

文章编号 1004-924X(2006)06-0959-06

# 空间外差光谱仪系统设计

叶松,方勇华,洪津,杨伟锋,乔延利

(中国科学院安徽光学精密机械研究所,安徽合肥230031)

**摘要:**围绕空间外差光谱仪系统参数设计进行了理论分析和实验研究。介绍了空间外差光谱仪系统的基本结构和原理,并针对其光学系统设计,详述了系统的主要指标:光谱分辨率极限、分辨能力、光谱范围与关键光学器件:光栅、探测器、成像系统等参数的匹配关系。给出了一个完整的系统参数设计实例,并根据光学系统参数对干涉图进行了理论仿真。以搭台的方式建立空间外差光谱仪原理试验装置,并进行了典型光谱实验验证,系统检测结果表明光谱分辨能力在591 nm达到了17 700,光谱范围为574~591 nm。实验结果与仿真结果比较还表明,系统的光谱范围、光谱分辨率等指标达到了设计要求,验证了设计方法的可行性。

**关键词:**空间外差光谱仪;系统设计;参数设计;傅里叶变换光谱

**中图分类号:**TP752;TH744.1 **文献标识码:**A

## System design of spatial heterodyne spectrometer

YE Song, FANG Yong-hua, HONG Jin, YANG Wei-feng, QIAO Yan-li

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Hefei 230031, China)

**Abstract:** This paper analyses and studies the parameter design of a Spatial Heterodyne Spectrometer (SHS). The basic concept and structure of SHS is described and the dependence of resolution limit, power of resolution and spectral range on some critical parameters of optical components including grating parameters, pixels of detector, image lens and so on is introduced. By taking an integrated system design for example, the simulated result is presented. SHS system built and tested in the laboratory, the basic concepts and performance characteristics of the technique have been verified. Experimental results show that the achieved resolving power of the SHS system is 17 700 at 591 nm, and the spectral range is 574~591 nm. These results are coincident with the theoretical results well.

**Key words:** Spatial Heterodyne Spectrometer(SHS); system design; parameter design; Fourier-transform spectroscopy

## 1 引言

空间外差光谱技术(SHS: Spatial Hetero-

dyne Spectroscopy)是近年来快速发展的一种新型超分辨光谱技术。1971年,Dohi与Susuki<sup>[1]</sup>采用全息胶片作为探测器进行空间外差光谱技术的实验研究,即提出了该技术的概念。由于空间

外差光谱技术在大气遥感、天文观测等领域有独到之处,从上世纪 90 年代起,美国、加拿大等国家都积极发展空间外差光谱技术。1991 年,美国 Harlander<sup>[2,3]</sup> 研制了首台空间外差光谱实验室样机后,立即获得美海军、NASA 等单位的重视,并在星际暗物质探测<sup>[4,5,6]</sup> 和中高层大气羟基光化学过程研究<sup>[7]</sup> 中首获支持。美国的第一代中层大气羟基空间外差光谱成像仪 SHIMMER<sup>[8]</sup> (Spatial Heterodyne Imager for Mesospheric Radicals) 已于 2002 年 8 月进行了航天飞机试验,第二代系统计划于 2006 年 7 月和 2006 年 9 月分别搭载空间试验计划卫星 (STPSat-1) 和中层大气冰物理卫星 (AIM) 升空<sup>[9]</sup>。加拿大发展的大气层水汽空间外差观测系统 SHOW (Spatial Heterodyne Observations of Water) 也计划于 2006 年 4 月完成样机<sup>[10]</sup>。中国科学院安徽光机所于 2005 年开始进行空间外差光谱技术研究工作,目前已经完成了可见光实验台原理试验装置的研制工作,并获取了超分辨空间外差光谱。

空间外差光谱仪的主要特点体现在无运动部件、干涉图各元素可同步采集、高分辨率光谱<sup>[11]</sup>、高通量、大视场和小的尺寸重量等,其性能主要由系统各个光学器件的设计参数决定,整个光学系统主要由干涉仪<sup>[12]</sup> 部件、准直光路、成像光路、探测器等部分组成,因此系统中各个部分的参数设计直接关系到光谱仪整体性能。本文就空间外差光谱仪的系统设计进行探讨,并给出了设计结果,分析了存在的问题和解决的方法。

## 2 基本原理及性能分析

空间外差光谱仪的光学系统原理如图 1 所示,衍射光栅  $G_1$ 、 $G_2$  代替了传统迈克尔逊干涉仪中的两个平面反射镜。光束进入光阑 A,经透镜  $L_1$  准直后入射到分束器上,分束器将入射光分为强度相等的两束相干光:一束经分束器反射后入射到光栅  $G_1$  上,并经光栅  $G_1$  衍射后返回分束器上;另一束透过分束器入射到光栅  $G_2$  上,经光栅  $G_2$  衍射后反射回到分束器。两束出射光发生干涉形成定域干涉条纹,并由光学成像系统  $L_2$ 、 $L_3$  成像于探测器上。记录不同位置处的干涉条纹函数,并通过傅里叶变换即可恢复待测光谱曲线。

空间外差光谱仪中,光栅固定,与光轴正交面

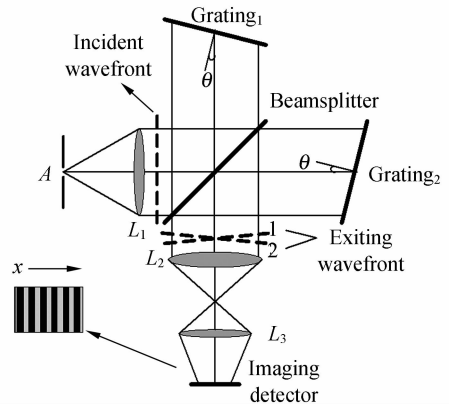


图 1 空间外差光谱仪结构原理图

Fig. 1 Schematic diagram of basic SHS configuration

成 Littrow 角 ( $\theta$ ) 倾斜放置。轴向光以  $\theta$  角入射到光栅上,某一波数的光将以  $\theta$  角原方向衍射回来,此波长称为 Littrow 波数。Littrow 波数的光经光栅衍射后的两出射波面都与光轴垂直,位相差为零,干涉条纹空间频率为零。非 Littrow 波数的光经光栅衍射返回,传播方向与光轴有一小的夹角  $\pm\gamma$ 。某一单色的非 Littrow 波数的两波面将有一夹角  $2\gamma$ , 中心的光程差为零,两端的光程差最大。不同频率的光从光栅出射时的波面与光轴的夹角  $\gamma$  由光栅方程决定:

$$\sigma(\sin \theta + \sin (\theta - \gamma)) = \frac{m}{d}, \quad (1)$$

式中  $\sigma$  为入射光的波数,  $m$  为衍射级 (一般取  $m=1$ ),  $1/d$  为光栅的刻线密度。任意波数  $\sigma$  的光束与 Littrow 波数  $\sigma_0$  的光束出射角相差角度  $\gamma$ , 两光栅出射光波面相差角度为  $2\gamma$ , 故波数为  $\sigma$  的两束光干涉空间频率为:

$$f_x = 2\sigma \sin \gamma \approx 4(\sigma - \sigma_0) \tan \theta, \quad (2)$$

当入射光为  $B(\sigma)$  时,所得到的干涉图为:

$$I(x) = \int_0^{\infty} B(\sigma) (1 + \cos (2\pi(4(\sigma - \sigma_0)x \tan \theta))) d\sigma, \quad (3)$$

通过对干涉图  $I(x)$  进行傅里叶变换就可以恢复入射光的光谱  $B(\sigma)$ 。由式 (3) 所获得的光谱是  $(\sigma - \sigma_0)$  的一个函数  $B(\sigma - \sigma_0)$ , 确切地说,干涉图经傅里叶变换恢复的光谱应该为  $\sigma_0 \pm \Delta\sigma$ , 其中  $\Delta\sigma$  为光谱范围。

空间外差光谱仪的分辨能力取决于两干涉光束的光程差,由图 1 可以计算得到干涉图采样的

最大光程差为  $\Delta U = 2W \sin \theta$  ( $W$  为光栅宽度), 由采样定理, 空间外差光谱仪的光谱分辨极限为:

$$\delta\sigma = \frac{1}{2\Delta U} = \frac{1}{4W \sin \theta}, \quad (4)$$

则仪器的光谱分辨能力为:

$$R = \frac{\sigma}{\delta\sigma} = 4W\sigma \sin \theta, \quad (5)$$

从上式可以看出, 空间外差光谱仪的分辨能力取决于光栅的分辨能力, 它等于两光栅分辨能力的总和。光栅的分辨能力主要取决于光栅的宽度  $W$  与刻线密度  $1/d$ ,  $R_G = W/d$ , 即光栅总线数。光谱范围  $\Delta\sigma$  取决于干涉图的采样密度  $N$ :

$$\Delta\sigma = \frac{N}{2} \cdot \delta\sigma, \quad (6)$$

空间外差光谱仪与传统的傅里叶光谱仪一样可以扩大视场, 通常传统的傅里叶光谱仪采用随动方形光楔实现扩视场, 而空间外差光谱仪采用

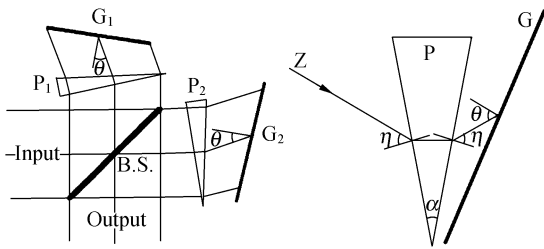


图 2 干涉仪扩视场示意图

Fig. 2 Schematic diagram of field widened SHS

不动的三角形光楔进行扩视场。如图 2 所示, 系统两光栅前分别加入特定顶角的光楔。SHS 系统中扩视场光楔的顶角可以通过式 (7)、(8) 计算<sup>[3]</sup>。

$$2(n^2 - 1) \tan \eta = n^2 \tan \theta, \quad (7)$$

$$n \sin(\alpha/2) = \sin \eta. \quad (8)$$

式中  $n$  为光楔的折射率,  $\theta$  为光栅的 Littrow 角,  $\eta$  为入射光入射到光楔的角度,  $\alpha$  为光楔顶角。通过扩视场后的空间外差光谱仪视场角极限扩大为原来的  $\cot(\alpha/2)$  倍<sup>[3]</sup>:

$$\beta = \sqrt{2/R} \cot(\alpha/2), \quad (9)$$

### 3 系统参数设计

空间外差光谱仪的整体性能指标主要有光谱分辨能力、光谱范围等, 这些指标可以通过改变光栅、探测器、成像系统的参数进行调节。首先根据

应用目的确定空间外差光谱仪的主要性能指标, 如波数范围、分辨率、分辨能力、视场等, 进而选择光栅、光楔以及探测器和成像系统的设计参数。系统设计中涉及以下几个主要参数: (1) 光谱分辨率  $\delta\sigma$ ; (2) 光谱分辨能力  $R$ ; (3) 光谱范围  $\Delta\sigma$ ; (4) 光栅宽度  $W$ ; (5) 光栅刻线密度  $1/d$ ; (6) 光栅 Littrow 波数  $\sigma_0$ ; (7) 光栅 Littrow 角  $\theta$ ; (8) 干涉图采样点  $N$ ; (9) 光楔顶角  $\alpha$ ; (10) 视场角。此外, 空间外差光谱仪通过预滤光片可以防止“鬼线”干扰, 成像系统直接影响干涉度, 这些都是系统设计时必须考虑的问题。

假设设计要求系统光谱范围为  $\sigma_1 \sim \sigma_2$ , 光谱分辨能力为  $R_0$ , 以下系统参数设计将围绕这两个重要指标进行。

#### 3.1 光谱分辨能力与光栅参数

空间外差光谱仪所获得的光谱为  $\sigma_0 - \Delta\sigma$  (或  $\sigma_0 + \Delta\sigma$ ) 区间一光谱  $B(\sigma)$ , 因此要保证系统光谱范围覆盖  $\sigma_1 \sim \sigma_2$ , 光栅 Littrow 波数  $\sigma_0$  必须满足  $\sigma_0 \leq \sigma_1$  (或者  $\sigma_0 \geq \sigma_2$ )。

光栅的分辨能力决定了系统的分辨能力, 光栅的设计参数要满足光栅的分辨能力  $R_G$  大于  $R_0/2$ , 那么光栅有效宽度  $W$  与刻线密度  $1/d$  乘积必须大于  $R_0/2$ , 即  $R_G = W/d \geq R_0/2$ 。在光栅的参数设计时, 要进行光栅宽度与刻线密度匹配选择, 当刻线密度较小时, 光栅宽度就要相应的增加。

光栅的 Littrow 角 ( $\theta$ ) 根据光栅方程  $2\sigma_0 \sin \theta = 1/d$  计算确定。

#### 3.2 光谱范围与探测器参数

空间外差光谱仪的光谱范围为  $\sigma_0 - \Delta\sigma$  (或  $\sigma_0 + \Delta\sigma$ ), 也就是说系统光谱范围为光栅 Littrow 波数  $\sigma_0$  正负的一个区间范围。在设计系统光谱范围时, 要确保系统的光谱范围为  $\sigma_0 - \Delta\sigma$  (或  $\sigma_0 + \Delta\sigma$ ) 覆盖的工作光谱范围。系统的光谱范围取决于探测器的采样数  $N$ , 探测器单列的像元  $N_0$  数必须满足  $N_0 \geq N = 2\Delta\sigma/\delta\sigma$ 。

#### 3.3 成像系统

成像系统的功能主要是将干涉条纹成像于探测器面阵上, 确切地说是将光栅面成像于探测器面阵上, 因此, 成像系统的设计必须考虑光栅、探测器面阵的尺寸大小, 其成像倍率等于探测器面阵尺寸与光栅有效口径之比。为保证成像质量, 在选择或设计成像系统的时候, 可以选择一个长

焦距、 $F$  数较大的成像系统。但是焦距长会导致系统体积增大,因此,根据需要可以选择适当焦距的成像系统。

### 3.4 预滤光片

空间外差光谱仪中的干涉图依赖于外差频率,因此波数为  $\sigma_0 \pm \Delta\sigma$  的入射光将产生相同的输出,导致光谱反演时的不确定性,造成"鬼线",在前置光路中加一窄带预滤光片可以消除此不确定性。根据前面设计过程中光谱范围以及光栅参数设计的结果进行滤光片的参数设计,光谱范围的一端为 Littrow 波数  $\sigma_0$ ,因此小于(或大于)Littrow 波数的光谱必须截止。

### 3.5 光楔

由于光楔的色散作用,原来轴线上的不同波数入射光并不都以 Littrow 角入射到光栅上,为了尽量避免色差的影响,应当选取色散较小的光学材料。扩视场光楔的顶角  $\alpha$  可以通过式(7)、(8)计算得到,视场角通过式(9)获得。

### 3.6 分束器

为保证干涉条纹的干涉度,分束器的透射/反射比要严格按照 1:1。此外,分束器会改变两光路的光程差,因此其中一光路需要进行光程补偿,或者采用对称型分束器。

## 4 设计实例与实验验证

### 4.1 设计实例

下面是空间外差光谱仪设计实例。首先明确系统设计的基本要求:光谱分辨能力 15 000;光谱范围 17 361.1~16 920.5  $\text{cm}^{-1}$  (576~591 nm)。

(1)确定光栅的 Littrow 波数,本系统中光栅 Littrow 波数设计为 16 920.5  $\text{cm}^{-1}$  (591 nm)。选择刻线密度为 600 l/mm 的光栅,因此,光栅的宽度  $W$  要大于 12.5 mm。为了保证有一定余量,系统光栅的实际有效口径为 15 mm,理论分辨能力为 18 000。通过光栅方程计算光栅 Littrow 角为 10.21°。

(2)光谱分辨能力为 18 000,通过计算光谱分辨率极限为 0.95  $\text{cm}^{-1}$ ,要保证光谱范围 17 361.1~16 920.5  $\text{cm}^{-1}$ ,干涉图的采样点  $N$  必须大于 930,通过设计,系统选择了 1 024×1 024 面阵 CCD 探测器。此外,探测的单像元尺寸为 12  $\mu\text{m}$  × 12  $\mu\text{m}$ ,量化精度为 12 bit。

(3)根据光栅尺寸及探测器面阵大小来进行成像系统设计,设计要求光栅能成像于探测器位置,因此,成像系统成像倍率约为 0.8:1,焦距设计为 100 mm。

(4)预滤光片设计为 591 nm 以上波长要求截止滤波。

(5)光楔选取色散较小的冕玻璃 K9 材料,根据式(7)、(8)、(9)计算平行光轴入射光线入射到光楔的角度  $\eta=9.06^\circ$ ,光楔顶角  $\alpha=11.90^\circ$ ,视场角  $\beta=5.79^\circ$ 。

(6)分束器采用对称型立方体型分束器,尺寸大小为 25.4 mm×25.4 mm×25.4 mm,不需进行光程差补偿。

以上设计结果表明,光栅 Littrow 波数为 16 920.5  $\text{cm}^{-1}$  (591 nm),刻线密度为 600 l/mm,有效口径为 15 mm;CCD 探测器的像元数为 1 024×1 024。因此,系统理论光谱分辨能力约为 18 000,光谱范围的理论值为 17 406.4~16 920.5  $\text{cm}^{-1}$  (574.5~591 nm)。”

根据系统设计的参数,对所设计的系统进行模拟仿真。模拟过程主要针对钠灯 589.0 nm (16 977.9  $\text{cm}^{-1}$ ) 和 589.6 nm (16 960.7  $\text{cm}^{-1}$ ) 两条谱线进行计算,近似看作两个单色光源的叠加。图 3 所示为 Na 双线光谱空间外差干涉图仿真结果,图中干涉条纹频率为外差后的结果;图 4 为干涉图经过傅里叶变换的光谱图,光谱横坐标 0 点对应 Littrow 波数为 16 920.5  $\text{cm}^{-1}$  (591 nm),双线分别是 589.0 nm (16 977.9  $\text{cm}^{-1}$ )、589.6 nm (16 960.7  $\text{cm}^{-1}$ ) 两谱线。

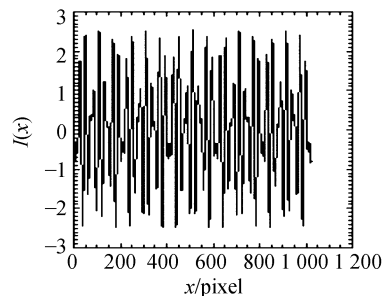


图 3 干涉图仿真结果

Fig. 3 Emulational interferogram

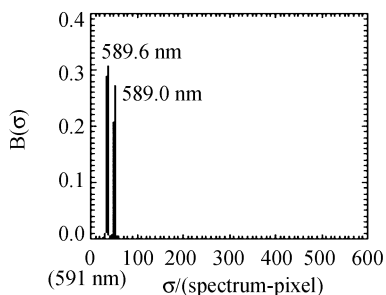


图 4 傅里叶变换光谱图  
Fig. 4 FT-spectrum

### 4.2 实验验证

通过实验室搭台的方式建立空间外差光谱原理试验装置,并进行空间外差光谱实验。试验装置如图 5 所示,集成于实验台上,系统没有扩视场光楔,但不影响光谱分辨能力及光谱范围。

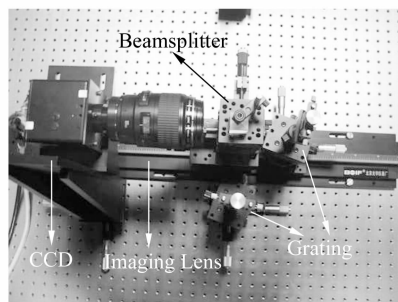


图 5 原理试验装置  
Fig. 5 Experimental rig

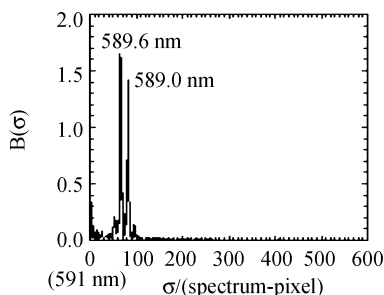
典型双线光谱的空间外差光谱实验能有效地检测系统的光谱分辨能力及光谱范围。根据系统设计的光谱分辨能力及光谱范围,实验采用 Na 双线(589.0 nm,589.6 nm)与 Hg 双线(577 nm, 579 nm)光谱光源进行实验。

图 6 为 Na 灯双线光源 589.0 nm(16 977.9  $\text{cm}^{-1}$ ),589.6 nm(16 960.7  $\text{cm}^{-1}$ )的空间外差干涉光谱实验结果。图(a)为光谱仪获取的 Na 光谱二维干涉图,图(b)为傅里叶变换光谱。在光谱中的两个峰值分别对应于 Na 光谱的 589.6 nm、589.0 nm,在横坐标(光谱点)上对应的位置分别为 66、84。通过计算系统的光谱分辨率达到  $0.96 \text{ cm}^{-1}$ (0.033 nm),分辨能力约为 17 700,光谱范围为  $17 421.6 \sim 16 920.5 \text{ cm}^{-1}$ (574~591 nm)。

图 7 为 Hg 灯双线光源的空间外差干涉光谱实验结果,在光谱中的两个峰值分别对应于 Hg

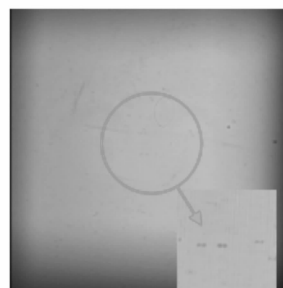


(a)二维干涉图  
(a)2D Interferogram

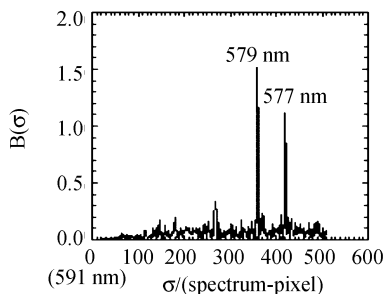


(b)傅里叶变换光谱  
(b) FT-spectrum

图 6 Na 光谱空间外差光谱实验结果  
Fig. 6 Experiment of Na lamp



(a)二维干涉图  
(a)2D Interferogram



(b)傅里叶变换光谱  
(b) FT-spectrum

图 7 Hg 光谱空间外差光谱实验结果  
Fig. 7 Experiment of Hg lamp

光谱的 579 nm、577 nm,在横坐标上的位置分别为 361、421,计算结果表明,系统光谱分辨率也为 0.033 nm,分辨能力为 17 700,光谱范围为 17 nm,与 Na 光谱实验结果一致。

实验结果与理论结果存在一个小偏差,这是由于原理试验装置的各光学器件精度以及系统整体装校精度是有限的,难免会导致系统整体精度误差。通过典型的双线实验可以对系统进行光谱定标,这也说明了光谱定标的重要性。但从双线实验结果看,系统光谱分辨能力与光谱范围的检测结果与理论结果基本相同,这表明了本文设计方法的科学性和有效性。

## 5 结 论

就空间外差光谱仪的系统设计进行了讨论分析,并给出了设计实例,通过光谱实验检测系统结果与设计的理论结果一致,验证了设计的科学性和有效性。空间外差光谱仪系统是一个相对复杂的干涉系统,文章主要针对系统的主要参数进行讨论,实际应用中,还有很多问题需要研究,例如探测器的动态范围、精度对系统测试结果的影响,以及光学器件的面型精度误差与系统性能的关系等。因此,系统实际应用设计中必须综合考虑诸多的因素,才能确保空间外差光谱仪的可靠性。

## 参考文献:

- [1] SUZUKI D. Attainment of high resolution holographic Fourier transform spectroscopy [J]. *Appl. Opt.*, 1971, 10:1137-1140.
- [2] ROESLER F L, HARLANDER J. Spatial heterodyne spectroscopy: interferometric performance at any wavelength without scanning [J]. *SPIE*, 1990, 1318:234-243.
- [3] HARLANDER J. *Spatial heterodyne spectroscopy: interferometric performance at any wavelength without scanning* [D]. USA: University of Wisconsin-Madison, 1991.
- [4] HARLANDER J, ROESLER F. Spatial heterodyne spectroscopy: a novel interferometric technique for ground-based and space astronomy [J]. *SPIE*, 1990, 1235:622-633.
- [5] WATCHORN S, ROESLER F L, HARLANDER J, et al. Development of the spatial heterodyne spectrometer for VUV remote sensing of the interstellar medium [J]. *SPIE*, 2001, 4498:284-295.
- [6] MIERKIEWICZ E J, ROESLER F L, HARLANDER J, et al. First light performance of a near-UV spatial heterodyne spectrometer for interstellar emission line studies [J]. *SPIE*, 2004, 5492:751-766.
- [7] ROESLER F L, HARLANDER J. Spatial heterodyne spectroscopy for atmospheric remote sensing [J]. *SPIE*, 1999, 3756:337-345.
- [8] HARLANDER J, ROESLER F L, CARDON J G, et al. SHIMMER: a spatial heterodyne spectrometer for remote sensing of Earth's middle atmosphere [J]. *Appl. Opt.*, 2002, 41(7):1343-1352.
- [9] HARLANDER J, ROESLER F L, ENGLERT C R, et al. Robust monolithic ultraviolet interferometer for the SHIMMER instrument on STPSat-1 [J]. *Appl. Opt.*, 2003, 42(15):2829-2834.
- [10] LIN Y L, SHEPHERD G, SOLHEIM B, et al. Introduction to spatial heterodyne observations of water (SHOW) project and its instrument development [C]. *ITSC-X IV Proc. Beijing (Poster)*, China, 2005.
- [11] 肖功海, 苏嵘, 薛永祺. 显微高光谱成像系统的设计 [J]. *光学精密工程*, 2004, 12(4):367-372.  
XIAO G H, SHU R, XUE Y Q. Design of microscopic hyperspectral imaging system [J]. *Opt. Precis. Eng.*, 2004, 12(4):367-372.
- [12] 赵慧洁. 适合于微细加工的外差探测技术及应用 [J]. *光学精密工程*, 2003, 11(1):98-103.  
ZHAO H J. Heterodyne testing technique and its applications in micro-machining [J]. *Opt. Precis. Eng.*, 2003, 11(1):98-103.

作者简介:叶松(1979—),男,现为中国科学院安徽光学精密机械研究所在读博士研究生,主要从事超光谱遥感技术研究工作。E-mail: sye@aiofm.ac.cn