

变间隙法布里-珀罗干涉式长波红外光谱成像系统

张 芳,高教波,王 楠,赵宇洁,吴江辉,郑雅卫

(西安应用光学研究所,陕西 西安 710065)

摘 要:干涉式长波红外光谱成像技术以其独特的工作原理和谱段特性,在众多领域具有广泛的应用前景。为解决仪器小型化、轻量化问题,研究了一种基于变间隙法布里-珀罗(F-P)干涉仪的新型长波红外光谱成像系统。在分析系统工作原理的基础上,研究了确定 F-P 干涉腔两反射面的反射率、变间隙干涉腔的楔角等主要参数的理论依据;搭建了实验系统,得到了整个装置对黑体宽波段热辐射的响应;通过将系统测得的聚丙烯薄膜的透过率曲线与高精度光谱辐射计测量结果进行比较,结果显示系统光谱分辨率满足理论设计要求。研究表明:该系统能够有效满足长波红外光谱成像系统的轻便化、小型化的需求。

关键词:变间隙; 法布里-珀罗干涉仪; 长波红外; 光谱成像系统

中图分类号: TH744 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0318001

LWIR imaging spectrometer employing a variable gap Fabry-Perot interferometer

Zhang Fang, Gao Jiaobo, Wang Nan, Zhao Yujie, Wu Jianghui, Zheng Yawei

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

Abstract: With unique working principle and spectral characteristic, the long wave infrared (LWIR) interferometric spectral imaging is a popular technology with wide application in many fields. In order to miniaturize and light the instrument, a new method of LWIR spectral imaging system based on a variable gap Fabry-Perot (F-P) interferometer was researched. With the system working principle analyzed, theoretically, it was researched that how to make certain the primary parameters, such as, the reflectivity of the two interferometric cavity surface and the wedge angle of interferometric cavity. A prototype was developed and good experimental results of blackbody and polypropylene film were obtained. The research shows that besides high throughput and high spectral resolution, the advantage of miniaturization is also simultaneously achieved in this method.

Key words: variable gap; Fabry-Perot interferometer; long wave infrared; spectral imaging system

0 引言

在军事上,相对照相侦察技术,光谱成像技术^[1]对伪装、隐蔽目标具有更强的发现能力,通过特征光谱的比对可以识别物质成分。民用上,它可用于天体物理研究、地球资源调查,还能进行污染和灾害报警。由于大多数气体在长波红外波段具有独特的光谱特性,长波红外光谱成像技术成为一种气体成分探测和识别的有效方法。

同等接收面积的前提下,干涉式光谱成像仪相对于色散型或滤光片式光谱成像仪具有更高的信噪比,这主要是由于色散型或滤光片式系统舍弃了入射光束中大量的光能。对于色散型光谱成像仪,只允许透过一个狭缝的光通过,其余的光舍弃;而滤光片系统中的窄带滤光片则将入射的大部分光反射回去。相比之下,干涉式光谱成像仪在整个数据采集期间同时接收来自整个场景的光束。常温下目标与背景温差较小,在长波红外波段的辐射能量较弱,为获得高信噪比,干涉式长波红外光谱成像技术成为研究的热点。

作为光谱成像仪的核心器件,自 Okamoto 等人以来,出现了一些不同形式的空间干涉仪,主要用于遥感探测^[2-3]。早前方法或使用基于分束器的干涉仪,或使用双折射晶体结合合适的偏振片产生干涉条纹。较为典型的为 Michelson 干涉仪、Sagnac 干涉仪、Mach-Zehnder 干涉仪等^[4-6]。由于长波红外波段波长较长,且目标辐射能量相对较弱,致使工作于该波段的光学系统口径较大,因此上述干涉仪普遍体积较大,此外,对于基于分束器的干涉仪,还需要较高的光学装调技术来减轻微小位移造成的系统性能退化。

2009年 Heikki Saari 等人^[7]研究了一种基于法布里-珀罗(F-P)干涉仪的光谱成像系统,工作于可见光近红外波段。该系统可在 RGB 相机上不同区域处获得3个不同波长的二维图像,通过改变 F-P 干涉仪的空气间隙来改变其出射的3个波长值,从而获得二维空间中不同目标点在不同波长处的光谱信息。该光谱成像仪的主要缺点是:首先,该系统工作于可见光近红外波段,无法满足在长波红外波段具

有特征峰的无色毒气等目标探测;其次,系统需要一个精确的传输机构控制 F-P 干涉仪的空气间隙;此外,当搭载平台处于运动状态下,该系统在改变 F-P 干涉仪的空气间隙的同时,视场内的目标也在改变,无法获取同一目标在不同波长处的光谱信息。

鉴于传统 F-P 干涉光谱成像系统的以上不足之处及基于分束器的干涉式光谱成像系统的工作原理,文中将传统 F-P 干涉仪等间隙结构改变为变间隙结构,可以实现对视场内任意目标点的光程差调制。文中研究的变间隙 F-P 干涉仪的干涉腔,由一个楔形平板和平行平板构成,通过选定合适的腔内反射率和楔形平板的楔角大小,可采用双光束干涉理论替代传统 F-P 干涉仪的多光束干涉理论,实现理论创新,最终在干涉仪的后腔面上形成目标场景的干涉条纹,从而可作为光谱成像系统的核心器件。变间隙 F-P 干涉仪体积紧凑,且通过其光路具有的直线性,既不需要传统 F-P 干涉仪的空气间隙调节机构,也避免了基于分束器的干涉仪的高难度装调工作,同时为工作于长波红外波段的整个光谱成像系统小型化提供一种有效途径。

此外,美国夏威夷大学研究表明平板和楔形平板构成的变间隙 F-P 干涉仪可有效克服平板和柱面镜构成的变间隙 F-P 干涉仪产生的非线性光程差问题,并实验证明了变间隙 F-P 干涉式长波红外光谱成像技术的可行性。

目前,针对此技术,国内外尚无成熟的产品,尤其国内尚无理论研究。

1 系统设计与分析

文中研究的变间隙法布里-珀罗干涉式长波红外光谱成像系统包括前端成像物镜、变间隙 F-P 干涉仪、中继镜、探测器,以及信号处理系统,如图 1 所示。前端成像物镜将目标成像在系统的一次像面上;变间隙 F-P 干涉仪由一个楔形平板和平行平板构成,具体结构如图 2 所示,实现干涉分光作用;中继镜会聚光束实现二次成像和产生干涉条纹的作用;探测器实现目标空间信息和干涉信息的同时获取和记录功能;信号处理系统实现探测器获取的图像信号的处理和显示功能。由于 F-P 干涉仪的间隙是渐

变的,因此,不同视场的目标点到探测器的光程差不同,通过系统的整体推扫,可提取每个物点的干涉信息,从而复原出成像目标的光谱信息。

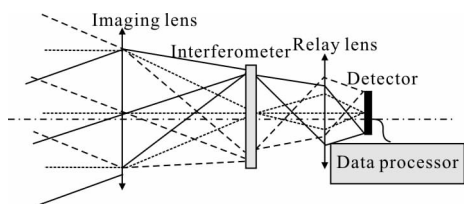


图 1 变间隙 F-P 干涉式光谱成像系统
Fig.1 Variable gap F-P spectral imaging system

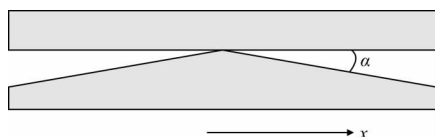


图 2 变间隙 F-P 干涉仪结构图
Fig.2 Structure of variable gap F-P interferometer

1.1 F-P 干涉仪设计

1.1.1 F-P 干涉腔反射面反射率的确定

为强调变间隙产生的相位差 δ 的作用,将 F-P 干涉仪^[8]透过率的传统表达式变换如下:

$$T = \frac{R^2 - 2R + 1}{R^2 - 2R \cos \delta + 1} \quad (1)$$

式中: R 为反射面的反射率; δ 为相邻两反射光之间的相位差^[8]。

$$\delta = \frac{4\pi n \cos \theta}{\lambda} h(x) \quad (2)$$

式中: n 为间隙介质折射率; θ 为光束进入干涉腔的入射角; $h(x)$ 为垂直于光轴的 x 方向上变化的间隙厚度; λ 为波长,与间隙厚度单位一致。上述 x 为光束入射到干涉腔的位置到干涉腔对称中线的距离。传统 F-P 干涉仪的间隙厚度在垂直于光轴方向是不变的。但文中研究的装置间隙厚度是 x 的函数,从而产生的是周期信号,装置可转换为一个傅里叶变换成像光谱仪。

根据公式(1)和公式(2),从 F-P 干涉仪透射的信号与间隙厚度,或 x 位置的关系并不是纯正弦曲线,且反射率 R 不同,曲线形状不同,如图 3 所示。传统 F-P 干涉仪反射面反射率通常很高,只有带宽很窄的光可以通过,作为光学滤光片使用。对此信号的傅里叶变换,会产生旁瓣。旁瓣有可能限制包含两个以

上波长的光源通过此装置,也削弱了主频信号的能量。因此,必须使旁瓣最小化。

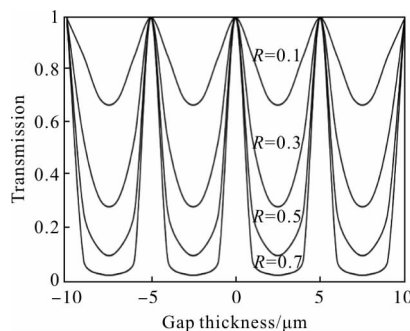


图 3 干涉仪透过率随间隙厚度的变化曲线
Fig.3 Transmittance of interferometer with different gap thicknesses

如果反射面的反射率为 0,该装置可产生一个纯正弦曲线,但此时整个信号没有任何调制,然而,调制是傅里叶变换成像光谱仪的最终信号源。因此,原理上,应对调制和旁瓣抑制进行折中权衡。

对公式(1)进行一次多项式展开^[9-10]:

$$T = (R^2 - 2R + 1)(1 - R^2 - 2R \cos \delta) \quad (3)$$

由于主要调制因素为不同间隙厚度造成的余弦调制,且考虑的是正弦性和调制度所占的比例,因此忽略公式(1)中的分子项。

由于光源本身是多个不同频率正弦光信号的叠加,因此文中认为正弦性是指入射光信号未经相位差余弦调制的结果,用 K_{\sin} 表示:

$$K_{\sin} = 1 - R^2 \quad (4)$$

由公式(1)可得调制度 M 为:

$$M = \frac{2R}{1 + R^2} \quad (5)$$

K_{\sin} 与 M 随 R 的变化曲线如图 4 所示。

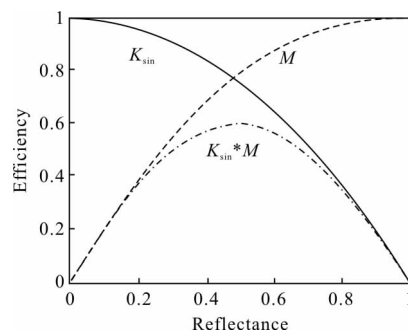


图 4 正弦性和调制度效率随反射率变化曲线
Fig.4 Sinusoidal and modulation with different reflectivities

从图 4 可以找到一个合适的反射率点约为 48%,此时正弦性较好,且调制度最大。

1.1.2 F-P 干涉仪楔角的设计

如图 2 所示, α 为干涉仪的楔角, x 位置处的光程差为:

$$\Delta = 2x \tan \alpha \quad (6)$$

系统的波数分辨率 $\Delta\sigma$, 由采样得到的最大光程差决定, 即:

$$\Delta\sigma = \frac{1}{2\Delta_{\max}} \quad (7)$$

间隙的倾斜程度, 即干涉仪楔角, 决定了探测器阵列上干涉条纹的周期, 一般最短波长的条纹周期应介于一倍奈奎斯特和两倍奈奎斯特采样周期之间, 即满足:

$$2 \leq \frac{\lambda_{\min}}{2p \tan \alpha} \leq 4 \quad (8)$$

式中: λ_{\min} 为系统工作波段范围内最小波长, μm ; p 为探测器像元尺寸, μm 。

对于长波红外系统, 工作波段为 8~12 μm , 波数分辨率为 10 cm^{-1} , 探测器像素数为 320×256, 像素尺寸为 25 μm , 根据公式(7)和公式(8)可确定 F-P 干涉仪楔角 α 的合理范围为 2.29°~4.57°。

1.2 视场和成像物镜 F#

由图 4 可以看出: 干涉腔反射面的最佳反射率值为 48%, 该值相较于传统 F-P 干涉仪较低, 可以忽略腔内的高次反射, 仅考虑两级透射光束的干涉情况, 从而在系统像面上形成两个艾里斑。这两个艾里斑的中心距是系统视场角的函数, 为避免艾里斑间距过大造成成像模糊, 需要分析二者的具体关系。如图 5 所示, β 为光束在干涉腔平行平板上的反射角, 与系统视场角 θ 的关系为:

$$\beta = \arcsin \{ n \sin [\arcsin (\sin \theta / n) + \alpha] \} + \alpha \quad (9)$$

式中: n 为楔形平板的折射率; α 为楔形平板的楔角。

图 5 中, 两艾里斑中心距 $d = S_1 S_2$ 。

$$d = \frac{x \tan(2\alpha) \sin(\alpha + \beta)}{\cos \beta + \tan(2\alpha) \sin(\alpha + \beta)} \quad (10)$$

式中: x 为光束入射在干涉腔的位置距干涉腔对称中心位置 O 处的距离。当艾里斑 S_2 到 O 点距离为干涉腔横向尺寸的一半时, 即 S_2 为最大视场角光束形成时, 两艾里斑中心距最大, 为 d_{\max} , 是 θ_{\max} 的函数。

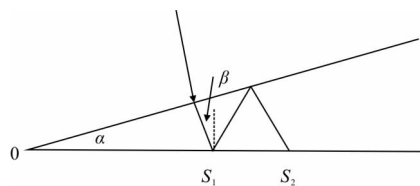


图 5 艾里斑分布图

Fig.5 Distribution diagram of two Airy disks

对于圆形通光孔径, 物点光束通过成像物镜形成的艾里斑半径^[8]为:

$$r = 1.22 \lambda_{\min} F\# \quad (11)$$

式中: λ_{\min} 为系统响应的最小波长; $F\#$ 为前端成像物镜的 $F\#$; r 为成像物镜形成的艾里斑半径。当 $d_{\max} \leq r$, 成像清晰。对于长波红外系统, 信噪比较差, 系统 $F\#$ 越小, 系统收集能量的能力越强。

图 6 是楔角为 $\alpha = 2.3^\circ$ 时, 视场角与两艾里斑中心距 d 之间的关系曲线。由该图可看出: 视场越大, 艾里斑中心距越大。为满足长波红外系统能量响应需求, 成像物镜 $F\#$ 选为 1, 则对应的最大视场角 $\theta = 5.5^\circ$ 。

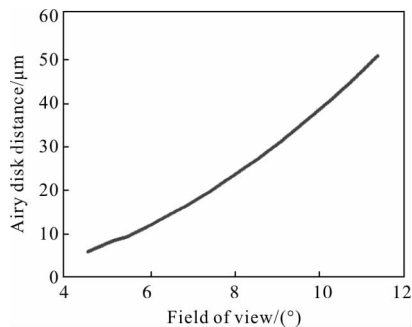


图 6 艾里斑中心距随视场角变化曲线

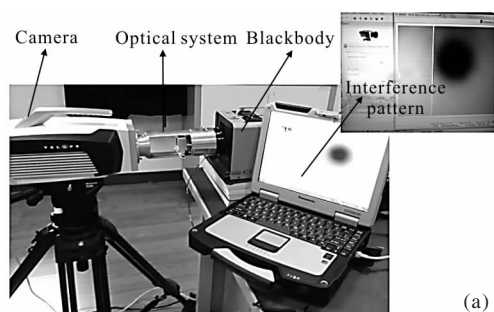
Fig.6 Curve of Airy disk distance changing with field of view

2 实验样机及结果

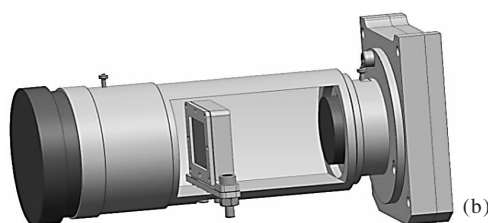
2.1 实验样机

根据实验室现有条件, 搭建了实验样机^[11], 如图 7(a)所示。整个样机系统的波长响应范围为 8~12 μm 。样机中选用了两组镜头, 焦距分别为 75mm 和 25mm, $F\#$ 均为 1; 干涉仪的楔板和平行平板的材料均为锗, 在 8~12 μm 波段范围内反射率为 40%, 楔角为 15 mrad, 楔板的光入射面和 平行平板的光出射面镀制了 99.5% 的增透膜, 楔板和 平行平板的厚度均为 5 mm; 选用的探测器为长波红外制冷热像仪, 像素数为

320×256, 像素尺寸为 25 μm。依据上述原理分析, 样机系统的光谱分辨率为 12 cm⁻¹, 半视场为 5°×4°, 系统 F# 为 1。满足该系统参数条件下, 样机光学系统的整体尺寸为 180 mm×φ80 mm, 重量为 1.5 kg, 三维结构如图 7(b)所示。同等参数要求下, 研制的静态 Michelson 干涉式光谱成像仪的光学系统, 体积约为 280 mm×300 mm×140 mm, 重量约 10 kg, 如图 8 所示。由此可见, 变间隙 F-P 干涉式长波红外光谱成像系统在小型化、轻量化方面具有极大优势。



(a)



(b)

图 7 实验样机与 F-P 干涉仪三维图

Fig.7 Experimental prototype and F-P interferometer 3D drawing

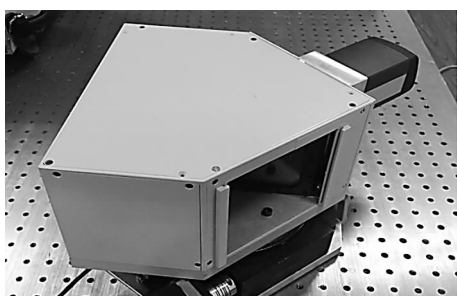


图 8 Michelson 干涉仪示意图

Fig.8 Schematic of Michelson interferometer

2.2 实验结果与分析

实验样机得到的结果是叠加有干涉条纹的二维目标场景图。通过整个系统的推扫, 可以获取同一目标点在不同光程差处的干涉信息, 该信息与目标点的光谱信息之间具有傅里叶变换的关系^[12-14]。面源黑体作为稳定、均匀的光源, 干涉仪不需要相对光源

进行推扫和图像重排, 而将探测器焦平面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, 可直接对干涉条纹进行傅里叶变换反演出光源的光谱分布。

图 9 是样机对 50℃黑体宽波段热辐射的响应。由于黑体是均匀光源, 可直接对单帧图像提取干涉条纹, 并进行切趾、相位校正等处理, 最终进行傅里叶变换, 得到 50℃黑体的光谱曲线, 如图 10 所示。

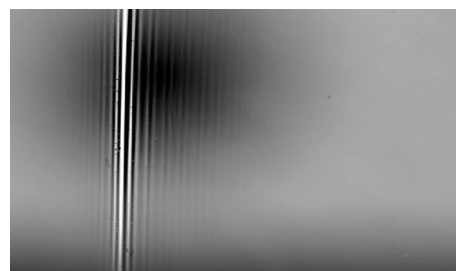


图 9 50℃黑体干涉图

Fig.9 Interference pattern for 50°C blackbody

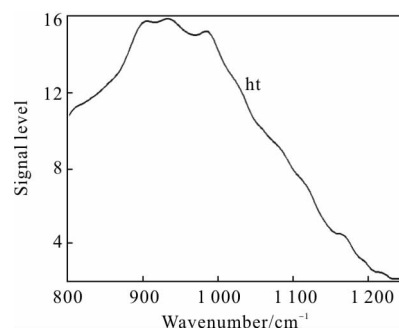


图 10 50℃黑体光谱曲线

Fig.10 Spectrum of 50°C blackbody

将在长波红外波段具有明显特征峰的聚丙烯薄膜放在 50℃面黑体与样机成像物镜之间, 得到干涉图。同样对该单帧图像提取干涉条纹, 并进行切趾、相位校正等处理, 最终进行傅里叶变换, 得到含聚丙烯薄膜的光谱曲线, 如图 11 所示。并将图 11 所示光谱曲线与图 10 光谱曲线相除可得到聚丙烯薄膜的光谱透过率曲线。

为了确定样机的采样步长, 采用光谱分辨率为 1 cm⁻¹ 的高精度光谱辐射计 Turbo FT, 测量聚丙烯薄膜的光谱透过率曲线, 两仪器测量结果对比曲线如图 12 所示。通过比较两光谱曲线, 可以确定样机的采样步长为 1.95 μm, 由此计算得到光谱分辨率为

15 cm⁻¹, 与理论计算值 12 cm⁻¹ 相近。

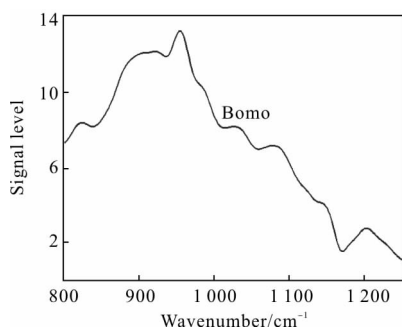


图 11 聚丙烯薄膜光谱曲线

Fig.11 Spectrum of polypropylene film

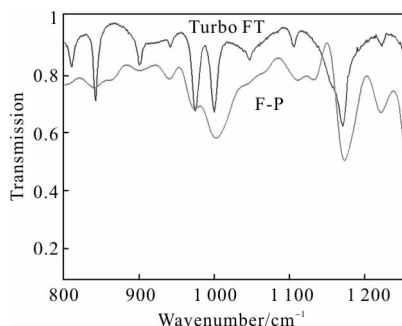


图 12 聚丙烯薄膜透过率曲线

Fig.12 Spectral transmittance of polypropylene film

无云的晴朗天空是一个均匀的辐射源，其在 9.45 μm 处有一个峰值。为进一步验证方案的可行性，高精度光谱辐射计 Turbo FT 和实验样机同时测取晴朗天空的光谱辐射曲线。图 13 是二者测试曲线归一化结果。通过比较两光谱曲线，可以确定样机的采样步长为 1.93 μm，与上述聚丙烯薄膜光谱透过率测量结果确定的采样步长相对误差为 1%，由此计算得到光谱分辨率为 15.2 cm⁻¹，与理论计算值 12 cm⁻¹ 相近。

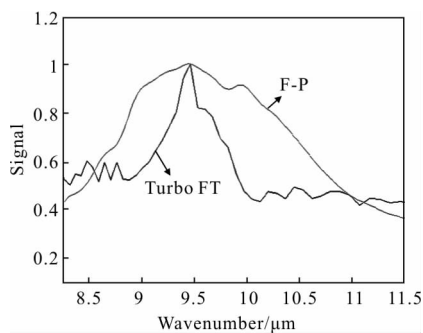


图 13 晴朗天空光谱辐射曲线

Fig.13 Spectral radiation curve of fair sky

3 结 论

为使干涉式长波红外光谱成像系统更加紧凑，对基于变间隙 F-P 干涉仪的光谱成像方法进行了研究。详细论述了干涉腔反射率、楔角、视场和成像物镜 *F#* 等重要参数选取的理论依据。通过测量在长波红外波段有特定吸收峰的聚丙烯薄膜样品的光谱透过率和晴朗无云天空光谱辐射曲线，并将测量结果与高精度光谱辐射计测量结果进行比较，验证了实验样机复原光谱的准确性。实验结果验证了该方案原理的可行性和设计的正确性。

受到探测器大小及成像物镜焦距的限制，反演光谱的分辨率受到一定影响，以上不足将列入下一步改进计划，此外，整体系统的小型化和轻量化也将是下一个研究方向。

参考文献：

- [1] Ding Na, Gao Jiaobo, Wang Jun, et al. Camouflaged target recognition realized by AOTF multispectral imaging system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(1): 66–69. (in Chinese) 丁娜, 高教波, 王军, 等. 利用 AOTF 多光谱成像系统实现伪装目标的识别[J]. *应用光学*, 2010, 31(1): 66–69.
- [2] Yarbrough S, Caudill T, Kouba M E, et al. Mighty Sat II . hyperspectral imager: summary of on-orbit performance[C]// Proceedings of SPIE, 2002, 4480: 186–197.
- [3] Lucey Paul G, Keith Horton, Tim Williams, et al. High-performance Sagnac interferometer using uncooled detectors for infrared hyperspectral imaging [C]//Proceedings of SPIE, 2007, 6560: 65650S.
- [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. (in Chinese) 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] Li Jie, Zhu Jingping, Zhang Yunyao, et al. Spectral zooming birefringent imaging spectrometer [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(2): 024205. (in Chinese) 李杰, 朱京平, 张云尧, 等. 光谱分辨率可调的新型干涉成像光谱技术研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(2): 024205.
- [6] Meng Hemin, Gao Jiaobo, Xiao Xiangguo, et al. Design and validation of infrared interferential imaging spectrometer with high flux [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41

- (11): 2093–2098. (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): 2093–2098.
- [7] Heikki Saari, Ville Veikko Aallos, Altti Akujärvi, et al. Novel miniaturized hyperspectral sensor for UAV and space application[C]//Proceedings of SPIE, 2009, 7474: 74741M.
- [8] Born M, Wolf E. Principles of Optics[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2009: 324–333. (in Chinese)
玻恩, 沃尔夫光学原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009: 324–333.
- [9] Kajava T T, Lauranto H M, Friberg A T. Interference pattern of the Fizeau interferometer [J]. *JOSA A*, 1994, 11 (7): 2045–2054.
- [10] Gillard F, Ferrec Y, Guerineau N, et al. Angular acceptance analysis of an infrared focal plane array with a built-in stationary Fourier transform spectrometer[J]. *JOSA A*, 2012, 29(6): 936–944.
- [11] Yuan Liyin, Lin Ying, He Zhiping, et al. Design and realization of an long-wave infrared hyperspectral imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(2): 181–185. (in Chinese)
袁立银, 林颖, 何志平, 等. 长波红外高光谱成像系统的设计与实现[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(2): 181–185.
- [12] Li Suning, Zhu Rihong, Li Jianxin, et al. Method of reconstruction on Fourier –Transform spectroscopy [J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, 30(2): 268–272. (in Chinese)
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.
- [13] Lin Ying, Xu Weiming, Yuan Liyin, et al. Nonuniformity correction for LW infrared hyperspectral and its spectral feature abstraction [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40 (4): 605–610. (in Chinese)
林颖, 徐卫明, 袁立银, 等. 长波红外高光谱非均匀性校正及光谱特征提取[J]. 红外与激光工程, 2011, 40 (4): 605–610.
- [14] Li Yu, Gao Jiaobo, Meng Hemin, et al. Fast inversion techniques of inteferogram imaging spectrum based on CUDA[J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(3): 415–419. (in Chinese)
李宇, 高教波, 孟合民, 等. 基于统一计算设备架构的干涉成像光谱快速反演技术研究 [J]. 应用光学, 2014, 35(3): 415–419.