 考 文 献:

- [1] Zhang Chunmin. Interferential Imaging Spectroscopy [M]. Beijing: Science Press, 2010: 4-5. (in Chinese)
- [2] Yang Jianfeng, Ruan Ping, Xiangli Bin, et al. Large aperture static imaging spectroscopy (LASIS)[C]//SPIE, 2003, 4897: 318-324.
- [3] Xie Jinghui, Liao Ningfang, Cao Liangcai. Fundamentals of Fourier Optics and Contemporary Optics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2007: 320-327. (in Chinese)  
谢敬辉, 廖宁放, 曹良才. 傅里叶光学与现代光学基础 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2007: 320-327.
- [4] Meng Hemin, Gao Jiabo, Xiao Xiangguo, et al. Design and validation of infrared interferential imaging spectrometer with high flux [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(11): 2903-2908. (in Chinese)  
孟合民, 高教波, 肖相国, 等. 红外高通量干涉成像光谱仪的设计与验证[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(11): 2903-2908.
- [5] Zhao Baochang, Yang Jianfeng, Xue Bin, et al. Design of solid sagnac interferometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(3): 474-478. (in Chinese)  
赵葆常, 杨建峰, 薛彬, 等. 实体 Sagnac 干涉仪的设计[J]. 光子学报, 2009, 38(3): 474-478.
- [6] Bergstrom D, Renhorn I, Svensson T, et al. Noise properties of a corner-cube Michelson interferometer LWIR hyperspectral imager[C]//SPIE, 2010, 7660: 76602F-1-76602F-8.