

空间外差光谱仪干涉条纹调制度影响分析

罗海燕¹ 叶擎昊² 熊 伟¹ 李志伟¹ 李 双¹ 施海亮¹

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031

²上海卫星工程研究所, 上海 200240

摘要 空间外差光谱仪(SHS)所获取的干涉图像需经过傅里叶变换才能得到光谱信息。频域光谱的信噪比和光谱信号的质量很大程度上取决于干涉条纹调制度。针对干涉条纹调制度的影响因素进行了定量理论分析,包含分束器分束特性、光学系统像差(干涉组件面形误差、准直镜头输出面形误差及成像镜头调制传递函数曲线)、扩展光源及像元大小等。实验证明,空间外差光谱仪样机复原光谱实测结果与理论计算一致性较好,对干涉条纹调制度的定量分析为干涉型光谱仪各功能组件的设计提供了理论依据。

关键词 测量; 空间外差光谱仪; 调制度; 干涉条纹; 信噪比

中图分类号 O433.4 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0712003

Study on the interferogram modulation efficiency of Spatial Heterodyne Spectrometer

Luo Haiyan¹ Ye Qinghao² Xiong Wei¹ Li Zhiwei¹ Li Shuang¹ Shi Hailiang¹

¹Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

²ShanghaiInstitute of Satellite Engineering, Shanghai 200240, China

Abstract The spectral information of interferogram is obtained by Fourier transforms with spatial heterodyne spectrometer (SHS). So the spectrum signal to noise ratio and spectrum quality are directly influenced by interferogram modulation efficiency. In view of the influence factors of interference fringe modulation is carried on the theory of quantitative analysis, including splitting characteristics of beam splitter, aberrations of optical system (surface wavefront error of interferometer elements, output wavefront error of collimating lens and modulation transfer function curve of imaging lens), the extended source and pixel size of detector. Experimental result show that the measured result of recovering spectra by the SHS instrument is in agreement with the theoretical calculation. Quantitative analysis of the interference fringe modulation for interferometric spectrometer provides theory basis for the design of each function module.

Key words measurement; spatial heterodyne spectrometer; modulation efficiency; interference fringe; signal to noise ratio

OCIS codes 120.4570; 120.4820; 280.4788; 300.6320

1 引 言

空间外差光谱技术凭借其光通量大、无运动部件、结构紧凑、适用于任何波段、可利用全反射式实现等^[1-3]优势,自 20 世纪 90 年代 Roesler 和 Harlander 等进行研究工作以来,经过多年发展,美国、加拿大、法国、中国等国家,主要从大气微量气体的遥感探测、暗星际物质的天文观测等方面积极开展空间外差光谱技术的应用研究工作。2002 年,Harlander 等^[4-5]研制的 SHIMMER 搭载 STPSat-1 实验卫星针对中高层 34~96 km 大气层 OH 自由基进行全球探测,其测试结果与光化学反应模型相当吻合。加拿大航天局(CSA)也

收稿日期: 2016-01-08; **收到修改稿日期:** 2016-03-21

基金项目: 国家自然科学基金(41301373)、中国科学院合肥物质科学研究院青年人才专项(Y03RC21123)

作者简介: 罗海燕(1982-)女,博士,助理研究员,主要从事超高光谱遥感探测器光机设计技术方面的研究。

E-mail: luohaiyan@aiofm.ac.cn

于 2005 年进行 SHOW 项目的探测实验^[6-7],并对 14 km 大气层中的水汽的观测和理论对比数据进行了详细阐述。中国科学院安徽光学精密机械研究所于 2006 年开始进行空间外差光谱技术研究^[8-11],主要用于高光谱气候与资源环境监测。

空间外差光谱技术以两臂光栅衍射和空间干涉的方式进行调制,通过不同波长对应的出射波面夹角来获得不同空间频率的干涉条纹。干涉条纹的调制度高低直接影响复原光谱的失真程度,本文研究干涉条纹的调制度,尤其是在对光谱信息的定量反演中的应用尤为重要。

2 调制度定义

空间外差光谱仪原理如图 1 所示,一定数值孔径的光源经准直镜 L1 转化为平行光束,入射至分束器,分光后成为理论上能量相等的两束相干光,经两臂光栅衍射后返回,并在光栅面附近形成定域干涉条纹,最后经成像镜(L2,L3)比例缩放后由探测器接收。

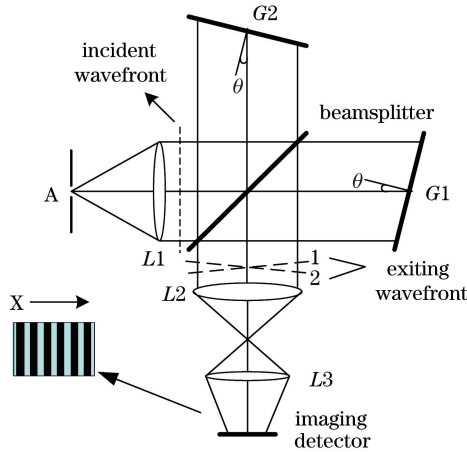


图 1 空间外差光谱仪原理图
Fig. 1 Schematic diagram of SHS

空间外差光谱仪本质上遵循双光束干涉原理,仅考虑色散方向上单色光 σ 入射时两臂波矢量产生的干涉强度可表述为

$$I(x, f_\sigma) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(2\pi x f_\sigma), \quad (1)$$

$$f_\sigma = 4(\sigma - \sigma_0) \tan \theta_L, \quad (2)$$

式中 I_1, I_2 是经分束器后两束光波的辐射强度, x 表示色散方向上相对零光程差点的坐标, f_σ 表示波数下对应的空间干涉条纹频率, σ_0 表示参考波数,即在该波长输入条件下,光栅衍射角为 0,光波依照 θ_L 角原光路返回,此时干涉条纹频率为零。因此,单色光照明条件下,干涉调制度定义为

$$M_{\text{mono}} = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}}, \quad (3)$$

式中 $I_{\text{max}}, I_{\text{min}}$ 分别为干涉信号的极大值和极小值。复色光照明条件下,两臂波矢量产生的干涉强度表达式为

$$I(x) = \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(2\pi x f_\sigma) d\sigma, \quad (4)$$

干涉调制度定义为

$$M_{\text{poly}} = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{avg}}}{I_{\text{avg}}}, \quad (5)$$

式中 I_{avg} 为干涉信号直流分量平均值。

理想条件下,单色光与复色光干涉图调制度均为 1。工程实现过程中,由于受分束器镀膜水平、光学系统像差(包含准直系统的安装精度和出射波前误差、干涉仪组件面形误差及成像系统离焦、MTF 曲线下降

等)、扩展光源及探测器采样密度和间隔等参数的影响,上述因素都会在不同程度上对干涉条纹调制度产生影响。因此,所描述的振动均是部分相干现象,即 $0 < M < 1$ 。

3 调制度影响因素理论分析

3.1 分束特性的影响

由空间外差干涉原理,即如图 2 所示的空间外差干涉仪组件的光路追迹形式可知,分束器对空间外差光谱仪(SHS)性能的影响主要体现在能量和干涉信号调制度两方面。对于分束膜透射率 t 和反射率 r 的分束特性,光栅衍射效率相等的条件下,其两臂出射波矢量表达式分别为

$$\begin{cases} I_1(\sigma) = A(\sigma) \cdot t_1(\sigma) \cdot \cos(2\pi\sigma x\beta_1) \\ I_2(\sigma) = A(\sigma) \cdot t_2(\sigma) \cdot \cos(2\pi\sigma x\beta_2) \end{cases} \quad (6)$$

式中 $A(\sigma)$ 为场强振幅, β_1 、 β_2 分别为两束光出射波面相对入射波面的夹角, t_1 、 t_2 分别为两路光因干涉仪组件引起的振幅衰减因子。由上述可得干涉图表达式为

$$I(\sigma) = \|\tau(\sigma)A(\sigma)\|^2 \{1 + M(\sigma)\cos[2\pi\sigma x(\beta_1 - \beta_2)]\}, \quad (7)$$

可得振幅影响因子为

$$\|\tau(\sigma)\|^2 = 2t \cdot r, \quad (8)$$

调制度影响因子为

$$M(\sigma) = \frac{2t \cdot r}{t \cdot r + t \cdot r}. \quad (9)$$

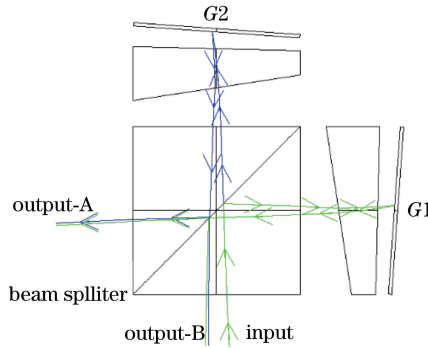


图 2 空间外差干涉仪组件光路追迹
Fig. 2 Ray trace of the SHS interferometer

相比于三角共路型或萨尼亚克型干涉仪调制度影响因子

$$M'(\sigma) = \frac{2t \cdot r}{t \cdot t + r \cdot r}, \quad (10)$$

可知,分束器的非等比分束特性影响输入至探测器的有效信号,并不会影响 SHS 型干涉仪的调制度,而对于三角共路型干涉仪则会使其干涉调制度降低^[12]。

3.2 光学系统像差的影响

3.2.1 干涉仪组件面形误差

根据空间外差干涉原理可知,理想波面经过具有波前误差 $h'(z)$ 的干涉仪组件后,其干涉强度表达式为

$$I(z) = B(\sigma) \{1 + M_{IN} \cos[2\pi\sigma' u - \pi\sigma' h'(z)]\}, \quad (11)$$

式中 $B(\sigma)$ 为光谱响应振幅因子,光程差 $u = 4x \tan \theta_L$, 外差波数 $\sigma' = \sigma - \sigma_0$, 可知,干涉仪组件面形误差产生的调制度影响因子表达式为

$$M_{IN} = \sin[\pi\sigma' h'(z)] / [\pi\sigma' h'(z)], \quad (12)$$

故调制度影响因子是关于干涉仪组件面形误差 $h'(z)$ 的 sinc 函数,如图 3 所示,其中,横坐标为面形误差与工作波长的比值。

相比迈克耳孙干涉仪面形误差对调制度的影响,干涉仪组件面形误差由于受其差频波数 σ' 的影响,其

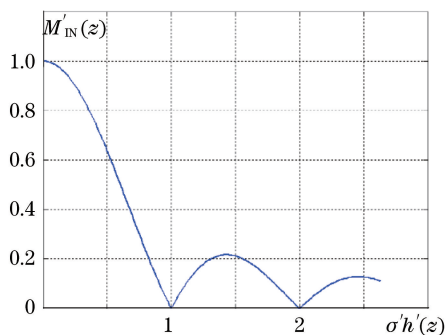


图 3 干涉仪组件面形对调制度的影响曲线

Fig. 3 Effect of interferometer wave front error on modulation efficiency

制造误差相比迈克耳孙干涉仪元件面形误差要求较低。迈克耳孙干涉仪存在波前误差 $h'(z)$ 时,干涉图及调制度影响因子表达式分别为^[13]

$$I'(z) = B(\sigma) \{1 + M'_{IN} \cos[2\pi\sigma u - \pi\sigma h'(z)]\}, \quad (13)$$

$$M'_{IN} = \frac{1}{\pi\sigma h'(z)} \sin[\pi\sigma h'(z)]. \quad (14)$$

3.2.2 准直系统输出波前误差

准直系统功能是为干涉仪组件提供具有一定视场角的平行光,经分束器分光和光栅衍射后形成具有一定波面夹角的两束相干光波,因此输入波前误差理论上可通过空间外差原理得到补偿,即准直系统输出波前误差理论对干涉调制度不会产生影响。然而,准直系统相对干涉仪组件的安装误差,使得光源扩展入射至干涉仪组件的平行光视场角增大,同样会对调制度产生一定的影响。

3.2.3 成像系统像差

当光学系统存在像差时,衍射图像中心亮斑(艾里斑)所占的光强要比理想成像时有所下降。根据惠更斯-菲涅耳原理,点光源 S 对 P 点的作用,物点发出的光波经光学系统后在像面处不再是理想的球面波,像差通过波前相位的变化反应出来。成像系统像差对干涉调制度影响主要表现在能量分布和不同空间频率下的调制传递函数(MTF)两方面。

图 4 为物点分别在光轴、10.6 mm 和 15 mm 高度处成像系统能量分布曲线,当采用 $13 \mu\text{m}$ 像元大小的探测器进行接收时,干涉条纹经成像系统后能量重新分配,像差使得理想干涉图极大值降低为原理的 82%,剩余能量分配在周边像元点上,即理想干涉图极小值由 0 增大为 2.25%,对应的干涉调制度降低为 0.95。

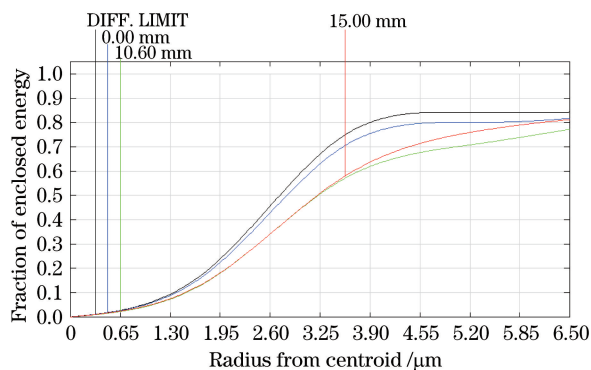


图 4 SHS 成像系统能量分布

Fig. 4 Energy distribution of SHS imaging system

成像系统对定域面内的不同空间频率的干涉条纹比例缩放,最终成像在探测器面上。因此,成像系统 MTF 曲线对干涉调制度的影响关系为

$$I(z) = B(\sigma) [1 + M_{con} \cos(2\pi\sigma' u)], \quad (15)$$

不同波长对应的像面的空间频率为

$$f_{\sigma} = \frac{1}{k} \cdot 4(\sigma - \sigma_0) \tan \theta_L, \quad (16)$$

式中 k 为成像系统缩放比, M_{con} 为不同空间频率下对应的对比度, 即 MTF 曲线。对于具有如表 1 所示参数的 SHS 系统, 输入波长分别为 769 nm 和 772 nm 时, 对应空间频率分别为 30.93 lp/mm 和 38.55 lp/mm, 根据如图 5 所示的成像系统对比度曲线, 上述两单色光对应的干涉调制度由理想 1 分别降低为 0.757 和 0.691。

表 1 SHS 系统参数表

Table 1 Design index of SHS system

No.	Parameter	Performance index
1	Littrow wavelength	757 nm
2	Groove density	600 L/mm
3	Littrow angle: θ_L	13.126°
4	Magnification: k	0.621
5	Spectral resolution	0.5 cm ⁻¹
6	Detector	1024 × 1024 @ 13 μm
7	FOV of interferometer	+/- 1.24°

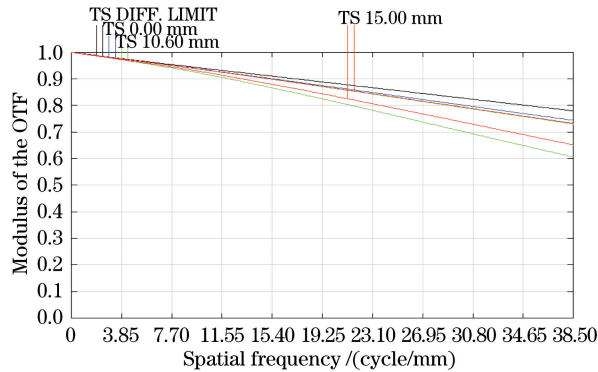


图 5 SHS 成像系统 MTF 曲线

Fig. 5 MTF curve of SHS imaging system

复原光谱很大程度上取决于干涉条纹的调制度曲线, 假设光学系统光谱响应因子为 η_{σ_i} , 则复色光调制度公式为

$$M_{\text{poly}} = \frac{\sum_{i=1}^N \eta_{\sigma_i} M_{\sigma_i}}{\sum_{i=1}^N \eta_{\sigma_i}}. \quad (17)$$

当系统对较宽光谱范围内要求的信噪比均较高时, 高空间干涉条纹频率对应的光谱强度的降低会严重影响信噪比指标。上述系统整个波段内(757~772 nm), 忽略光学系统光谱响应, 复原光谱理论的归一化信噪比变化范围为 1~0.691。复色光在零光程差点无相位差条件下, 理想点光源入射最终形成的干涉条纹调制度约为 0.846。

3.3 像元大小的影响

理想条件下像面应是对无限小单元连续采样, 事实上受限于探测器像元大小和采样间隔, 实际干涉图像调制度成为关于探测器像元尺寸的函数。设探测器像元大小为 t , 则色散方向上相邻两像元对应的光程差为

$$\Delta_t = 4(x_2 - x_1) \tan \theta_L, \quad (18)$$

探测器面相邻两像元间距 t 表达式为

$$t = (x_2 - x_1) \cdot k, \quad (19)$$

故存在如下关系:

$$\Delta_t = 4(x_2 - x_1) \tan \theta_L = 4 \frac{t}{k} \tan \theta_L, \quad (20)$$

因此单色光 σ 入射至 SHS, 对于缩放比 $k=1$ 的成像系统, 在探测器某单元接收的干涉强度表达式为

$$I_t(\sigma) = B(\sigma) \left[1 + \frac{1}{\Delta_t} \int_{x_1}^{x_2} \cos(2\pi\sigma' 4x \tan \theta_L) dx \right], \quad (21)$$

略去常数项可知:

$$I_t'(\sigma) = B(\sigma) M_t \cos(2\pi\sigma' 4\Delta_t \tan \theta_L), \quad (22)$$

式中像元大小产生的调制影响因子表达式为

$$M_t = \text{sinc} \left(4 \frac{t}{k} \sigma' \tan \theta_L \right), \quad (23)$$

当探测器像元大小和数目正好符合采样定理时, 单像元对最高空间频率干涉条纹的相位间隔为 π , 此时调制度为 0.637; 当单像元对应采样间隔为 0.5π 进行过采样时, 此时对应的最高空间频率干涉条纹调制度为 0.90。上述如表 1 所示系统参数, 最高空间频率干涉条纹要求不大于 0.637 时, 对应像元大小应不小于 $13 \mu\text{m}$, 此时入射光谱强度相同的复色光由于等间隔采样导致的调制度降低为 0.8726。

4 样机实测指标与理论计算讨论

实验采用白光光源, 导入积分球后在出口形成均匀准朗伯性的面光源, 入射至 SHS 样机。图 6、7 分别为 SHS 系统测试原理平台及实测原始干涉图, 原始干涉图经暗电流扣除、探测器非均匀性校正和非线性校正、干涉图像相位校正等过程, 计算每行干涉条纹的调制度, 并在空间维上进行平均, 获得干涉图平均调制度约为 0.70。

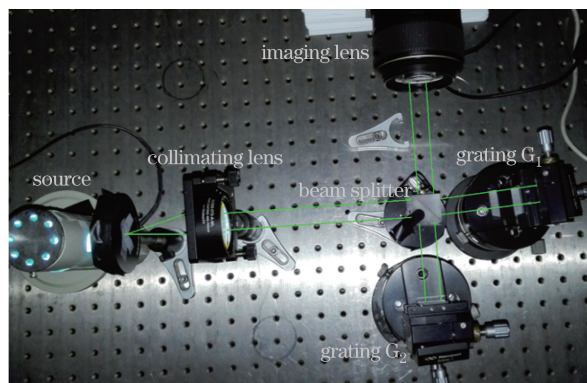


图 6 实验平台布局

Fig. 6 Experimental setup layout



图 7 原始复色光干涉图

Fig. 7 Original interferogram with polychromatic source

表 2 SHS 调制度影响因子
Table 2 Modulation effect factors of SHS

No.	Parameter	Theoretical factor
1	MTF of imaging system	0.8455
2	Pixel size	0.8726
3	Extend source	0.9342
4	Wave front error (0.1 λ)	0.9945

由表 2 可知,理论获得的复色光调制度应为 0.6854,需要指出的是,上述表 2 中探测器像元大小和成像镜头 MTF 的影响,均是以滤光片在整个波段内的透射率相同为假设前提的。事实上,当滤光片光谱曲线在长波和短波处,透射率急剧下降,尤其在长波处的透射率降低时,理论调制度因子相比表 2 中数值会变高,如 3.2.3 节复色光调制度公式中权重因子 η_{e_i} 对调制度的影响。表 2 中数据应根据实测滤光片的光谱透射率曲线和探测器光谱响应曲线进行修正。

5 结 论

依据 SHS 光谱仪系统功能组成,定量分析了干涉条纹调制度影响因素,并依据设计结果和系统参数列表,对复色光干涉调制度进行了理论计算。通过复色光干涉调制度实验,进一步验证了理论推导的合理性,实测结果与理论设计吻合。理论分析为 SHS 系统各功能组件指标的分解、系统光谱信噪比变换范围等提供了理论依据。

由于空间外差光谱仪系统组成较为复杂,各部件间的装配误差(同心度,倾斜,离焦等)和杂散光等因素都会引起调制度的下降。准直系统与干涉仪组件安装的相对角度误差,等同于扩展光源对调制度的影响;偏振特性理论上对调制度不会产生影响,但会在一定程度上降低仪器的辐射定标精度。本文仅探讨了仪器各功能组件的参数对调制度的影响,在系统装配、杂散光等方面的影响将在后续的文章中进行详细论述。

参 考 文 献

- Harlander J, Roesler F L. Spatial heterodyne spectroscopy: A novel interferometric technique for ground-based and space astronomy[C]. SPIE, 1990, 1235: 622-633.
- Feng Yutao, Sun Jian, Li Yong, *et al.* Broad-band spatial heterodyne interferometric spectrometer[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(1): 48-55.
冯玉涛, 孙 剑, 李 勇, 等. 宽谱段空间外差干涉光谱仪[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(1): 48-55.
- Smith B W, Harlander J. Imaging spatial heterodyne spectroscopy: Theory and practice[C]. SPIE, 1999, 3698: 925-931.
- Harlander J, Roesler F L, Cardon J G, *et al.* SHIMMER: A spatial heterodyne spectrometer for remote sensing of Earth's middle atmosphere[J]. Applied Optics, 2002, 41(7): 1343-1352.
- Englert C R, Stevens M H, Siskind D E, *et al.* Spatial heterodyne imager for mesospheric radicals on STPSat-1 [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2010, 115(D20).
- Lin Y, Shepherd G, Solheim B, *et al.* Introduction to spatial heterodyne observations of water (SHOW) project and its instrument development[C]. ITSC-X IV Proceedings Beijing, China, 2005: 835-843.
- Dupont F, Grandmont F, Solheim B, *et al.* Spatial heterodyne spectrometer for observation of water for a balloon flight: overview of the instrument & preliminary flight data results[C]. Fourier Transform Spectroscopy. Optical Society of America, 2015: FW4A.5.
- Li Zhiwei, Xiong Wei, Shi Hailiang, *et al.* Correction of detector response error for hyperspectral spatial heterodyne interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0530001.
李志伟, 熊 伟, 施海亮, 等. 超光谱空间外差干涉仪探测器响应误差修正[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0530001.
- Li Zhiwei, Xiong Wei, Shi Hailiang, *et al.* Study on laboratory calibration of spatial heterodyne spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0430002.
李志伟, 熊 伟, 施海亮, 等. 空间外差光谱仪实验室定标技术研究[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0430002.
- Shi Hailiang, Xiong Wei, Li Zhiwei, *et al.* Phase error correction of spatial heterodyne spectroscopy[J]. Acta Optica

Sinica, 2013, 33(3): 0330003.

施海亮, 熊 伟, 李志伟, 等. 空间外差光谱仪相位误差修正[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0330003.

- 11 Luo Haiyan, Shi Hailiang, Li Shuang, *et al.* Study on the performance indexes of spatial heterodyne spectrometer influenced by elements tolerances[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0330002.
罗海燕, 施海亮, 李 双, 等. 空间外差光谱仪干涉仪组件的容差分析[J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0330002.
- 12 Tao Ran. Theoretical study of modulation depth of Fourier transform imaging spectrometer[D]. Xi'an: Xi'an Institute Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2006.
陶 然. 干涉成像光谱仪调制度理论研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2006.
- 13 Liang Hong, Wang Peigang. Effects of low temperature on modulation efficiency of Michelson interferometer[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(4): 967-970.
梁 宏, 王培纲. 低温对迈克尔逊干涉仪干涉调制度的影响[J]. 光子学报, 2009, 38(4): 967-970.