

文章编号:1004-4213(2010)12-2129-5

# 一种提高静态傅里叶干涉仪光谱分辨率的方法\*

赵俊奇<sup>1</sup>, 刘智超<sup>2</sup>

(1 中北大学 光电厂, 太原 030051)

(2 长春理工大学 光电信息学院, 长春 130012)

**摘 要:**为了在不改变静态傅里叶变换干涉具尺寸的前提下提高光谱分辨率,设计了正交斜楔型静态傅里叶变换干涉具,采用两个正交的等效斜楔形成连续的光程差变化.通过推导传统干涉具与正交斜楔型干涉具的光程差函数,设计了采用正交斜楔型干涉具增加有效探测长度,从而提高光谱分辨率的方法.经仿真计算,正交斜楔型干涉具的最大光程差为 0.323 4 mm,比传统干涉具的 0.080 8 mm 大 4 倍左右,即光谱分辨率提高了 4 倍.实验证明,由于正交斜楔的探测原理使干涉具边缘的干涉条纹产生畸变,故要对干涉条纹进行边缘切除及滤波,给出了切除大小的计算公式.采用 WQF520 型光谱仪进行对比实验,检测 800 nm 的激光,该干涉具误差小于 1 nm.该方法可有效地提高静态傅里叶变换干涉具的光谱分辨率.

**关键词:**光谱探测;静态傅里叶变换干涉具;正交斜楔;光谱分辨率

**中图分类号:** O433.1

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3788/gzxb20103912.2129

## 0 引言

光谱分析在物质分析、毒物检测、污染气体遥测等领域的应用越来越广泛,由于光谱仪的种类繁多,根据其不同的应用场合常常采用不同的光谱探测原理<sup>[1-3]</sup>.在要求高光谱分辨率探测的情况下,以传统的迈克尔逊干涉具居多.因为时间扫描型迈克尔逊干涉具<sup>[4-5]</sup>在增大扫描路径的过程中提高光谱分辨率,对于高光谱分辨率的实现相对容易,但是机械扫描稳定性差、结构复杂,不适合户外遥测等领域<sup>[6]</sup>.光栅光谱仪采用光栅结构,无扫描结构,具有较高的稳定性和光谱分辨率,但由于光栅的存在限制了入瞳的光通量,所以该结构适用于背景噪音低、信噪比高的环境,在户外多变的条件下会对探测灵敏度有明显的影响.静态傅里叶变换光谱仪<sup>[7-9]</sup>采用傅里叶变换干涉具,其特点是结构简单、抗干扰能力强,可应用于复杂环境下的实时遥测领域.限制其广泛应用的是光谱分辨率取决于几何尺寸,而干涉具的尺寸不但受材料、工艺、探测器有效长度等限制,而且大部分情况下希望系统小型化.

根据常见的三种干涉结构的特点可知:在户外遥测中,静态傅里叶变换光谱仪具有不可替代的地位;因为户外遥测首先要求系统稳定性高、探测灵敏度高,其次才是又尽量高的光谱分辨率;但随着检测

技术的发展,对遥测仪器光谱分辨率的要求也不断地提高,静态傅里叶变换光谱仪光谱分辨率的缺点渐渐成为限制其应用的瓶颈问题,所以提高静态傅里叶变换光谱仪光谱分辨率的研究成为又一热点.国内外在这方面已有众多的相关研究<sup>[10]</sup>,主要方法可分为两类:一是通过改变硬件结构,直接或间接地增大干涉具的尺寸,从而增加光程差的变化范围,例如制作大尺寸的静态干涉具<sup>[11]</sup>、多干涉具拼接联用等;二是采用插值、倍频等光谱分析算法优化采集的干涉条纹数据的方法,例如提高静态干涉条纹的采样频率、等效增加干涉条纹数等.本文的主要研究目的是在保持静态结构和原有尺寸的基础上,提高静态傅里叶变换光谱仪的光谱分辨率.系统采用正交斜楔型静态傅里叶变换干涉具设计,结合面阵 CCD 探测器,采集二维的连续光程差变化,从而多采集一维的连续光程差,故在同样尺寸条件下可大幅提高光谱分辨率.

## 1 基本原理

### 1.1 静态傅里叶变换干涉具

静态傅里叶变换光谱仪是利用激光在干涉具中的干涉条纹和激光的光谱分布对应的傅里叶变换关系来获取光谱数据的.

图 1 是激光经静态干涉具的干涉原理示意图,外形结构如图 1(a),由两个三角形棱镜(Prism A、Prism B)组合.棱镜 A 为一个等腰直角棱镜,棱镜 B 为一个非直角棱镜,有一个  $\phi$  角的斜楔面.该干涉具

\* 国家自然科学基金(60572019)资助

Tel:0431-86015103

Email:zhaojunqi\_123@163.com

收稿日期:2010-07-19

修回日期:2010-09-06

的相干光路示意图如图 1(b), 激光由  $M_1$  面入射, 经半透半反面 BS, 一半的光将反射到全反射面  $M_2$  上 (光路 1), 而另一半折射穿过 BS 面的光将由全反射面  $M_3$  反射回 BS 面 (光路 2), 最终两条光路将汇聚到 CCD 探测器上, 形成干涉条纹. 由于  $\phi$  角一定, 所以随着  $x$  的增加对应的  $y$  值也在增大, 并且一一对应且线性, 所以两路激光在静态干涉具中可以形成连续的光程差, 即产生干涉现象.

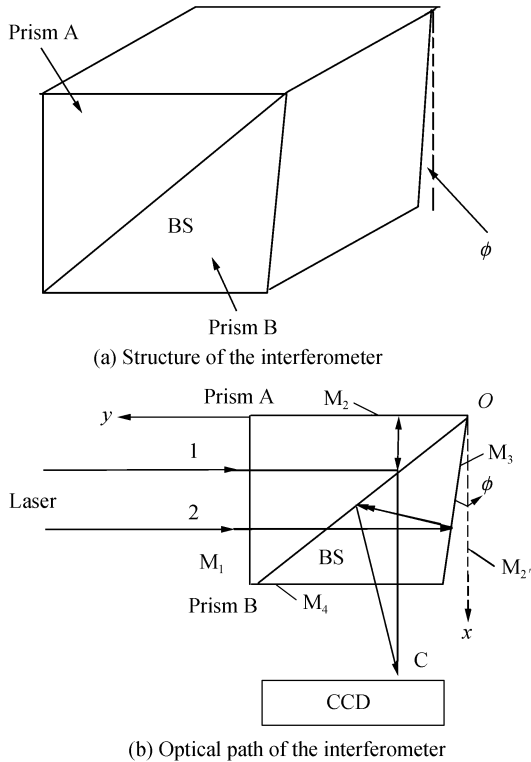


图 1 静态傅里叶干涉具工作原理示意图  
Fig. 1 Principle of the static Fourier interferometer

在传统的静态傅里叶变换干涉具中, 光路 1 经分束面 BS 产生的两束光并没有汇聚到一起, 而是和光路 2 的光产生相干, 即发生干涉的两束光不是由同一入射光分束形成的, 而是双光束干涉的方式. 光路 1 与光路 2 的距离是由倾斜角  $\phi$  决定的, 而最大光程差也取决于倾斜角  $\phi$  的大小, 所以合理地设计倾斜角  $\phi$  是确定静态傅里叶变换干涉具相干质量、最大光程差、CCD 探测器位置等参量的必要条件, 其中, 光谱分辨率的计算又是量化干涉具性能的关键. 在静态干涉具中, 光谱分辨率就是最大光程差的倒数, 即求出最大光程差就可知干涉具的光谱分辨能力. 由于棱镜 A 和棱镜 B 是同种材料, 则在干涉具中两束光的几何路程之差与干涉具的折射率之积即为光程差. 由光线基本定律和三角关系可知, 干涉具中两束光的光程差  $\Delta$  关于倾斜角  $\phi$  和  $x$  的函数是

$$\Delta = n\Delta L = 2nx \tan \phi \quad (1)$$

式中,  $n$  为静态傅里叶干涉具所用材料的折射率,

$\Delta L$  为两束光之间的路径差,  $x$  为  $M_2$  面上的对应坐标.

## 1.2 正交斜楔型静态傅里叶变换干涉具

正交斜楔型静态傅里叶变换干涉具如图 2, 在棱镜 1 和棱镜 2 中分别有一个倾斜角, 棱镜 1 中的倾斜面与  $xoy$  面形成一个夹角  $\phi_1$ , 棱镜 2 中的倾斜面与  $yo z$  面形成一个夹角  $\phi_2$ . 棱镜 1 和棱镜 2 黏贴在一起, 中间涂有半透半反膜作为分束面. 其等效光路图如图 2(b), 棱镜 1 中的倾斜角  $\phi_1$  如图 2(b) 中的斜楔 1, 棱镜 2 中的倾斜角  $\phi_2$  如图 2(b) 中的斜楔 2, 两个斜楔的延伸方向正交. 与传统静态傅里叶变换干涉具相比, 由一个等效斜楔变为两个正交的等效斜楔. 传统的干涉具通过等效斜楔在  $oz$  方向上的斜楔产生连续变化的光程差, 而正交斜楔型静态傅里叶变换干涉具不但在  $oz$  方向上有连续变化的光程差, 同时在  $oy$  方向上也有连续变化的光程差, 则在整个  $xoy$  平面上存在一个连续变化的光程差. 其光程差变化范围在原有基础上扩展了一维, 即在原有存在某个固定光程差的位置上在  $oy$  方向上多了一维的光程差变化, 所以在光程差计算和  $\phi$  角的选取上与传统的干涉具都是不同的.

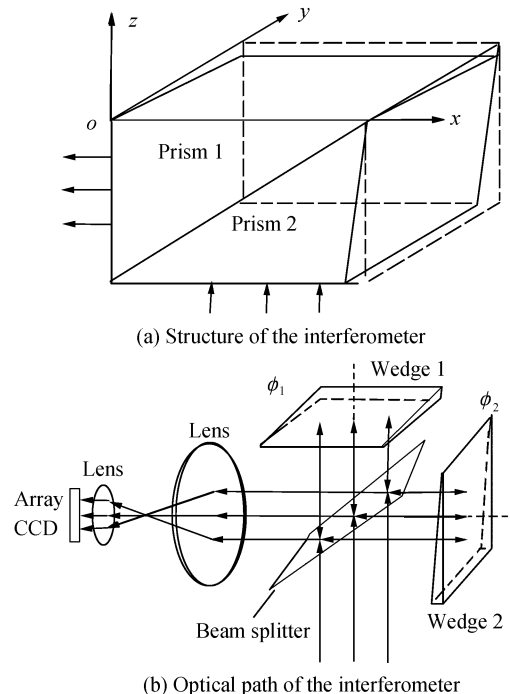


图 2 正交斜楔型静态傅里叶干涉具  
Fig 2 Orthogonal-wedge static Fourier transform interferometer

要确定  $\phi$  角首先要根据 CCD 探测器的最小像素尺寸及探测光谱范围来确定在可识别干涉条纹的条件下  $\phi$  角的范围. 实验过程中使用 ATMEL 公司的 Link 型面阵 CCD 探测器 ( $1024 \times 1024$ ), 单个像素尺寸为  $8 \mu\text{m}$ . 由于采样的要求, 干涉条纹不能过

密,否则没法识别,所设计的干涉具是针对 800~1 700 nm 波长范围的.则由此单个光程差式(1)可推出在原有干涉具中某个固定光程差  $k$  位置上的新光程差函数为

$$\Delta_k = n\Delta L = 2nkx \tan \phi_1 \quad (2)$$

则对于整个正交斜楔型静态傅里叶变换干涉具而言,光程差函数为

$$\Delta = n\Delta L = 2n(x \tan \phi_1 + y \tan \phi_2) \quad (3)$$

式中,  $n$  为正交斜楔型静态傅里叶变换干涉具材料的折射率,  $\Delta L$  为几何路径,  $x$  为沿  $x$  轴方向坐标值,  $y$  为沿  $y$  轴方向的坐标值,  $\phi_1$  为正交斜楔 1 的倾斜角度,  $\phi_2$  为正交斜楔 2 的倾斜角度.

## 2 仿真计算

根据对正交斜楔型静态傅里叶变换干涉具光程差的分析与计算,可对整个面阵 CCD 探测器上光程差关于空间位置的函数做仿真,从而分析在该干涉具中光程差函数的变化规律.

光程差在整个面阵 CCD 探测器上的分布如图 3. 图中左边的  $(x, y)$  为  $x$  轴上距离 30 mm 处,  $y$  为  $y$  轴上距离 0 mm 处,  $z$  表示的为该处的光程差为 0.080 8 mm, 此情况是正交斜楔型静态傅里叶变换干涉具的特殊情况,即传统静态傅里叶变换干涉具的最大光程差;右边的  $(x, y)$  为  $x$  轴上距离 30 mm 处,  $y$  轴上距离 30 mm 处,光程差为 0.323 4 mm,此光程差为正交斜楔型静态傅里叶变换干涉具光程差的理论最大值.

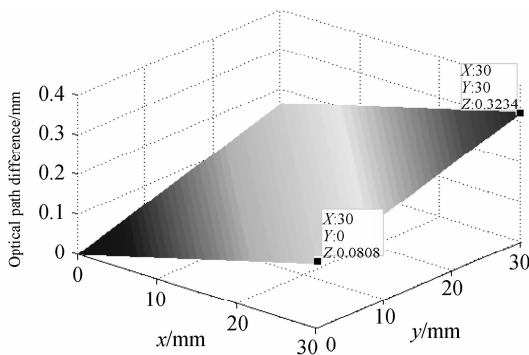


图 3 正交斜楔型静态傅里叶干涉具的光程差仿真图

Fig. 3 Optical path difference function of orthogonal-wedge static Fourier interferometer

观察光程差在关于  $x, y$  的变化可知,整个面是平面,即随  $x, y$  的变化是线性的.当  $y$  轴固定为某个值时,光程差随  $z$  的增大而增大,增大的幅度满足  $z \tan \phi$ ,而当  $x$  轴固定为某个值时,光程差随  $y$  的增大而增大,增大的幅度满足  $y \tan \phi$ .在  $xoy$  平面上,由  $(0,0)$  点到  $(x,y)$  点光程差逐渐增大,同时,当  $\phi_1$  与  $\phi_2$  相同时,光程差函数是关于  $y=x$  直线对称的,且变化满足线性要求.

从仿真图中可以看出,最大光程差为 0.323 4 mm,相比同等尺寸的传统静态傅里叶变换干涉具的光程差为提高了 4 倍左右,也就是说对应的光谱分辨率提高了 4 倍.

由于仿真是理想情况,所以实际的效果不会有如此高的光谱分辨率,造成光谱分辨率小于理论值的主要原因有:一是当采用正交斜楔型静态傅里叶变换干涉具时,由于要在棱镜 1 中也要做一个斜楔,所以原分束面要想  $z$  轴的负方向下移  $\Delta$ ,即不能像传统干涉具一样将零光程差的位置从  $oy$  轴开始算起,这样减小了产生光程差的有效距离;二是与传统干涉具相比该干涉具用球面透镜取代柱面镜,干涉具边缘的干涉条纹畸变增大,在选择干涉条纹处理时为了保证干涉条纹的真实性,将干涉具边缘采集的干涉条纹去掉,具体去掉的量度是由斜楔角度与干涉条纹的衔接决定的.

当光谱范围一定时,  $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$  时,则传统静态干涉具的光谱分布为

$$I(\Delta) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_0^L \left[ B(\lambda) = \exp\left(-\frac{2\pi c}{\lambda} 2nx \tan \phi\right) \right] dx d\lambda \quad (4)$$

而正交斜楔型静态傅里叶变换干涉具的光谱分布关系为

$$I(\Delta) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_0^L \int_0^L \left[ B(\lambda) \exp\left(-\frac{2\pi c}{\lambda} 2n(x \tan \phi_1 + y \tan \phi_2)\right) \right] dx dy d\lambda \quad (5)$$

对比采用正交斜楔型静态傅里叶变换干涉具的情况,由于用透镜取代了传统干涉具中的柱面镜,所以在原有维向上的干涉条纹没有被压缩,故正交型的干涉具干涉条纹对比度要低于传统干涉具,即信噪比比传统干涉具差,也是得到更高光谱分辨率的代价.但由式(5)可以看出整个的能量利用率是提高了,所以由此造成的干涉条纹质量下降基本不影响干涉条纹的采集.

## 3 实验

### 3.1 仪器描述

实验材料选择 BK7 光学玻璃制作而成,正交斜楔角度为  $0.1^\circ$  ( $\phi_1 = \phi_2 = 0$ ),静态干涉具边长为 2.70 mm,测试激光采用 800.0 nm 红外半导体激光器,对比采用 WQF520 型傅里叶变换光谱仪.

### 3.2 实验结果与分析

由面阵 CCD 探测器采集得到的干涉条纹,经灰度变化、滤波处理等算法将干涉条纹柔化处理如图 4. 由于光程差的连续变化,所以干涉条纹的变化规律也是基本连续的.对于传统的傅里叶干涉具,在干涉具边缘部分会有干涉条纹的模糊甚至畸变,其

中主要是由于干涉具加工工艺以及边缘部分激光的能量分布弱造成的. 而对于正交斜楔干涉具而言, 这种畸变会更加的明显, 因为两个倾斜面的叠加会使干涉具反射面的几何变化更剧烈, 从而使干涉条纹更差. 与此同时, 由于采用正交斜楔的工作原理, 不能采用柱面镜进行干涉条纹的汇聚增强, 也会大大地降低干涉条纹的信噪比, 使在边缘部分的干涉条纹产生畸变. 为了消除以上原因产生的畸变, 需要对原始干涉图像进行类似加窗的滤波处理.

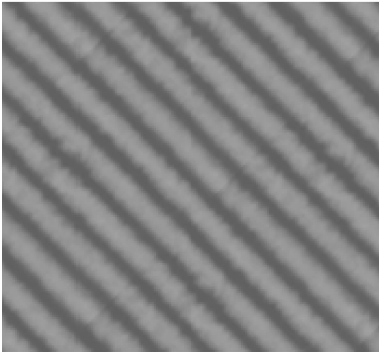


图4 正交斜楔型静态傅里叶干涉具的干涉条纹  
Fig. 4 Interference fringes of orthogonal-wedge static Fourier interferometer

图4中的干涉条纹已经去掉了边缘畸变部分. 因为在干涉具边缘产生的干涉条纹有明显的畸变, 干涉条纹不但不再均匀, 而且出现了变形, 印证了在1.2节中提到的非理想情况下的问题. 由于采用了正交斜楔型静态傅里叶变换干涉具, 在两个正交面上都有一个倾斜角度, 与传统干涉具相比棱镜1沿y轴方向的尺寸缩短了, 导致整个干涉具在此方向上比原有干涉具的有效尺寸减小了, 所以在干涉图像选取的过程中要去掉边缘畸变.

图中干涉条纹切除部分的长度 $d$ 是由倾斜角度、干涉具尺寸、工作波长共同决定的, 由于篇幅限制这里不做详细推导, 直接给出其公式

$$d=c(x\tan\phi_1+y\tan\phi_2)/L \quad (6)$$

式中: $c$ 为标定系数, 是通过实验标定得到的; $x$ 为 $x$ 轴的坐标,  $y$ 为 $y$ 轴的坐标; $\phi_1$ 为正交斜楔1的倾斜角度,  $\phi_2$ 为正交斜楔2的倾斜角度; $L$ 为正交斜楔型静态傅里叶变换干涉具的尺寸. 最后, 通过对干涉条纹图像中的干涉条纹灰度值提取, 并做傅里叶变换可求出激光波长799.5 nm, 与标准光谱仪检测的结果800.1 nm相比, 误差略大, 但小于1 nm的设计要求.

## 4 结论

针对静态傅里叶变换干涉具的光谱分辨率低的问题, 设计了正交斜楔型静态傅里叶变换干涉具. 在传统傅里叶变换干涉具的基础上, 增加了一个正交

的等效斜楔, 增大了有效探测长度, 从而提高了静态干涉具的光谱分辨率. 在计算分析了传统傅里叶变换干涉具和正交斜楔型傅里叶变换干涉具的光程差函数的基础上, 论证了该干涉具光程差的理论极限值为0.3234 mm, 相比传统的干涉具大4倍左右, 故器光谱分辨率也响应提高了4倍. 经实验验证, 与WQF520型光谱仪对比800 nm激光光谱探测可知, 误差小于1 nm.

## 参考文献

- [1] ACOSTA E, CHAMADOIRA S, BLENDOWSKE R. Modified point diffraction interferometer for inspection and evaluation of ophthalmic components[J]. *JOSA A*, 2006, **23**(3):632-637.
- [2] KOMISAREK D, REICHARD K, MERDES D, *et al.* High-performance nonscanning Fourier-transform spectrometer that uses a Wollaston prism array[J]. *Appl Opt*, 2004, **43**(20):3983-3987.
- [3] LÜ Qun-bo, YUAN Yan, XIANG Li-bin. Fourier transform imaging spectral data compression[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(3):573-576.  
吕群波, 袁艳, 相里斌. 傅里叶变换成像光谱数据压缩[J]. *光子学报*, 2008, **37**(3):573-576.
- [4] FAN Dong-dong, WANG Jian-gang, WU Min-xian. Interferometric imaging spectrometer for remote spectral sounding[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2001, **22**(4):53-58.  
范东栋, 王建岗, 邬敏贤. 用于遥感光谱探测的干涉成像光谱技术[J]. *航天返回与遥感*, 2001, **22**(4):53-58.
- [5] KRAUSE K M, GENEST J. Impact of interferometer optical path difference speed profile on the Fourier-transform-spectrometry-derived spectrum of a telecommunications signal[J]. *Appl Opt*, 2006, **45**(19):4684-4694.
- [6] LIU Zhi-chao, ZHANG Ji-long, WANG Zhi-bin. Study on static fourier transform spectrometer used in wide field of view detection[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **11**(5):2839-2843.  
刘智超, 张记龙, 王志斌. 静态傅里叶变换干涉具在大视场探测中的应用[J]. *光子学报*, 2009, **11**(5):2839-2843.
- [7] LUCEY P G, HORTON K, WILLIAMS T. High-performance sagnac interferometer using cooled detectors for infrared LWIR hyperspectral imaging[C]. *SPIE*, 2007, **6546**:1-7.
- [8] CUI Yan, JI Zhong-ying, GAO Jin, *et al.* Measurement of degree of polarization of spatially modulated imaging fourier transform spectrometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(6):1025-1027.
- [9] LEWIS I R, CHAFFIN N C, GUNTER M E, *et al.* Vibrational spectroscopic studies of asbestos and comparison of suitability for remote analysis[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 1996, **52**(3):315-328.
- [10] CHEN Qi, YANG Jian-feng, QIAO Wei-don, *et al.* Analysis for signal-to-noise ratio of large aperture static imaging spectroscopy[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(10):1889-1892.  
陈琦, 杨建峰, 乔卫东, 等. 大孔径静态干涉成像光谱仪的信噪比分析[J]. *光子学报*, 2007, **36**(10):1889-1892.
- [11] LIU Hai-bo, HUA Zhong, KARPOWICA N, *et al.* Terahertz spectroscopy and imaging for defense and security application[C]. *Proceedings of the IEEE*, 2007, **95**(8):1514-1527.

## A Method to Improve Spectral Resolution for the Static Fourier Interferometer

ZHAO Jun-qi<sup>1</sup>, LIU Zhi-chao<sup>2</sup>

(1 *Optoelectric Instrument Company, North University of China, Taiyuan 030051, China*)

(2 *College Of Optical And Electronical Information, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130012, China*)

**Abstract:** In order to improve spectrum resolution with the same size of the static Fourier transform interferometer, an orthogonal-wedge static Fourier transform interferometer is designed, which is made up by the two orthogonal-wedge for continuous optical path difference. According to the derivation of the optical path difference function with the tradition static Fourier transform interferometer and the orthogonal-wedge static Fourier transform interferometer, the structure of the two orthogonal-wedge is designed to increase the effective distance of detection for improving spectrum resolution of static interferometer. The simulation results show that the maximum optical path difference of the orthogonal-wedge interferometer is 0.323 4 mm, which is four times better than the traditional interferometer with 0.080 8 mm (optical path difference). Experimental results show that the orthogonal-wedge interferometer has the distortion of the interference fringes as a result of its detection principle, so it needs to be removed and filtering of the edge of the interference fringes. Using the WQF520 type spectrometer to comparative experiment for 800nm laser, the orthogonal-wedge interferometer error is less than 1 nm. This method can effectively improve the spectral resolution of the static Fourier transform interferometer.

**Key words:** Spectrum detection; Static Fourier interferometer; Orthogonal-wedge; Spectrum resolution



**ZHAO Jun-qi** was born in 1969. He received his M. S. degree in testing and intelligent instrument from North University of China. Now he is a senior engineer and his research interests focus on spectrum, information processing and photoelectric detection.