

转镜式高灵敏度干涉光谱成像仪 ROSI

袁 艳 相里斌

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

摘 要 转镜式高灵敏度干涉光谱成像仪(ROSI)是一种新型傅里叶变换光谱成像仪,采用了基于 Sagnac 横向剪切干涉仪的精密转镜扫描机构,通过旋转 Sagnac 干涉仪的一个反射面,得到被探测目标的空间与光谱信息. ROSI 具有共光路、无狭缝、实时性好等特点,因此具有较高的系统稳定性和探测灵敏度并可凝视成像. 通过与现有的多种高灵敏度干涉光谱成像仪的比较,表明 ROSI 克服了现有技术中存在的主要缺陷.

关键词 光谱成像仪; 傅里叶变换; 高通量; 转镜

中图分类号 TH744 **文献标识码** A

0 引言

光谱成像技术是光学探测技术的一个新的发展,光谱成像仪同时具备成像仪和光谱仪的功能,能够同时获得目标的两维或三维空间信息以及目标可分辨单元的光谱信息.

较早出现的光谱成像仪大多基于色散棱镜或衍射光栅,具有原理简单、性能稳定的优点,但探测灵敏度低的弱点阻碍着它们的进一步发展,对高灵敏度探测器的依赖和对光学系统的苛刻要求成为此类技术的瓶颈.

在光谱成像仪的发展过程中,出现了干涉光谱成像仪. 经典的干涉光谱成像仪基于 Michelson 干涉仪^[1],光路中没有狭缝限制,其能量利用率大约比色散型成像光谱仪高两个数量级^[2]. 这种光谱成像仪被称作时间调制干涉光谱成像仪,由于对精密动镜系统运动过程中镜面的倾斜或横移等具有很高的要求^[3,4],使系统的稳定度大大降低.

为了回避精密动镜系统稳定性的难题,人们又提出了空间调制干涉光谱成像仪^[5~7],这种光谱成像仪的光路中也设置狭缝,其探测灵敏度不高,但与色散型光谱成像仪相比,由于其狭缝的宽度与光谱分辨率无关,因此,在空间分辨率不高的应用条件下,空间调制干涉光谱成像仪也具有较高的灵敏度.

本文提出转镜式高灵敏度干涉光谱成像仪 ROSI,采用转镜代替直线运动或摆动的精密动镜机构,具有较高的系统稳定性、探测灵敏度和探测速度.

1 高灵敏度干涉光谱成像仪及其主要缺陷

1.1 大孔径静态干涉光谱成像仪 LASIS

文献[3]提出了大孔径静态干涉光谱成像仪 LASIS 原理,如图 1.

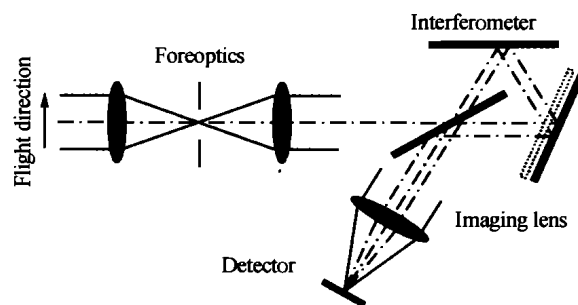


图 1 大孔径静态干涉光谱成像仪 LASIS
Fig. 1 The large aperture static imaging spectrometer (LASIS)

LASIS 实际上是在一个普通照相系统的平行光路中加入横切分束器实现的. 横向剪切分束器使像面上得到的不再是目标的直接像,而是目标的像面干涉图像,如图 2.



图 2 像面干涉图像
Fig. 2 The interference pattern on focal plane

像面干涉图像与直接图像的主要区别是,其像面经干涉调制,能量重新分布,形成了强弱相间的干涉条纹. LASIS 工作时沿垂直于干涉条纹的方向逐行推扫,获得许多冗余像面干涉图像,这些干涉图像经必要的处理,便可得到目标的两维空间信息和一维光谱信息. 已研制成功 LASIS 工程样机并得到了较好的实验结果.

LASIS 的主要优点是系统无运动部件(高稳定性)、探测灵敏度高,但是,为了获得准确的干涉图,从而获得准确的光谱,LASIS 对目标扫描成像时,对搭载平台的稳定性要求很高。

1.2 高通量干涉光谱成像仪 HEIFTS

文献[8]提出的高通量干涉光谱成像仪与 LASIS 的原理相似,包括分光原理、像面干涉图像、光谱复原算法等。不同之处是将横向剪切干涉仪置于成像镜之后的会聚光路中,这样,系统的体积大大减小,如图 3,图中采用了马赫-曾德干涉仪。

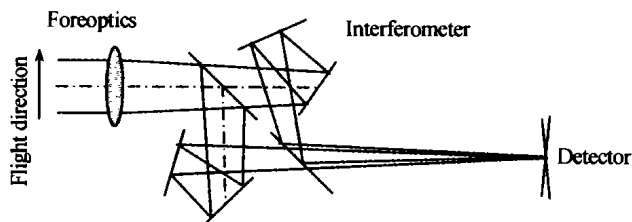


图 3 高通量干涉光谱成像仪 HEIFTS
Fig. 3 The high throughput(étendue) interference Fourier transform spectrometer

但是,由于 HEIFTS 的光路布局将横向剪切干涉仪置于会聚光路中,使得剪切后的相干光束在像面处不完全相干,会引起干涉图调制度的降低^[8],这是它与 LASIS 相比存在的主要缺点。

1.3 紧凑型大气探测干涉仪 CATSI

文献[9]提出的 CATSI 基于角反射体摆动机构,近年来成为 Bomem 公司的著名专利,其产品广泛应用于大气探测、化学品分析以及军事应用领域。角反射体摆动机构将传统 Michelson 干涉仪中的静镜和直线往复运动精密动镜系统集成到一个摆架上,并采用了角反射体,使两个反射镜固连在一起同时摆

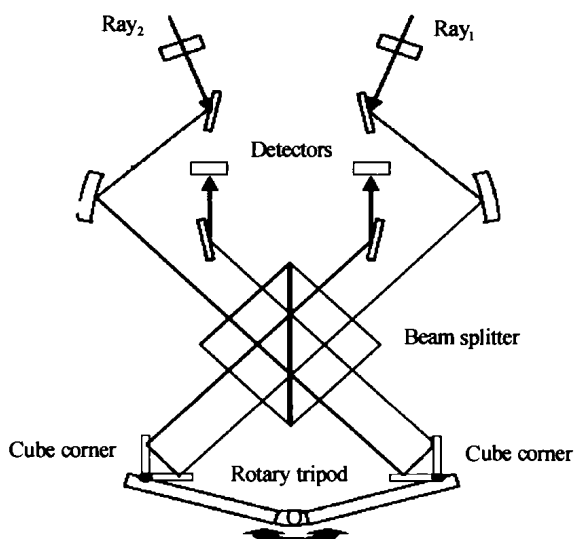


图 4 紧凑型大气探测干涉仪 CATSI
Fig. 4 Compact atmospheric sounding interferometer

动,可以消除由于运动带来的误差。该系统的优点是能够实现双光路同时探测。其原理如图 4。

这种机构的主要缺点是往复运动过程需要不断的重复加速、减速运动,使整个系统始终处于摆动状态,往复的摆动也使其难以实现高速探测。

1.4 高速转镜干涉光谱仪 RTFTS

文献[10]提出的 RTFTS 采用转镜产生光程差,克服了 CATSI 中摆动机构摆动带来的往复运动问题,使仪器的探测速度大大提高,发明者称其为“高速光谱仪”。这种仪器的主要缺点是转镜产生光程差会由于不同波长光折射率的不同带来光程差的非线性,由此对转镜材料的选择也提出了很高的要求。

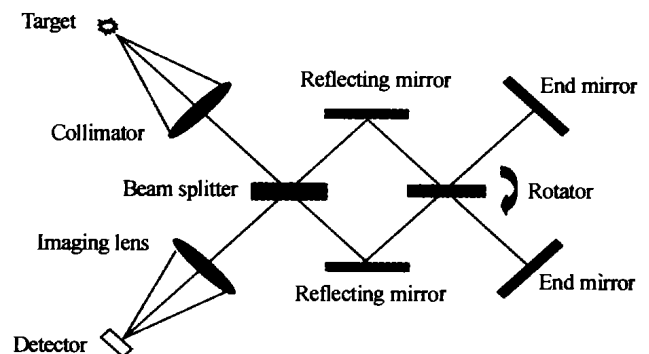


图 5 高速转镜干涉光谱仪 RTFTS
Fig. 5 High speed rotary Fourier transform spectrometer

2 转镜式高灵敏度干涉光谱成像仪 ROSI

2.1 原理

转镜式高灵敏度干涉光谱成像仪的原理如图 6。

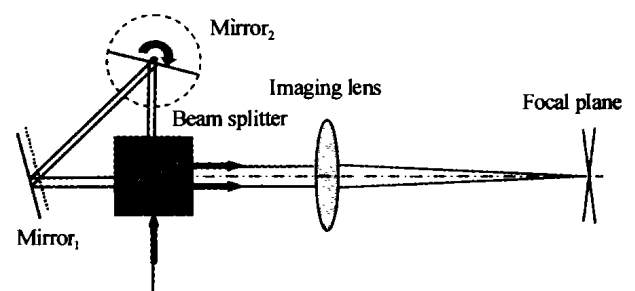


图 6 转镜式高灵敏度干涉光谱成像仪
Fig. 6 High sensitive Rotary Spectral Imager(ROSI)

显然,其光路布局图与 LASIS 十分相似,不同之处是此处 Sagnac 横向剪切干涉仪的一个反射镜是旋转的。该仪器不需要相对目标进行推扫,依靠旋转反射镜就能够得到目标的两维空间信息与一维光谱信息,即可通过凝视方式获得目标的数据立方体。

如图 7,横向剪切干涉仪将目标剪切成为两个“虚像”,其特点是平行的同向虚像。

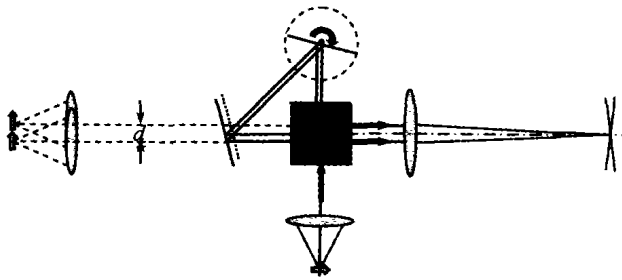


图7 横向剪切干涉仪的作用

Fig. 7 The principle of lateral shifting interferometer

对这种剪切形式已有研究^[7],其等效光路如图8.

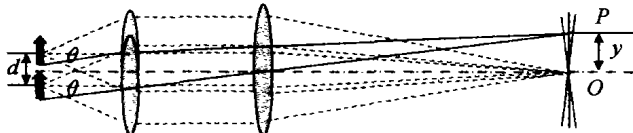


图8 等效干涉的光路

Fig. 8 The equivalent interference optical layout

探测器的O点的光程差为零,任意点P的光程差为

$$x = d \sin \theta = dy/f \quad (1)$$

式中 d 为相干光束横向剪切量, y 为 P 点偏离 O 点的距离, f 为成像镜的焦距. 当成像镜满足正弦条件时式(1)严格成立,并且对目标面积内任意点都成立,所以对波数范围在 $[\nu_1, \nu_2]$ 的光辐射,干涉图表达式为

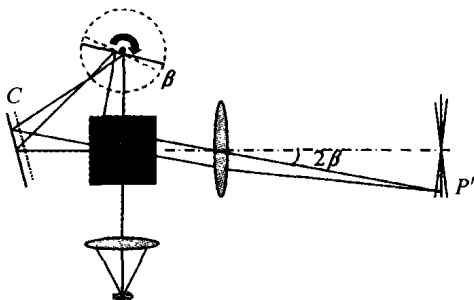
$$I(x) = \int_{\nu_1}^{\nu_2} B(\nu) \cos(2\pi\nu x) d\nu = \int_{\nu_1}^{\nu_2} B(\nu) \cdot \cos\left[\frac{2\pi\nu dy}{f}\right] d\nu \quad (2)$$

式中略去了常数项, $B(\nu)$ 是入射光谱强度分布.

可见此时干涉图的调制度为 1,即式(2)中积分核与被探测目标的大小、形状等因素无关,因此,该仪器能够获得很高的光通量(无需设置狭缝),从而拥有很高的探测灵敏度.

从图8中还可以看出,调整反射镜偏离距离 C ,可以改变干涉仪的横向剪切量 d . 由式(1)可得光程差随 d 值的变化而变化,从而可达到改变光谱分辨率的目的.

图7和图8所示情况下,目标中点的光程差为零,当转镜转动 β 角时,图7变为图9.

图9 转镜转过 β 角时的相干光线Fig. 9 The optical layout when rotary mirror at angle β

此时,目标中点成像位置移至 P' 点,由式(1)可得该点的光程差为

$$x = d \sin 2\beta = dy/f \quad (3)$$

显然,干涉图一般表达式同式(2). 也就是说,当转镜扫描速度与探测器曝光频率相配合时,能够得到目标上任何点在不同光程差时的干涉强度,因此就能够得到目标的数据立方体(两维空间信息与一维光谱信息).

2.2 特点

转镜式高灵敏度干涉光谱成像仪具有以下主要特点:1) 高探测灵敏度. 由于采用了与 LASIS 相同的光路,这种光谱成像仪具有与照相机同量级的光通量,因此,灵敏度很高;

2) 高稳定性. 采用了 Sagnac 横向剪切干涉仪,它的一个特点是共光路,因此,即使转镜在旋转过程中有微小的晃动,也不会影响干涉效果;

3) 高探测速度. 采用了转镜系统(而不是直线往复运动或摆动),使其具有与 RTFTS 相同的高速探测特性;

4) 凝视成像功能. 能够在与被探测目标相对静止的情况下,获取目标的两维空间信息和一维光谱信息;

5) 对搭载平台的要求较低. 该仪器获取干涉图像不是依靠平台的高稳定性线性推扫,而是依靠自身某反射镜的运动,因此,只要转镜的运动是平稳的,就能够比较容易地获得良好的干涉图像. 在这种情况下,平台的运动造成的影响可以补偿(就像 CATSI 已在机载平台中获得广泛应用一样);

6) 干涉图调制度高. 干涉仪分光方式能够保证相干光束完全干涉,因此较 HEIFTS 有更高的干涉调制度;

7) 较好的光程差线性度. 在适当的扫描范围内,当转镜的转速与探测器采样频率相匹配时,干涉光程差沿探测器基本呈线性分布.

3 结论

本文归纳了常见的高灵敏度干涉光谱成像技术,并讨论了它们各自的特点,在此基础上,提出了基于 Sagnac 横向剪切干涉仪的转镜式高灵敏度、高稳定度干涉光谱成像仪 ROSI,并对其原理和特点进行了介绍.

通过分析对比可以看到,ROSI 具有高灵敏度、高稳定性、高探测速度、高调制度、高线性度以及对搭载平台要求较低、可凝视成像等优点. 还可通过调整横向剪切干涉仪反射镜的偏离距离,改变剪切量从而达到调整光程差(光谱分辨率)的目的.

ROSI可满足数百谱段光谱分辨率的探测要求,适合地基、空基和天基等工作环境。

参考文献

- Inoue T, Itoh K, Ichioka Y. Fourier-transform spectral imaging near the image plane. *Optics Letters*, 1991, **V16** (12): 934~936
- Bell R J. Introductory Fourier transform spectroscopy. New York: Academic Press, 1972. 22
- 相里斌. 干涉成像光谱技术研究[博士后研究报告]. 西安:中国科学院西安光机所, 1997
Xiangli B. Study on the Fourier transform imaging spectrometry [Post-doctoral final report]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, 1997
- Cohen D L. Performance degradation of a michelson interferometer when its misalignment angle is a rapid varying, random time series. *Applied Optics*, 1997, **36** (18): 4034~4042
- Sellar R G, Rafert J B. Effects of aberrations on spatially modulated Fourier transform spectrometer. *Optical Engineering*, 1994, **33**(9): 3087~3092
- Smith W H, Hammer P D. Digital array scanned interferometer: sensors and results. *Applied Optics*, 1996, **35**(16): 2902~2909
- 相里斌, 赵葆常, 薛鸣球. 空间调制干涉成像光谱技术. *光学学报*, 1998, **18**(1): 16~22
Xiangli B, Zhao B C, Xue M Q. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(1): 16~22
- Horton R F. Optical design for a High étendue imaging Fourier transform spectrometer. *Proc SPIE Imaging Spectrometry II*, 1996, **2819**: 300~315
- Therault J M, Bradette C. Differential detection with a double-beam interferometer. *Proc SPIE Electro-Optical Technology for Remote Chemical Detection and Identification II*, 1997, **3082**: 65~75
- Wadsworth W, Dybwad J P. Ultra high speed chemical imaging spectrometer. *Proc SPIE Electro-Optical Technology for Remote Chemical Detection and Identification II*, 1997, **3082**: 148~154

Rotary High Sensitive Interference Spectral Imager(ROSI)

Yuan Yan, Xiangli Bin

Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710068

Received date: 2005-03-17

Abstract A novel kind of Fourier transform spectral imager with high detecting sensitivity and stability is presented. This spectral imager is based on the Sagnac lateral shifting interferometer with one rotary reflecting mirror (therefore named ROSI). Because there is no entrance slit, the throughput is very high and therefore the sensitivity. The datacube of two dimensions of spatial information and spectral information can be obtained by starring mode. Some principle defects of the current high throughput (étendue) spectral imagers are overcome.

Keywords Spectral imager; Fourier transform; High throughput; Rotary mirror



Yuan Yan was born in 1967. She received her master degree from Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS in 1997. She is a professor in XIOPM and her current interests include optical instrument design and spectral imaging technology.