

分体型萨格奈克干涉仪的精密装调

张学敏^{1,2} 魏儒义^{1,2*} 闫肃¹ 段嘉友¹ 李华¹ 杨建峰¹

(¹中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 基于分体型萨格奈克干涉仪的基本原理, 针对通光口径为 60 mm、光谱通道数为 65 的分体型萨格奈克干涉仪, 模拟了干涉仪反射镜装配误差引起的干涉条纹变化情况, 分析了装配误差对干涉条纹的影响, 并根据设计指标推导了干涉仪系统装调的位置精度及角度精度要求。详细介绍了实现干涉仪精密装调的系统方案, 其中包括装调主平面的建立、分光棱镜的精确定位以及干涉仪长臂反射镜、短臂反射镜的精密定位调整, 整个装调方案基于自准直原理并通过巧妙的基准转换关系最终实现了干涉仪安装位置精度优于 0.01 mm、安装角度精度优于 1"、系统主截面重合精度优于 1" 的高精度装配要求。

关键词 光学设计; 精密装调; 萨格奈克干涉仪; 分体型; 位置精度; 角度精度

中图分类号 TN205 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0416001

Precise Alignment of Separated Sagnac Interferometer

Zhang Xuemin^{1,2} Wei Ruyi^{1,2} Yan Su¹ Duan Jiayou¹ Li Hua¹ Yang Jianfeng¹

(¹Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China)

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A separated Sagnac interferometer with optical diameter of 60 mm and spectral channel of 65 is introduced based on its working principle. Ideal interference fringes and interference fringes are simulated when reflector has an angle deviation, and the effect of alignment error to the interference fringes is analyzed. The position accuracy and angle accuracy of alignment are induced based on the optical design parameters. The method of precision alignment is introduced in detail, which includes the installation of primary alignment plane, the precise location of splitting prism, the precise adjustment of long-arm and short-arm reflectors. Through the installation of alignment reference and the masterly reference transformation, the precise alignment of separated Sagnac interferometer is achieved based on the principle of auto-collimation, whose position accuracy is better than 0.01 mm, angle accuracy is better than 1", super position accuracy of primary working plane is better than 1".

Key words optical design; precise alignment; Sagnac interferometer; separated; position accuracy; angle accuracy

OCIS codes 220.1140; 230.4040; 300.6190; 300.6300; 030.1640

1 引言

基于横向剪切干涉的空间调制型傅里叶变换成像光谱仪^[1~6]回避了运动部件和扫描机构所带来的技术困难, 具有高稳定性、高通量以及对光谱进行实时测量^[7,8]等优点。横向剪切干涉仪是空间调制型傅里叶变换成像光谱仪的核心部件^[9,10], 其典型

代表主要有萨格奈克干涉型和迈克耳孙干涉型干涉仪。萨格奈克型横向剪切干涉仪由于采用了三角共光路的结构, 受外界振动和气流等因素的影响较小, 抗干扰能力强, 应用最为广泛。

实际应用中, 随着成像光谱仪分辨率的不断提高, 干涉仪的体积不断增大, 从而使得对大口径实体

收稿日期: 2012-11-07; 收到修改稿日期: 2012-12-01

基金项目: 国家自然科学基金(40805013)资助课题。

作者简介: 张学敏(1986—), 女, 硕士, 助理工程师, 主要从事光学装调及检测方面的研究。

E-mail: zhangxuemin0325@gmail.com

* 通信联系人。E-mail: ruyiwei@opt.ac.cn

干涉仪的加工较为困难^[11],因此只能采用分体型的萨格奈克干涉仪^[12]。由于分体型萨格奈克干涉仪装调变量增多,且干涉仪对其各组件空间位置一致性极其敏感,使得分体型萨格奈克干涉仪的精密装调较为困难。目前针对干涉仪设计方面的文章较多,文献[13]对实体萨格奈克干涉仪的胶合进行了介绍,但是分体型干涉仪精密装调方面的文献还未见报道,本文基于萨格奈克干涉仪的工作原理,详细介绍了其装调方法。

2 萨格奈克型干涉仪的基本原理

图1是一个典型的分体型萨格奈克干涉仪,主要由一个分光棱镜和完全对称的两个平面反射镜组成,平面反射镜之间的夹角为 45° 。入射的准直光束在分光棱镜分光面处的入射角为 45° ,一路光束反射后按顺时针方向传送,另一路光束透过分光面按逆时针方向传输。如果两个平面反射镜相对分光面对称组合,两路光束在干涉仪出射面上与光轴的方向相同且位置重合;如果对着入射面的平面反射镜沿分光面发生偏移,形成非对称组合,入射光线经过萨格奈克干涉仪的横向剪切,将分割成两条相干光线。

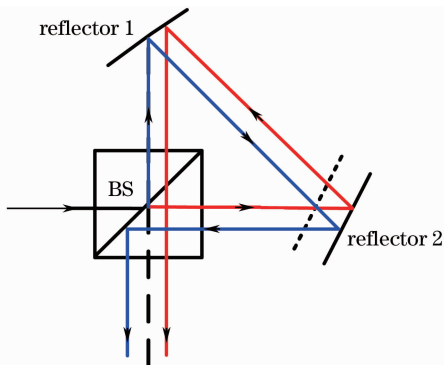


图1 分体型萨格奈克干涉仪结构图

Fig. 1 Structure of separated Sagnac interferometer

图2为分体型萨格奈克干涉仪工作原理图^[14],其中 s_0 、 s_ω 分别表示视场角为0和 ω 的平行光,可以当作干涉仪的两个点光源。一束入射光经横向剪切分束器后成为两束互相平行的相干光,由于这两束光对于前面的分束器而言,等光程面是垂直于光轴方向的,而对于后面的成像系统而言等光程面则是垂直于光线方向的,对于视场角不为0的光线这两个等光程面是不重合的,因此当两束平行的相干光会聚到成像镜 L_2 的后焦面 P_2 上同一点时就存在着光程差,从而发生干涉。

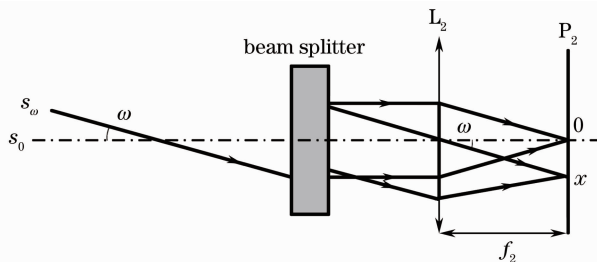


图2 分体型萨格奈克干涉仪工作原理

Fig. 2 Working principle of separated Sagnac interferometer

分体型萨格奈克干涉仪的光谱通道数 $N=65$,入瞳 $D=60$ mm。设计要求干涉仪入射光与出射光的夹角 $\alpha=90^\circ\pm 10''$;干涉条纹与电荷耦合器件(CCD)焦面水平轴偏差小于 $1/20$ pixel,干涉仪主截面与干涉仪安装底面的重合精度优于 $1''$,并且保证分光棱镜的分光面中心与入射光轴偏移量小于 0.01 mm。

3 装配误差分析

根据设计要求,分光棱镜的分光面中心与入射光轴偏移量小于 0.01 mm,即需保证干涉仪分光棱镜的安装位置精度优于 0.01 mm。干涉仪主截面与干涉仪安装底面的重合精度优于 $1''$,干涉仪装调以分光棱镜主平面为装配基准,因此分光棱镜主平面的定位精度需优于 $1''$ 。

以分光棱镜主平面为基准,分析反射镜方位误差及俯仰误差对干涉条纹的影响情况。通过软件模拟萨格奈克干涉仪的条纹情况,图3为分光棱镜、各反射镜主平面完全理想重合下的干涉条纹,图中的点划线代表 CCD 焦面水平轴,此时干涉条纹与 CCD 水平轴夹角为 90° 。

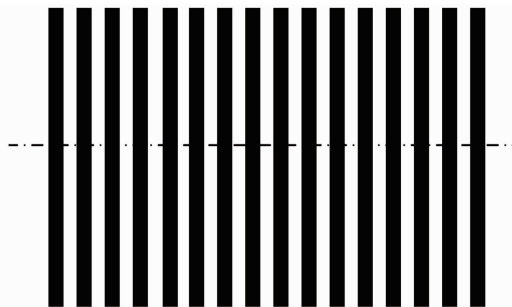


图3 理想干涉条纹

Fig. 3 Ideal interference fringe

反射镜存在方位误差时,会引起相应反射光束的偏斜。图4是分体型干涉仪的俯视图。图中虚线代表右反射镜方位角偏斜 θ 后的光路走向,若如图中所示右反射镜方位角偏斜为 θ ,则出射光线将偏

转 2θ 。根据设计要求,干涉仪入射光与出射光的夹角 $\alpha=90^\circ\pm 10''$,得出干涉仪反射镜方位角度容许的装配误差为 $\pm 5''$,反射镜的口径 $D'=40\text{ mm}$,得出反射镜容许的方位装配误差为 $\pm 0.0005\text{ mm}$ 。

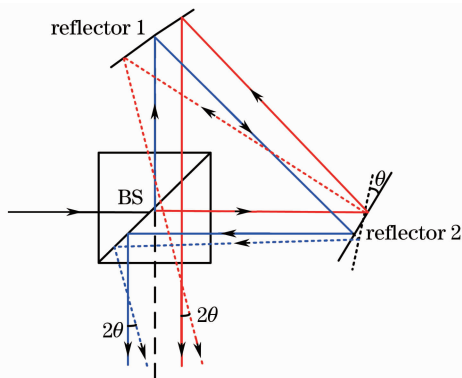


图 4 反射镜方位偏转后干涉仪光路图

Fig. 4 Optical path of interferometer when reflector has an azimuthal angle deviation

图 5 为长臂反射镜俯仰角存在偏差时的干涉条纹,可以得出,俯仰角误差引起干涉条纹倾斜,使得干涉条纹与 CCD 焦面水平轴存在角度误差。根据设计要求,干涉条纹与 CCD 焦面水平轴偏差小于 $1/20\text{ pixel}$,CCD 焦面像素数为 $1024\text{ pixel}\times 512\text{ pixel}$,可计算出干涉条纹与 CCD 焦面水平轴夹角偏差需小于 $10''$,即干涉仪反射镜俯仰角容许的装配误差为 $\pm 5''$,位移误差为 $\pm 0.0005\text{ mm}$ 。

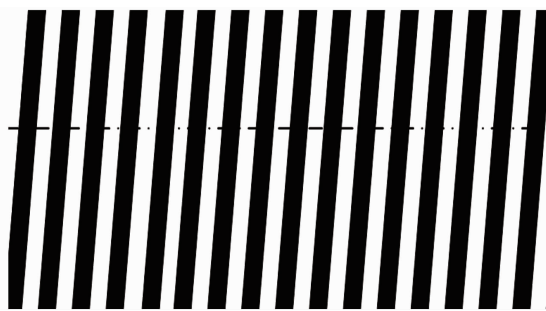


图 5 反射镜俯仰偏转后干涉仪条纹

Fig. 5 Interference fringe when reflector has a pitch angle deviation

通过以上分析可知,分体型干涉仪对各部件的位置安装精度有着很高的要求,干涉仪安装位置精度优于 0.01 mm ,安装角度精度优于 $1''$,反射镜的方位及俯仰方向的装配误差优于 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 。

4 装调方法

4.1 装调主平面的建立

为了实现分光棱镜主平面及反射镜主平面的高精度重合,建立装调主平面基准,再分别调整分光棱

镜以及反射镜的位置,使得各自主平面与装调主平面严格重合。图 6 为装调主平面示意图,通过自准直经纬仪 A1 和自准直经纬仪 B1,确定与大地水平的装调主平面,自准直经纬仪的自准精度为 $0.5''$,建立的装调主平面基准精度优于 $1''$ 。干涉仪入射光与出射光成 90° 夹角,借助五棱镜保证两自准直经纬仪光轴夹角为 90° ,五棱镜入射光与出射光夹角为 $90^\circ\pm 5''$,其确定的精度可以满足干涉仪入射光与出射光夹角 $90^\circ\pm 20''$ 的要求。整个装调过程中,仪器设备的不稳定会对整个系统的调试引入很大的误差,基于以往设备不稳定带来的装调困难,在实际装调中,将自准直经纬仪 A1 和自准直经纬仪 B1 放置在干涉仪装调平台外部,并且将五棱镜也放置在平台外部,从而可以在整个装调过程中对自准直经纬仪 A1 和自准直经纬仪 B1 位置进行监控。

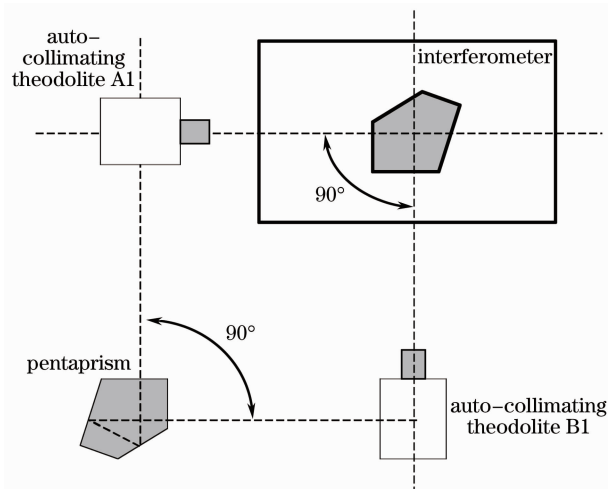


图 6 主平面示装调意图

Fig. 6 Alignment diagram of primary plane

4.2 分光棱镜定位调整

干涉仪箱体结构中分光棱镜的 4 个通光面设计了通光孔用于通光,考虑干涉仪装调过程中分光棱镜的精密定位调整需借助通光孔的光轴进行定位,要求结构加工保证通光孔光轴与干涉仪箱体安装底面的垂直度为 0.005 mm ,并巧妙设计了分划板工装 $A_1、A_2、A_3、A_4$,其结构如图 7 所示。要求结构加工保证分划板定心工装 A_1 与 A_3 对应的通光孔、 A_2 与 A_4 对应的通光孔其同心度优于 0.005 mm ,分划板定心工装 A_1 与 A_2 对应的通光孔、 A_3 与 A_4 对应的通光孔的垂直度优于 0.005 mm 。分划板工装经过光学定心加工^[15],从而保证分划板的光轴与其外圆同心度优于 0.005 mm 、光轴与其端面垂直度优于 0.005 mm ,并且分划板的外圆与干涉仪箱体通光孔的内圆直径方向的配合间隙保证小于

0.01 mm。经过上述工作可以保证分划板的光轴与干涉仪安装底面的平行度优于 0.005 mm。如图 8 (a)所示,调整干涉仪箱体的方位,使得自准直经纬仪 A1 与分划板工装 A₁、A₃ 自准直,并且此时自准直经纬仪 B1 也与分划板工装 A₂、A₄ 自准直。如图 8(b)所示,将分光棱镜装入小箱体中,通过调整分光棱镜的方位、俯仰及平移,使得分划板 A₂ 经过分光棱镜分光面的自准像以及分划板 A₃ 在自准直经纬仪 A1 中自准直、分划板 A₂ 和 A₃ 十字丝在自准直经纬仪 A1 中穿心。由于自准直经纬仪的穿心精度优于 0.01 mm,从而保证分光棱镜位置精度优于 0.01 mm。

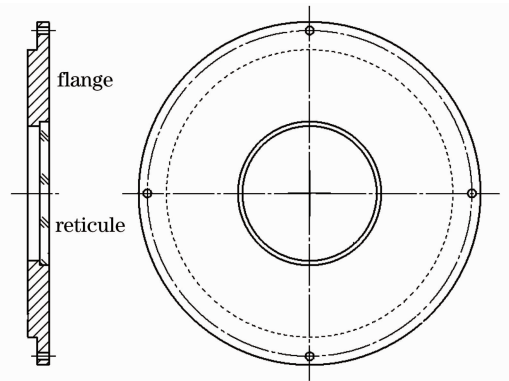


图 7 分划板工装示意图
Fig.7 Structure of reticule

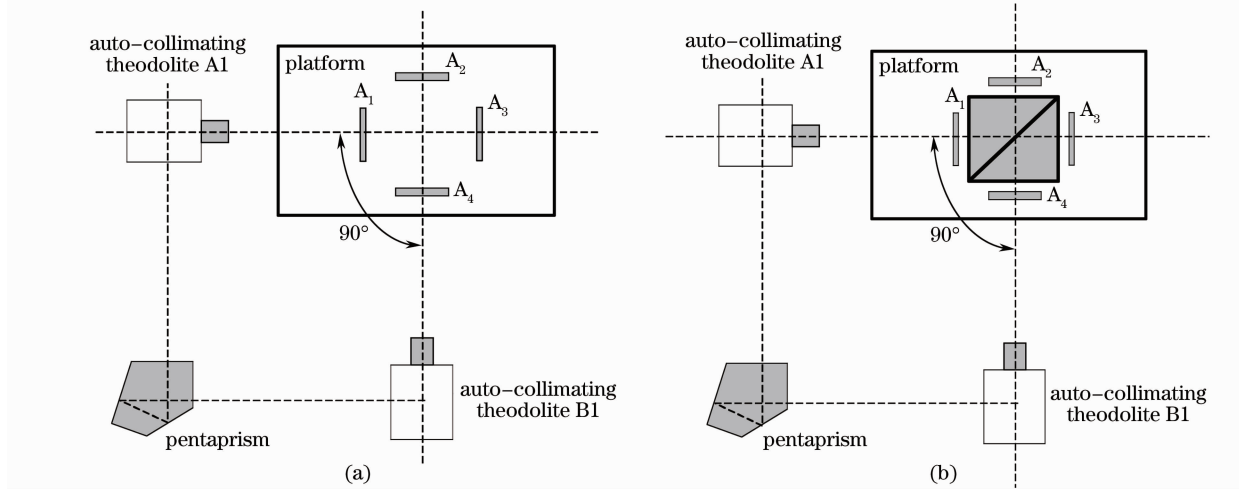


图 8 分光棱镜定位调整示意图
Fig.8 Alignment diagram of splitting prism

4.3 反射镜定位调整

图 9 为干涉仪短臂反射镜(垂直与入射面的平面反射镜)定位调整示意图,干涉仪短臂反射镜的光轴与入射光光轴成 45° 夹角。将自准直经纬仪 C1 调整至与分划板 A₃ 自准直,保证自准直经纬仪 C1 的光轴与入射光轴重合,再将经纬仪逆时针旋转 45°,调整干涉仪短臂反射镜的位置使得干涉仪短臂反射镜在自准直经纬仪 C1 中自准直,且经纬仪自准直精度为 0.5",从而保证干涉仪短臂反射镜光轴与入射光轴夹角误差为 45°±0.5"。

图 10 为干涉仪长臂反射镜定位调整示意图。短臂反射镜装入干涉仪箱体内,读取干涉仪入射光与出射光的夹角 α ,根据

$$\alpha = \frac{2x}{D'} \quad (1)$$

求出干涉仪长臂反射镜的方位位移调整量 x 。方位调整完成后,在干涉仪入射光方向放置平行光管,并在干涉仪出射光方向放置成像镜以及 CCD,对干涉

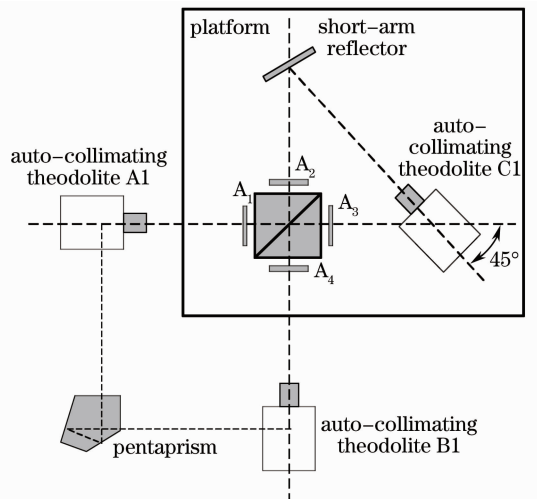


图 9 短臂反射镜定位调整示意图
Fig.9 Alignment diagram of short-arm reflector

条纹进行成像,根据干涉条纹的数量以及条纹倾斜情况分析短臂反射镜的方位误差以及位移误差,并进行相应的调整。

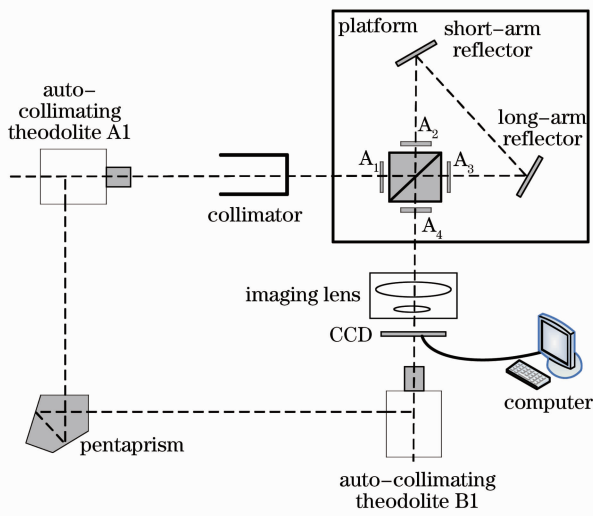


图 10 长臂反射镜定位调整示意图

Fig. 10 Alignment diagram of long-arm reflector

激光波长 λ 、像素数 N 、像素尺寸 d 以及成像镜头焦距 f 与干涉仪剪切量 l 之间的关系为

$$l = \frac{nf\lambda}{Nd}. \quad (2)$$

假设长臂反射镜与短臂反射镜的不对称量为 d ，则不对称量与剪切量的关系为

$$l = \sqrt{2}d \tan 22.5^\circ, \quad (3)$$

对(3)式两边求微分得剪切量变化量 Δl 与反射镜不对称变化量 Δd 之间的数学关系：

$$\Delta l = \sqrt{2}\Delta d \tan 22.5^\circ. \quad (4)$$

根据(2)式计算的剪切量与理论剪切量作差，带入(4)式即可计算出长臂反射镜的位移变化量。

根据成像干涉条纹与 CCD 水平轴的夹角误差 β ，由

$$\beta = \frac{2y}{D} \quad (5)$$

计算出长臂反射镜俯仰方向的调整位移量 y 。

经过多次调整，最终完成了干涉仪的精密调整。经检测，其光谱通道数 $N=66$ ，干涉仪入射光与出射光的夹角 $\alpha=90^\circ \pm 5''$ ；干涉条纹与 CCD 焦面水平轴偏差为 $1/25$ pixel，干涉仪主截面与干涉仪安装底面的重合精度优于 $1''$ ，分光棱镜的分光面中心与入射光轴偏移量小于 0.01 mm，达到了设计要求。

5 结 论

基于空间调制型傅里叶变换成像光谱仪核心部件——分体型萨格奈克干涉仪的工作原理，根据其设计参数，推导了干涉仪各组件的装配精度。介绍了基于自准直原理的干涉仪精密装调方法，巧妙地

建立了装配基准及基准转换关系，实现了干涉仪的高精度精密装调，对于其他形式干涉仪的装调具有借鉴意义。

参 考 文 献

- 1 R. G. Sellar, J. B. Rafert. The effects of aberrations on spatially modulated Fourier transform spectrometers [J]. *Opt. Eng.*, 1994, **33**(9): 3087~3092
- 2 R. G. Sellar, J. B. Rafert. Fourier transform imaging spectrometer with a single toroidal optic [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(16): 2931~2933
- 3 W. H. Smith, P. D. Hammer. Digital array scanned interferometer; sensors and results [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(16): 2902~2909
- 4 Fu Jianguo, Liang Jingqiu, Liang Zhongzhu. Tolerance analysis for a static Fourier-transform infrared spectrometer based on multi-micro mirrors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(6): 0607002
付建国, 梁静秋, 梁中翥. 静态傅里叶变换红外光谱仪的公差分析 [J]. *光学学报*, 2012, **32**(6): 0607002
- 5 Fu Jianguo, Liang Jingqiu, Liang Zhongzhu. Analysis and design for the optical system of a static Fourier-transform spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(2): 0222006
付建国, 梁静秋, 梁中翥. 一种静态傅里叶变换红外光谱仪的光学系统分析与设计 [J]. *光学学报*, 2012, **32**(2): 0222006
- 6 Wei Ruyi, Zhang Xuemin, Zhou Jinsong *et al.*. Calculations for optical path difference of a high resolution reflecting scanning Fourier transform spectrometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0730001
魏儒义, 张学敏, 周锦松等. 反射式转镜干涉光谱仪工程差计算 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(7): 0730001
- 7 Xiangli Bin, Zhao Baochang, Xue Mingqiu. Spatially modulated imaging intereferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(1): 18~22
相里斌, 赵葆常, 薛鸣球. 空间调至干涉成像光谱技术 [J]. *光学学报*, 1998, **18**(1): 18~22
- 8 Li Yan. Optical Design and Stray Light Analysis of the High Resolution Hyper-Spectral Imager Based on LASIS Theory [D]. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2009
李妍. 基于 LASIS 的高分辨率高光谱成像仪光学系统设计与杂光分析 [D]. 中国科学院研究生院, 2009
- 9 Bai Jianguang, Wang Zhonghou, Bai Qinglan *et al.*. A study on design method for sagnac interferometer of lateral shearing spatially modulated imaging intereferometry [J]. *Spacecraft Engineering*, 2010, **19**(2): 87~91
白加光, 王忠厚, 白清兰. Sagnac 横向剪切干涉仪设计方法的研究 [J]. *航天器工程*, 2010, **19**(2): 87~91
- 10 Chen Liwu, Zhao Baochang, Yang Jianfeng *et al.*. The analysis of the relationship between angle tolerance of Sagnac prism and the spectrum differentiation of the interferometer spectrometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(7): 1022~1027
陈立武, 赵葆常, 杨建峰等. Sagnac 棱镜角公差与干涉光谱仪光谱分辨率的关系分析 [J]. *光子学报*, 2006, **35**(7): 1022~1027
- 11 Zhao Baochang, Yang Jianfeng, Xue Bin *et al.*. Design of solid Sagnac interferometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(3): 474~478
赵葆常, 杨建峰, 薛彬等. 实体 Sagnac 干涉仪的设计 [J]. *光子学报*, 2009, **38**(3): 474~478
- 12 J. F. Yang, P. Ruan, L. B. Xiang *et al.*. Large-aperture static imaging spectroscopy (LASIS) [C]. *SPIE*, 2003, **4897**: 318~325
- 13 Li Xia, Zhao Jianke, Yuan Yan *et al.*. Agglutination of

- interferometer and precision analysis[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(11): 2124~2128
- 李 霞, 赵建科, 袁 艳 等. 干涉仪胶合和准确度分析[J]. 光子学报, 2007, **36**(11): 2124~2128
- 14 Dong Ying, Xiangli Bin, Zhao Baochang. Analysis of viewfield ray from any direction in lateral shearing interferometer[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
- 15 Zhang Xuemin, Wei Ruyi, Hou Xiaohua *et al.*. Method of dove lens assembling and adjustment based on optical alignment machining [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, **38**(4): 141~144
- 张学敏, 魏儒义, 侯晓华 等. 基于光学定心加工的道威棱镜装配方法[J]. 光电工程, 2011, **38**(4): 141~144

栏目编辑: 韩 峰