

文章编号: 1002-2082 (2021) 03-0494-05

变间隙法布里-珀罗干涉仪光程差线性分析

韩 军¹, 高 波¹, 张 芳², 高教波²

(1. 西安工业大学 兵器科学与技术学院, 陕西 西安 710021; 2. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘 要: 对于变间隙法布里-珀罗 (F-P) 干涉式成像光谱仪, 空间干涉信息是否按光程差等间隔采样, 即光程差与探测器像元位置之间是否是线性变化关系, 直接决定了光谱数据处理的难易程度。经分析, 变间隙法布里-珀罗干涉式光谱成像系统的光程差是干涉仪分光产生的两艾里斑的中心距离的函数, 而两艾里斑中心距与探测器像元位置并非一直保持线性关系, 与干涉仪楔角的取值有关。研究了不同楔角条件下光程差与探测器像元位置之间的关系曲线, 结果表明, 在任意楔角下, 光程差与探测器阵列像元位置之间均保持良好的线性关系。长波红外变间隙 F-P 干涉式光谱成像系统与高精度光谱辐射计测得的特征峰位置重合度达 100%。

关键词: 光谱成像系统; 光程差; 艾里斑; 法布里-珀罗干涉仪; 变间隙

中图分类号: TN206

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202142.0302007

Linear analysis of optical path difference of variable-gap Fabry-Perot interferometer

HAN Jun¹, GAO Bo¹, ZHANG Fang², GAO Jiaobo²

(1. School of Defence Science and Technology, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China;

2. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: For the variable-gap Fabry-Perot (F-P) interferometric imaging spectrometer, whether the spatial interference information is sampled at equal intervals of optical path difference (OPD), that is, whether the relationship between optical path difference and detector pixel position is linear, directly determines the difficulty of spectral data processing. After analysis, the OPD of the variable-gap F-P interferometric imaging system was the function of the centre distance of two Airy disks produced by the beam split of the interferometer. However, the centre distance of two Airy disks did not always maintain a linear relationship with the detector pixel position, which was related to the value of the wedge angle of the interferometer. The relationship between optical path difference and detector pixel position under different wedge angle conditions was studied. The results show that there is a good linear relationship between optical path difference and detector array pixel position at any wedge angle, and the position contact ratio of characteristic peak measured by long wave infrared spectral imaging system with variable-gap F-P interference and spectral radiometer with high precision reaches to 100%.

Key words: spectral imaging system; optical path difference; Airy disk; Fabry-Perot interferometer; variable-gap

引言

变间隙法布里-珀罗 (F-P) 干涉仪^[1-5] 作为干涉式光谱成像系统的新型分光器件, 真正有效地实现了系统体积的小型化和系统结构的紧凑化, 尤其在长波红外波段, 已成为研究热点。

一般地, 变间隙法布里-珀罗 (F-P) 干涉式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

收稿日期: 2021-01-12; 修回日期: 2021-03-04

基金项目: 装备预先研究项目

作者简介: 韩军 (1966—), 男, 博士, 教授, 主要从事先进成像探测、光电信息处理技术研究. Email: hanjun513@126.com

平板构成,具体结构如图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。

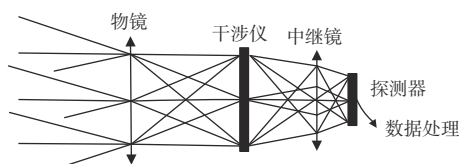


图1 变间隙 F-P 干涉式光谱成像系统

Fig. 1 Variable-gap F-P interferometric spectral imaging system



图2 变间隙 F-P 干涉仪结构图

Fig. 2 Structure diagram of variable-gap F-P interferometer

变间隙干涉式光谱成像系统采用快速傅里叶变换方法对其获取的干涉信息进行解调,最终获取目标的光谱信息。但该方法要求探测器上不同像元对应的光程差等间隔变化。经分析,探测器上不同像元对应的光程差是系统的艾里斑中心距的函数,而在一定楔角大小条件下,艾里斑中心距随探测器位置的变化是非线性的。本文的主要目的是分析当艾里斑中心距随探测器位置非线性变化时,由此产生的不同像元对应的光程差是否对系统的光谱数据解调结果有影响。

1 光程差与两艾里斑中心距

变间隙法布里-珀罗(F-P)干涉腔反射面的反射率,相较于经典F-P干涉仪^[6-11]较低,可以不考虑干涉腔内高级次光束对干涉强度的影响,只考虑前两级透射光束的干涉问题。因此,物点光束通过变间隙F-P干涉仪在其出射面上会形成两个艾里斑。由于干涉仪厚度较小,且两干涉腔相对干涉仪中心棱对称,图3仅显示了干涉腔一侧的内部光路。图3中,点 S_1 、点 S_2 分别为第一、二级透射光束产生的艾里斑中心点; α 为干涉仪楔角; β 为第一级透射光在干涉腔下表面上产生的入射角;点 S_1 与点 S_2 之间的距离为两干涉光束产生的两艾里

斑中心距 d ;点 S_1 距中心点 O (中心棱上的点)之间距离为入射光束在干涉腔出射面上对应的入射点至中心棱之间的距离 x ; y_1 和 y_2 分别对应两条光线的光程。

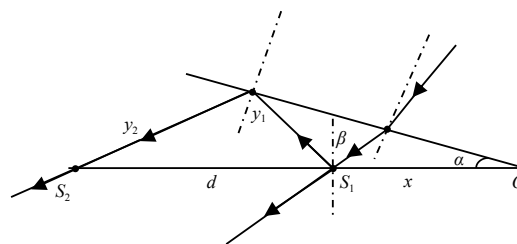


图3 两干涉光束之间光程差计算示意图

Fig. 3 Schematic diagram of optical path difference calculation between two interference light beams

根据几何关系,图3中两干涉光束对应的光程差为

$$y_1 + y_2 = \frac{x \sin \alpha - 2d \sin \alpha}{\cos(\alpha + \beta)} \quad (1)$$

由(1)式可以看出,不同位置处的探测器像元(取决于 x 值)接收到的两干涉光束的光程差与系统两艾里斑中心距 d 有关。

2 变间隙 F-P 干涉仪楔角与两艾里斑中心距

不同视场光线经过干涉仪的具体光路如图4所示。以楔形平板的中心棱为对称中心,图中仅显示了中心棱单侧的光路,另一侧与其对称分布。入射光的视场角为 θ ,经过楔形板平面第一次折射后的折射角为 θ_1 ,到达楔形板楔形出射面的入射角为 θ_2 ,经过折射,在干涉腔内的折射角为 θ_3 ,到达平行平板的入射角为 β 。第一束出射光线产生的艾里斑中心点为 S_1 ,在干涉腔内经过两次反射后出射的第二束光线产生的艾里斑中心点为 S_2 ,由于平行平板较薄,图4中将两艾里斑中心点简画在平行平板在干涉腔内的反射面上。

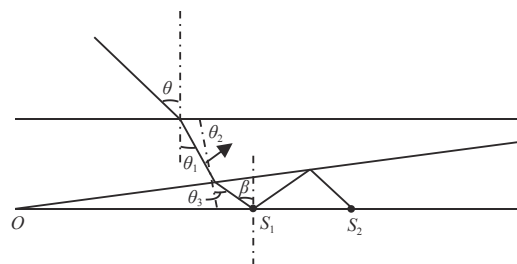


图4 艾里斑形成光路图

Fig. 4 Optical path diagram of formation for two Airy disks

光线到达楔形平板后要经过2次折射才能进入干涉腔,根据折射定率,不同视场角对应的折射角不同,且楔角大小不同,对应光线的折射方向也会发生改变,最终在平行平板出射面上形成的两个艾里斑中心距 S_1 、 S_2 也会随之改变。

假定长波红外变间隙F-P干涉式光谱成像系统的中继镜垂轴放大率为1:1,干涉仪材料为锗,根据折射定率,可以得到不同楔角下,探测器不同像元位置处艾里斑中心距大小,如图5所示,以变间隙F-P干涉仪中心对称棱在探测器上对应的位置为零位。图5中,每条曲线对应不同的楔角,自下而上楔角大小从10 mrad至50 mrad,每隔5 mrad为一个值。从图上可以看出,当楔角大于等于25 mrad时,艾里斑中心距与探测器像元距零点位置的距离呈线性关系;当楔角小于25 mrad时,艾里斑中心距与探测器像元距零点位置的距离呈非线性关系(这是由楔角与视场角相对大小变化引起的)。此外,随着楔角的增大,探测器阵列相同位置对应的艾里斑中心距不断增大,若中心距大于截止尺寸(当中继镜的垂轴放大率为1:1时,探测器像元大小为艾里斑中心距的截止尺寸,艾里斑中心距的具体截止尺寸与中继镜垂轴放大率的实际值有关),则该像元位置无法产生干涉条纹,且成像质量不佳。因此,需要考虑艾里斑中心距随探测器位置非线性变化时,不同像元对应的光程差是否线性变化。

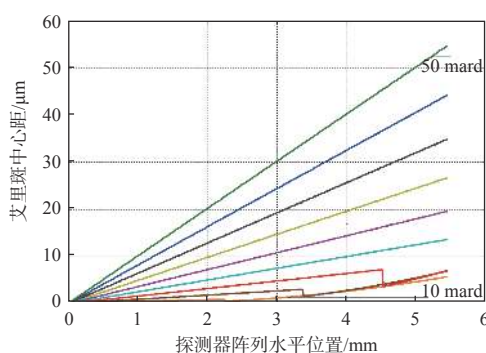


图5 艾里斑中心距与像元位置关系曲线

Fig. 5 Curves of relationship between centre distance of Airy disk and pixel position

依据(1)式可以得到光程差与探测器阵列像元距零点位置的距离之间的线性关系,如图6所示。

图6表明,对于不同楔角大小,无论艾里斑中心距与探测器像元距零点位置的距离是否呈线性关系,光程差与探测器像元距零点位置的距离始

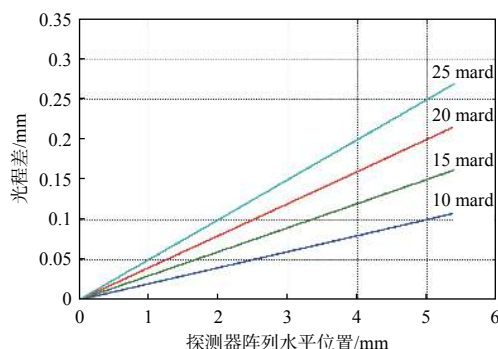


图6 光程差随探测器像元位置的变化曲线

Fig. 6 Changing curves of optical path difference with detector pixel position

终呈线性关系,并不会影响变间隙F-P干涉式光谱成像系统光谱数据的解调准确性。

3 实验验证

综上所述,选取楔角 α 大小时,只需根据图5,使得所选楔角大小对应的艾里斑中心距小于探测器所能分辨的最小空间单元尺寸即可,无需考虑所选楔角大小对应的艾里斑中心距与探测器阵列像元距零点位置的距离是否呈线性关系。

根据实验室现有条件,搭建了变间隙F-P干涉式光谱成像系统实验样机^[12]。整个样机系统的波长响应范围为 $8\text{ }\mu\text{m}\sim 12\text{ }\mu\text{m}$ 。干涉仪的楔板和平行平板的材料均为锗,在 $8\text{ }\mu\text{m}\sim 12\text{ }\mu\text{m}$ 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。

首先,系统拍摄50℃面黑体的干涉图。然后,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,得到含有薄膜光谱特征的干涉图。分别从上述两干涉图提取干涉条纹,进行切趾、相位校正等处理,最终进行傅里叶变换^[13-15],并对最终的光谱数据进行数学处理,得到聚丙烯薄膜的光谱透过率曲线,如图7中红色曲线所示。

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,对比曲线如图7蓝色曲线所示。

通过比较两光谱曲线,可以确定样机的采样步长为 $1.95\text{ }\mu\text{m}$,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。从图7可以看出,变间隙F-P干涉式光谱成像系统得到的光谱曲线不仅形状与高精度光谱辐射计得到的光谱曲线相

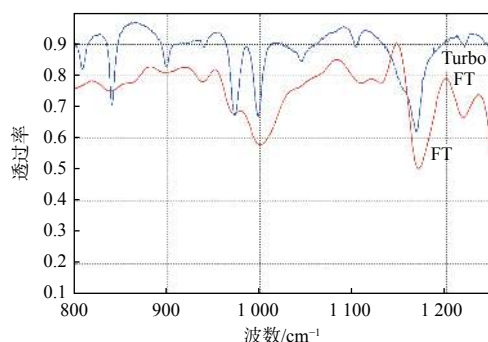


图7 聚丙烯薄膜透过率曲线

Fig. 7 Curves of polypropylene film transmittance

同,而且二者在 $1\,000\text{ cm}^{-1}$ 、 $1\,175\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\,220\text{ cm}^{-1}$ 等附近的特征峰位置完全相符。

4 结论

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。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。实验结果中,系统实际光谱分辨率与理论设计值的偏差,与系统中各成像光学部件的成像质量、干涉仪的面形精度,以及系统的装配精度等相关因素均有关系。

图5表明,楔角为 15 mrad 时,艾里斑中心距与探测器阵列像元距零点位置的距离呈非线性关系,但从上述实验结果可以看出,此时光程差与探测器阵列像元距零点位置的距离仍保持线性关系,并不影响变间隙法布里-珀罗干涉式长波红外光谱成像系统的光谱数据解调精度。这是由于干涉仪楔角值较小,削弱了艾里斑中心距对不同像元处干涉光束之间的光程差的影响。

参考文献:

- [1] DONG Ying, XIANG Libin, 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.
- [2] LI Jie, ZHU Jingping, ZHANG Yunyao, et al. Spectral zooming birefringent imaging spectrometer[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(2): 024205.

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.

- [3] MENG Hemin, GAO Jiaobo, et al. Design and validation of infrared interferential imaging spectrometer with high flux[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(11): 2093-2098.
孟合民, 高教波, 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.
- [4] LUCEY P G, HINRICHS J L, AKAGI J. A compact LWIR hyperspectral system employing a microbolometer array and a variable gap Fabry-Perot interferometer employed as a Fourier transform spectrometer[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8390: 83900R1-8.
- [5] LUCEY P G, AKAGI J. A Fabry-Perot interferometer with a spatially variable resonance gap employed as a Fourier transform spectrometer[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8048: 80480K1-9.
- [6] HEIKKI S, VILLE V A. Novel miniaturized hyperspectral sensor for UAV and space application[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 74741M: 1-12.
- [7] BORN M, WOIF E. Principles of optics[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2009: 324-333.
玻恩, 沃尔夫. 光学原理. 北京: 电子工业出版社, 2009: 324-333.
- [8] SMITH W L, REVERCOMB H E, ZHOU D K, et al. Geostationary imaging Fourier transform spectrometer (GIFTS): science applications[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6405: 64050E1-13.
- [9] LUCEY P G, AKAGI J, BINGHAM A L, et al. A compact Fourier transform imaging spectrometer employing a variable gap Fabry-Perot interferometer[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9101(10): 1-8.
- [10] LUCEY P G, HORTON Keith, WILLIAMS T. Performance of a long-wave infrared hyperspectral imager using a sagnac interferometer and an uncooled microbolometer array[J]. Applied Optics, 2008, 47(28): 107-113.
- [11] ALESSANDRO B, DONATELLA G, CINZIA L, et al. Theoretical aspects of Fourier transform spectrometry and common path triangular interferometers[J]. Optics Express, 2010, 18(11): 11622-11649.
- [12] 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): 210-216.

- 张 芳, 高教波, 王 楠, 等. 变间隙法布里-珀罗干涉式长波红外光谱成像系统[J]. 红外与激光工程, 2017, 40(3): 210-216.
- [13] LI Suning, ZHU Rihong. Method of reconstruction on Fourier-transform spectroscopy[J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(2): 268-272.
- 李苏宁, 朱日宏. 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.
- [14] 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.
- 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.
- [15] LI Yu, GAO Jiaobo. Fast inversion techniques of inteferogram imaging spectrum based on CUDA[J]. Journal of Applied Optics, 2014, 35(3): 414-418.
- 李宇, 高教波. 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): 414-418.