

变间隙法布里-珀罗 (F-P) 干涉腔反射率确定方法

张 芳, 高教波, 张兰兰, 米建军, 寿少峻, 张安锋, 冯 颖, 侯 瑞

(西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘 要: 变间隙法布里-珀罗 (F-P) 干涉光谱成像系统获取的干涉条纹承载着目标重要的干涉信息, 其正弦性的好坏和调制度的高低直接影响了目标干涉信息的提取。而变间隙法布里-珀罗 (F-P) 干涉腔材料的反射率值是变间隙 F-P 干涉光谱成像系统的重要性能参数。为提高变间隙 F-P 干涉光谱成像系统整个系统的性能, 从系统干涉条纹的正弦性和调制度两方面约束了变间隙 F-P 干涉腔反射率值的选取。文中分别建立了干涉条纹正弦性和调制度与变间隙 F-P 干涉腔材料反射率之间的数学关系, 并给出合理地目标函数, 以确保干涉条纹正弦性和调制度同时达到相对最佳值时, 变间隙 F-P 干涉腔材料的反射率最佳。此外, 搭建了长波红外变间隙 F-P 干涉式光谱成像系统, 采用测量聚丙烯薄膜的光谱透过率实验验证了上述理论分析的正确性。

关键词: 变间隙; 法布里-珀罗干涉仪; 光谱成像系统; 反射率

中图分类号: TH744 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210099

A method to determine reflectivity of F-P interferometric cavity with variable gap

Zhang Fang, Gao Jiabo, Zhang Lanlan, Mi Jianjun, Shou Shaojun, Zhang Anfeng, Feng Ying, Hou Rui

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

Abstract: There is many interference information of targets contained in the interference fringes which are obtained by the variable gap Fabry-Perot (F-P) interferometric imaging system. The sinusoidal nature and modulation of the interference fringes directly affect the extraction of interference information of the target. The reflectivity value of the variable gap Fabry-Perot (F-P) interference cavity material is an important performance parameter of the variable gap F-P interferometric imaging system. In order to improve the performance of the variable gap F-P interferometric imaging system, the reflectivity of the variable gap F-P interferometric cavity depends on the sinusoidal nature and the modulation of the interference fringes. In this paper, the mathematical relationship between the sinusoidal nature and modulation of interference fringes and the reflectivity of F-P cavity with variable gap was established respectively and a reasonable objective function was given. When the sinusoidal nature and modulation of the interference fringes were relatively optimal at the same time, the optimal reflectivity of material of the F-P cavity with variable gap was found. The long wave infrared variable gap F-P interference spectral imaging system was built, and the correctness of the above theoretical analysis was verified by measuring the spectral transmittance of polypropylene film.

Key words: variable gap; Fabry-Perot interferometer; spectral imaging system; reflectivity

收稿日期:2021-02-08; 修订日期:2021-08-21

作者简介:张芳,女,高级工程师,博士,主要从事红外光谱成像技术方面的研究。

0 引言

作为变间隙法布里-珀罗 (F-P) 干涉光谱成像系统的核心器件, 变间隙 F-P 干涉仪^[1-3]以其结构小巧、紧凑, 工作原理简单可行等优点使得整个干涉光谱成像系统, 尤其是在长波红外波段, 真正满足了轻量化、小型化的需求, 拓宽了干涉光谱成像系统的应用平台。

一般地, 变间隙法布里-珀罗 (F-P) 干涉式光谱成像系统由成像物镜、变间隙 F-P 分光干涉仪、中继镜、探测器, 以及信号处理系统组成, 如图 1 所示。成像物镜用于前端目标成像, 像面在变间隙 F-P 分光干涉仪的出射面上; 变间隙 F-P 分光干涉仪包含一个两端对称的楔形平板和一块平行平板, 其结构如图 2 所示 (α 为干涉仪楔角), 实现干涉分光作用; 中继镜会聚光束实现二次成像, 并产生干涉条纹的作用; 探测器用于获取和记录目标空间信息和干涉信息; 信号处理系统用于处理和显示探测器获取的图像信号。

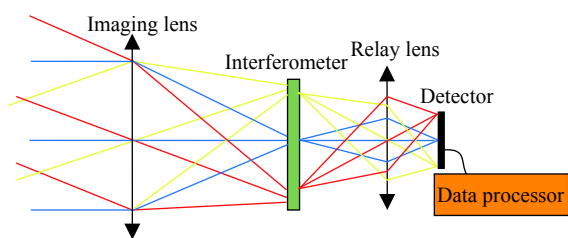


图 1 变间隙 F-P 光谱成像系统光路图

Fig.1 Variable gap F-P spectral imaging system

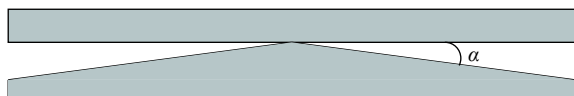


图 2 变间隙法布里-珀罗 (F-P) 干涉仪结构图

Fig.2 Structure of variable gap F-P interferometer

其中变间隙 F-P 干涉仪干涉腔内表面材料的反射率值直接影响了变间隙 F-P 干涉光谱成像系统最终获取的干涉条纹的正弦性和调制度。干涉条纹正弦性差, 干涉数据经傅里叶变换^[4-6]后会产生旁瓣, 这样不仅削减了主频信号的强度, 而且还会产生一些干扰信号, 降低系统的信噪比; 干涉条纹调制度差, 干涉信号变化量小, 有用信息难以提取, 最终不利于系统后续光谱信号的解调处理。

目前, 夏威夷地球物理和行星学研究所 Paul G.Lucey^[7]等学者研究了干涉仪干涉腔反射率的确定

方法, 提出需要考虑干涉仪干涉腔反射率值对干涉条纹的正弦性和调制度的影响, 但并未给出二者与干涉仪反射率值之间的具体函数关系, 无法直接借鉴采用。国内南京理工大学^[8]介绍了一种通过复色光干涉条纹的调制度限定干涉仪干涉腔反射率的方法, 并未考虑干涉条纹的正弦性。因此对于变间隙 F-P 干涉式光谱成像系统, 国内外尚未从理论上明确给出干涉条纹正弦性定义, 且无同时给出干涉条纹正弦性和调制度与变间隙 F-P 干涉仪干涉腔内表面材料的反射率值之间数学关系的相关分析研究。

文中依据干涉条纹正弦性和调制度的定义, 分别建立了干涉条纹正弦性和调制度与变间隙 F-P 干涉腔材料反射率之间的数学关系, 以此得到变间隙 F-P 干涉腔反射率的最佳值。

1 变间隙 F-P 干涉仪干涉腔反射率与干涉条纹正弦性

对于干涉系统, 单色光的干涉条纹是随着相位差变化的正弦曲线, 复色光的干涉条纹是随着相位差变化的 sinc 函数曲线, 因此, 正弦性需针对单色光的干涉条纹进行分析。

变间隙法布里-珀罗干涉光谱成像系统获取的单色光相对干涉光强随相位差变化的数学模型为:

$$I(\lambda) = (1 - R)^2(1 + R^2 + 2R \cos \varphi)I_i(\lambda) \quad (1)$$

式中: $I_i(\lambda)$ 为波长为 λ 的单色光对应的入射光光强; $I(\lambda)$ 为变间隙法布里-珀罗干涉光谱成像系统获取的单色光相对干涉光强; R 为干涉腔反射率; φ 为两干涉光之间的相位差:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2x \tan \alpha \quad (2)$$

式中: x 为水平方向干涉仪距光轴的距离; α 为干涉仪楔角。

假定波长为 $10 \mu\text{m}$ 的单色入射光 $I_i(\lambda)$ 相对光强为 1000 W/sr , 长波红外变间隙法布里-珀罗干涉光谱成像系统的干涉仪楔角为 15 mrad , 中继镜垂轴放大率为 $1:1$, 这样根据公式 (1)、(2), 可以得到不同变间隙 F-P 干涉仪干涉腔内表面材料的反射率值下, 变间隙 F-P 干涉光谱成像系统获得的单色光干涉光强随探测器像元位置的变化曲线, 如图 3 所示。图中在 $[0,1]$ 区间范围内, 每隔 0.1 选取一个反射率值。

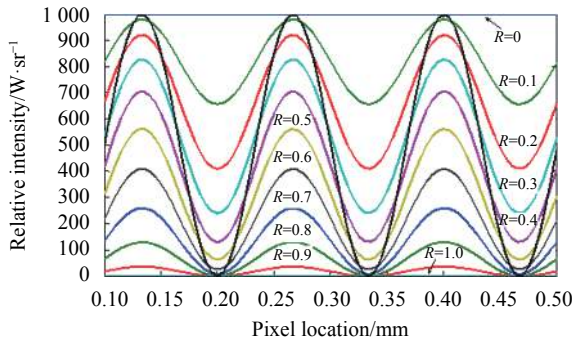


图 3 单色光干涉光强随探测器像元位置变化曲线

Fig.3 Interference intensity of monochromatic light at different pixel location of detector

为分析干涉腔反射面反射率值对变间隙 F-P 干涉光谱成像系统单色光干涉曲线正弦性的影响程度,文中绘制了一条幅值在 0~1000 变化的标准正弦曲线,如图 3 中黑色曲线所示。图 4 计算了不同反射率值下,图 3 中系统获取的各干涉曲线与标准正弦函数曲线之间的误差随探测器像元位置变化的曲线。图 3 中各曲线自上而下分别对应的反射率值从 0~1,间隔 0.1 等间隔变化。

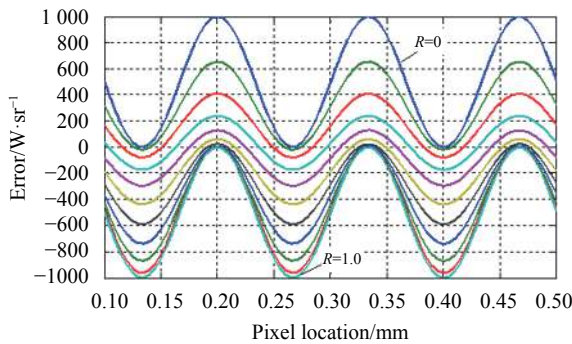


图 4 单色光干涉光强与标准正弦函数误差曲线

Fig.4 Error curves between interference intensity of monochromatic light and standard sine function

为更清晰地表达误差值与干涉腔反射面反射率值之间的关系,将图 4 中各条曲线在不同探测器像元位置处对应的误差值的绝对值求和。图 5 显示了图 4 中各曲线误差绝对值与干涉腔反射率值之间关系,且对其进行了归一化处理。

从图 5 可知,当干涉腔反射面反射率 $R=0.33$ 时,变间隙 F-P 干涉光谱成像系统获取的单色光干涉曲线与标准正弦曲线之间的误差相对最小,即正弦性最好。

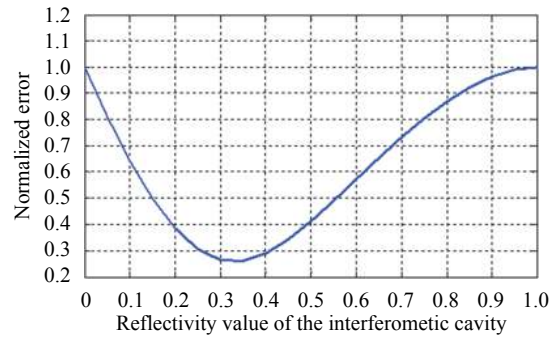


图 5 归一化误差随干涉腔反射率变化曲线

Fig.5 Normalized error at different reflectivity of the interferometric cavity

2 变间隙 F-P 干涉仪干涉腔反射率与干涉条纹调制度

变间隙 F-P 干涉光谱成像系统干涉条纹调制度 M 定义为:

$$M = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (3)$$

依据公式 (1), 假定 $I_i(\lambda)=1$, 当 $\cos\varphi=1$ 时,

$$I_{\max}(\lambda) = (1 - R)^2(1 + R)^2 \quad (4)$$

当 $\cos\varphi=-1$ 时:

$$I_{\min}(\lambda) = (1 - R)^2(1 - R)^2 \quad (5)$$

最终变间隙 F-P 干涉光谱成像系统干涉条纹调制度 M 与变间隙 F-P 干涉腔反射率 R 之间关系为:

$$M = \frac{2R}{1 + R^2} \quad (6)$$

依据公式 (6), 得到的变间隙 F-P 干涉腔反射率与系统干涉条纹调制度之间的关系曲线如图 6 所示。可以看出,干涉腔反射率越高,干涉条纹调制度越好。

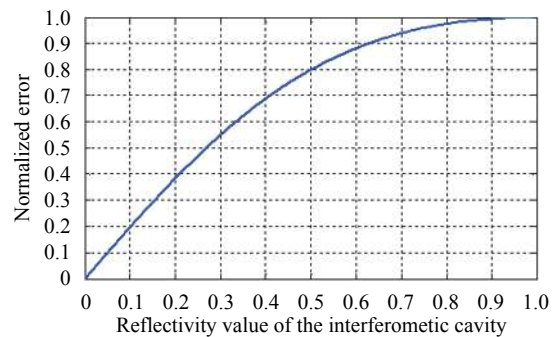


图 6 干涉腔反射率对干涉条纹调制度的影响曲线

Fig.6 Relation curve between reflectivity of interferometric cavity and modulation of interference fringes

3 变间隙 F-P 干涉仪干涉腔反射率与目标函数

由于干涉条纹调制度是随着变间隙 F-P 干涉仪干涉腔反射率变化的递增函数,为综合考虑干涉条纹的正弦性和调制度,从而选取最佳的反射率值,文中采用图 5 所示曲线的倒数表示干涉条纹的正弦性,用 K_{\sin} 表示,最终确定的目标函数为:

$$Z(R) = K_{\sin}(R) \times M(R) \quad (7)$$

当目标函数最大时,对应的干涉腔反射率值为最佳值。

图 7 显示了干涉条纹的正弦性、调制度和目标函数随干涉腔反射率变化的曲线。可以看出,当反射率值为 0.37 时,目标函数值最大为 0.5997。在长波红外波段,材料铯的反射率约为 0.4,与 0.37 较为接近,可直接作为变间隙 F-P 干涉仪的材料。

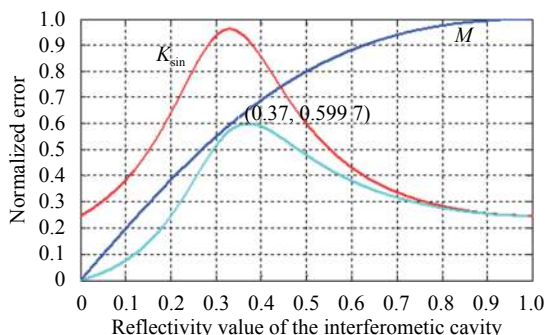


图 7 干涉腔反射率对目标函数的影响曲线

Fig.7 Influence of the reflectivity of interferometric cavity on target function

4 实验验证

根据实验室现有条件,搭建了长波红外变间隙 F-P 干涉光谱成像系统实验样机^[9]。整个样机系统的波长响应范围为 8~12 μm 。干涉仪的楔角为 46 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,楔板和平行平板的材料均为铯,在 8~12 μm 波段范围内反射率为 40%;选用的探测器为像素尺寸 17 μm ,像素数为 640×480 的长波红外制冷热像仪。

图 8 为所述系统对二氧化碳激光光源的单色光波段响应。二氧化碳激光光源是由二氧化碳激光器和积分球构成的均匀光源,可直接对单帧图像提取干涉条纹,如图 9 所示,进行切趾、相位校正等相关处理

后,最终进行傅里叶变换,可得二氧化碳激光的光谱曲线,参考图 10。

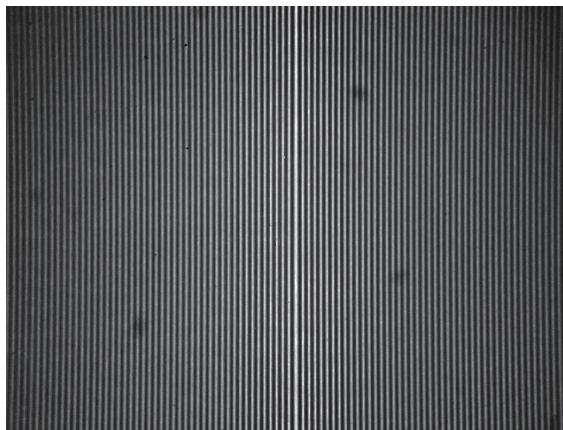


图 8 系统对二氧化碳激光均匀光源响应干涉图

Fig.8 Interference pattern for the uniform CO₂ laser source from the system

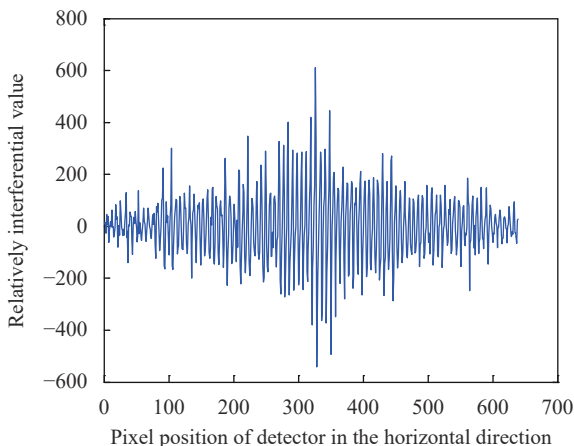


图 9 二氧化碳激光光源干涉信息

Fig.9 Interferometric information from the CO₂ laser source

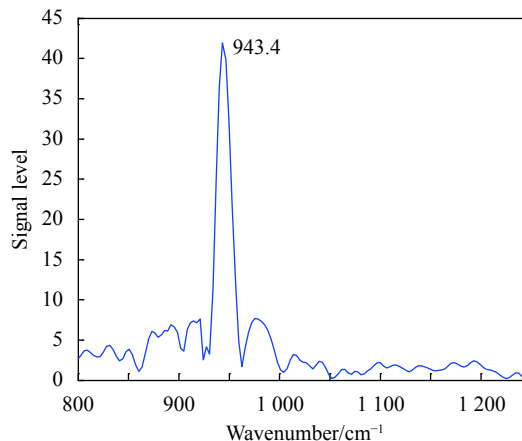


图 10 二氧化碳激光的光谱曲线

Fig.10 Spectrum curve of the CO₂ laser

二氧化碳激光波长是 $10.6\ \mu\text{m}$, 即 $943.4\ \text{cm}^{-1}$, 由图 10 可以看出经过标定后系统的波长位置完全准确, 可确定样机的采样步长^[10]为 $1.96\ \mu\text{m}$, 由此得到光谱分辨率为 $15\ \text{cm}^{-1}$, 相近于理论计算值 $12\ \text{cm}^{-1}$ 。

5 结 论

干涉条纹是干涉式光谱成像系统最直接的信号源, 是系统数据处理的基础, 干涉仪干涉腔反射率值如选择不当, 必将严重影响整个光谱成像系统的性能。实验中, 利用激光光源波长位置确定的特性, 通过对二氧化碳激光光源的测量, 验证了文中系统复原光谱的准确性, 并从关键设计参数, 光谱分辨率的角度说明了文中相关理论分析的正确性。同时, 验证了变间隙 F-P 干涉式光谱成像系统方案原理的可行性。

此外, 探测器大小、成像物镜焦距和视场、干涉仪的面形精度及系统装配工艺等相关因素, 也将影响反演光谱的分辨率精度, 这将成为后续长波红外变间隙 F-P 干涉光谱成像系统的研究重点。

参考文献:

- [1] 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)
- [2] Li Jie, Zhu Jingping, Zhang Yunyao, et al. Spectral zooming birefringent imaging spectrometer [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(2): 024205. (in Chinese)
- [3] 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)
- [4] 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)
- [5] 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)
- [6] Li Yu, Gao Jiaobo, Meng Hemin, et al. Fast inversion techniques of interferogram imaging spectrum based on CUDA [J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(3): 415-419. (in Chinese)
- [7] Lucey Paul G, Akagi Jason. A fabry-perot interferometer with a spatially variable resonance gap employed as a Fourier transform spectrometer[C]//Proceedings of SPIE, 2011, 8048: 80480K.
- [8] Bai Caixun, Li Jianxin, Meng Xin, et al. Hyperspectral imaging based on symmetric wedge interferometric cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(8): 0811002. (in Chinese)
- [9] Zhang Fang, Gao Jiaobo, Wang Nan, et al. A LWIR imaging spectrometer employing a variable gap Fabry-Perot interferometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 40(3): 0318001. (in Chinese)
- [10] Meng Hemin, Gao Jiaobo, Zheng Yawei, et al. Long-wave infrared interferential imaging spectroscopy system based on split-type Sagnac interferometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 19-25. (in Chinese)