

文章编号: 0253-2239(2010)07-2001-05

# 基于非扫描式干涉仪的光谱探测研究

余本国 王建中

(中北大学信息与通信工程学院, 山西 太原 030051)

**摘要** 探测视场的大小是激光预警性能好坏的一个重要指标。在采用非扫描式傅里叶变换干涉仪探测激光光谱的实验基础上,计算了在 $60^\circ$ 视场范围内激光以任意角度入射时关于入射角度与相干位置的光程差函数,推导了干涉条纹间距与入射角度及波长的方程组,提出了采用两个干涉仪在垂直角度下运算求解的方法。经仿真计算可知,随入射角度的变化而造成干涉条纹变密、亮带变细和波长偏移等结果。实验证明,干涉条纹计算和仿真结果与实验相符,在较宽的视场范围内可以有效探测激光光谱信息,求解激光入射方向的最高精度可达 $1^\circ$ 。

**关键词** 探测器;激光光谱探测;非扫描式傅里叶变换干涉仪;视场

中图分类号 O657.3 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103007.2001

## Research on Spectrum Detection with Non-Scanning Spectrometer

Yu Benguo Wang Jianzhong

(School of Information and Communication Engineering, North University of China,  
Taiyuan, Shanxi 030051, China)

**Abstract** The field of view of the laser warning system is an important target of its performance quality. The laser spectrum based on the non-scanning Fourier transformation interferometer in the experiment foundation is investigated. The path difference function about the incident angle and the coherent position's is calculated for any angle laser incidences in the field of view in  $60^\circ$ . The two non-scanning Fourier transformation interferometers method is proposed to solve under the vertical angle. According to the simulation experimentation, it is found that the interference fringes changes dense, bright band thinning, and wavelength faraway when the incident angle's changes. The experiment proves that the interference fringe computation and the simulation result is coincident, the laser warning system may detect the laser spectrum information effectively in the wide field of view, and the highest precision of laser incidence direction may reach  $1^\circ$ .

**Key words** detector; spectrum detection; non-scanning Fourier transformation interferometer; the field of view

## 1 引言

激光侦察、激光测距和激光制导武器等在军事上的成功应用,促使世界上各军事强国都加速研制和应用激光预警接收系统<sup>[1,2]</sup>。为能有效预防遭受激光制导武器等的精确打击,研制新型激光预警接收器系统是必然趋势。来袭激光方向的测量作为激光告警的重要组成部分已被广泛地研究。同时,激光波长的告警主要依靠光栅型和干涉型探测器,由于光栅型探测器对光通量的影响较大,所以在激光

检测中干涉型应用更为广泛,而其中绝大部分都是以迈克耳孙干涉仪的原理为基础的<sup>[3,4]</sup>。而现有的迈克耳孙干涉仪<sup>[5~7]</sup>大多数是动镜扫描式的,虽然分辨率高,但结构复杂、不适合需要灵活机动的应用领域,而非扫描式傅里叶变换干涉仪<sup>[8]</sup>结构简单、稳定性好,采用非扫描式傅里叶变换干涉仪的光谱检测技术可以有效地应用于实时、机动的遥测领域。

扫描式傅里叶变换干涉仪和非扫描式傅里叶变换干涉仪都要求激光垂直入射,限制了实时、宽视场

收稿日期: 2009-07-10; 收到修改稿日期: 2009-10-18

基金项目: 国家自然科学基金(20051203JJ)资助课题。

作者简介: 余本国(1976—),男,博士研究生,主要从事现代计量测试理论及应用等方面的研究。

E-mail: yubg@nuc.edu.cn

导师简介: 王建中(1960—),男,博士,教授,主要从事现代测试理论及应用等方面的研究。

监测等遥测领域的应用。要对宽视场进行光谱分析,要加入其他辅助光学设备,造成系统复杂、稳定度降低。本文研究非垂直入射条件下产生干涉条纹的规律,根据该规律进行数据处理,从而实现激光的角度及波长信息的实时判断。

## 2 基本原理

### 2.1 基本结构

采用非扫描式傅里叶变换干涉仪对激光进行干涉处理,得到干涉条纹的光谱探测方法。图 1 是激光倾斜入射傅里叶干涉仪探测系统原理图,其中激光同时进入两个干涉器,一束激光入射  $ADA'D'$  面(干涉仪 1),经  $BDB'D'$  半透半反面分成两束,再分别由全反面  $ABA'B'$ 、 $BCB'C'$  反射后,由  $CDC'D'$  面

射出,探测器与  $CDC'D'$  面平行采集干涉条纹。由于边线  $BC_1$  与  $BC$  之间有  $\alpha$  倾角,所以从干涉仪出射的两束激光传播方向不同,所以干涉的两条光线并不是同一条光线,而是分束形成的(干涉仪 2 同理,到 CCD2 采集的是由  $A''B''C''D''$  面出射的干涉条纹)。

当激光倾斜入射时,激光在干涉仪中的路径发生了改变,并且对光程差及干涉条纹间距造成影响,所以干涉条纹不仅仅是波长的函数,而是关于入射角度与待测波长的二元函数。这样同一方向的激光相对于每个干涉仪的入射方向是不同的,而波长不变,再通过事先标定好的校正函数可以列出关于入射角度与待测波长的二元方程组,即可计算得到入射激光波长及方向。

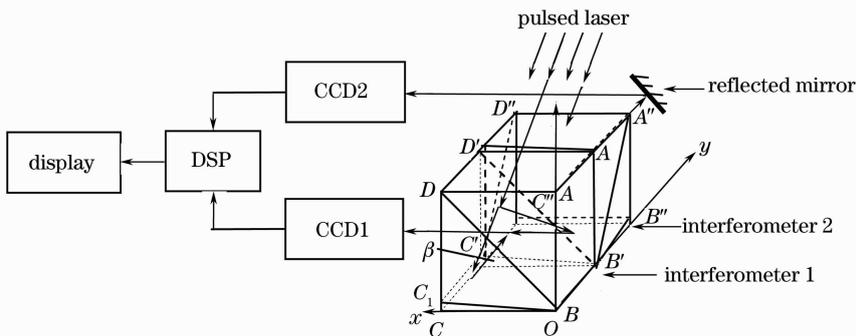


图 1 非扫描式傅里叶变换干涉仪探测系统原理示意图

Fig. 1 Principle of non-scanning Fourier transformation interferometer system

### 2.2 激光干涉条件分析

对于任意角度入射激光产生的干涉条件的推导如下,如图 2 所示,在激光以角度  $\theta$  入射  $xOy$  面时,斜楔角度为  $\alpha$ ,  $a$  为非扫描式傅里叶干涉仪的边长,  $x'$  是  $BC$  上  $B$  到相干位置的长度,其中  $\overline{NP} = r'_2$ ,

$\overline{MP} = r'_1, \overline{OP} = r_p, \overline{BP} = r_x, \overline{OB} = r_{22}, \overline{OM} = r_1, \overline{ON} = r_2, \overline{BM} = r_{12}$ ; 在介质折射率为  $n$  的非扫描式傅里叶干涉仪中光程差等于其几何路径长度差。

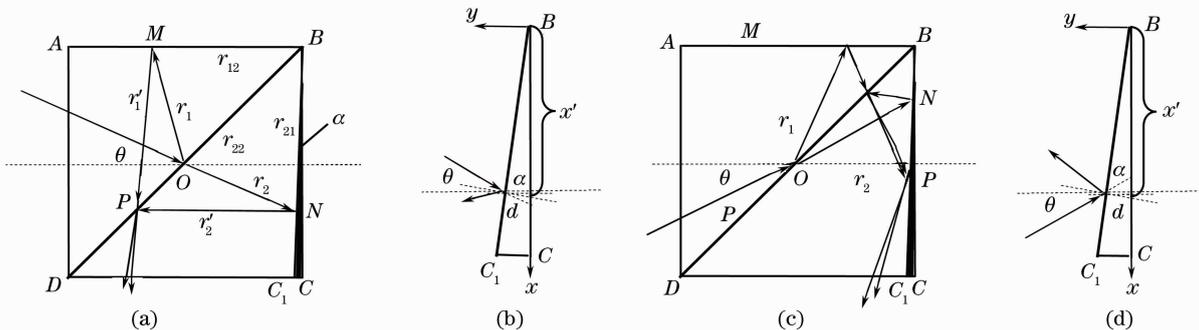


图 2 倾斜入射干涉具的干涉示意图。(a)  $\theta > 0$  入射干涉; (b) 等效斜楔; (c)  $\theta < 0$  入射干涉; (d) 等效斜楔

Fig. 2 Sketch map of the incline incidence interference. (a) interference in  $\theta > 0$ ; (b) equivalent wedge; (c) interference in  $\theta < 0$ ; (d) equivalent wedge

通过正弦定理、余弦定理计算可得  $r_1, r_2, r'_1, r'_2, r_{12}, r_{21}, r_{22}, r_p, r_x$  为  $x', \theta$  的函数, 则有

$$\begin{cases} \Delta_1 = f_{11}(x', \theta) + f_{12}(x', \theta) = f_1(x', \theta) \\ \Delta_2 = f_{21}(x', \theta) + f_{22}(x', \theta) = f_2(x', \theta) \end{cases}, (1)$$

式中对  $\Delta_1$  有

$$\begin{cases} f_1(x', \theta) = r_1 - r_2 = f_{11}(x', \theta) \\ f_2(x', \theta) = r'_1 - r'_2 = f_{12}(x', \theta) \end{cases}, \quad (2)$$

$$\begin{cases} r'_1 = \frac{\sqrt{2}x' \sin(\pi/2 + \alpha - \theta)}{\cos \alpha \sin(\pi/4 + \theta) \sin \theta} \\ r'_2 = \sqrt{r_2^2 + \left[ \frac{r_{22}^2 + r_{12}^2 - r_1^2 + \sqrt{2}r_{12}r_{22}}{\sqrt{2}r_{12} - 2r_{22} - 2r_1 \cos(\pi/2 + \theta)} \right] - 2r_2 \left[ \frac{r_{22}^2 + r_{12}^2 - r_1^2 + \sqrt{2}r_{12}r_{22}}{\sqrt{2}r_{12} - 2r_{22} - 2r_1 \cos(\pi/2 + \theta)} \right] \cos\left(\frac{3\pi}{4} - \theta\right)} \end{cases}. \quad (3)$$

对  $\Delta_2$  同理可得关于已知变量的函数方程。激光入射方向与  $yOz$  面平行，所以以  $\phi$  角入射的光程差为在正入射方向上的光程差分量，正入射光程差为  $\Delta = n\Delta l = 2nx' \tan \alpha$ ，则以  $\phi$  角入射产生的光程差为  $\Delta_3 = n\Delta l = 2nx' \tan \alpha \cos \phi$ 。对于其更普遍的情况，当激光以任意角入射时，将其分解为三个矢量分别为  $Q_x, Q_y, Q_z$ ，如图 3 所示。整个光路可分解为(1)式和  $Q_z$  的矢量和， $Q_z$  对光程差没有贡献，但对幅值有影响，有效辐射量等于总辐射量乘以其余弦。所以光程差为(1)式中光程差乘以  $\cos \phi$ ， $\Delta_4 = f_1(x', \theta) \cos \phi$ ， $\Delta_5 = f_2(x', \theta) \cos \phi$ 。

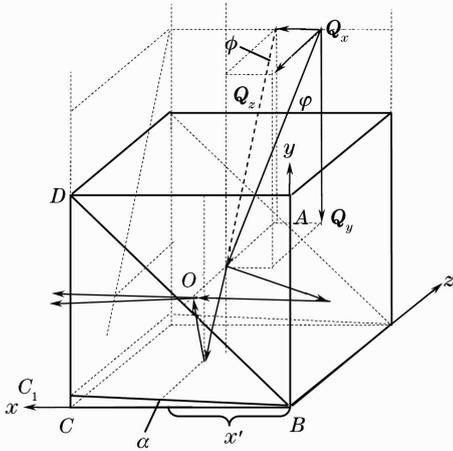


图 3 倾斜入射干涉具的干涉示意图

Fig. 3 Sketch map of the interference in incline incidence at  $\phi$

### 2.3 建立干涉条纹函数方程

当光程差为入射激光波长的整数倍时，即

$$x = 2nx' \tan \alpha = c\lambda. \quad (4)$$

对应的条纹为亮纹，其中  $c$  为非负整数， $\lambda$  为入射激光波长。在  $BB'C'$  上光程差为  $\lambda$  的两点之间的间距

$$\Delta x' = \frac{\lambda}{2n \tan \alpha}. \quad (5)$$

则关于入射角度及波长的干涉条纹函数可写成

$$\Delta x' = \frac{\lambda}{2n \tan \alpha} \cos \theta. \quad (6)$$

则列方程组

$$\begin{cases} \Delta x'_1 = \frac{\lambda_1}{2n \tan \alpha} \cos \theta \\ \Delta x'_2 = \frac{\lambda_2}{2n \tan \alpha} \cos \phi \end{cases}, \quad (7)$$

式中  $\Delta x'_1, \Delta x'_2$  是探测得到干涉条纹的一个周期宽度， $(\theta, \phi)$  可以唯一确定激光入射角度， $\theta, \phi, \lambda$  都是自变量，将  $(\theta, \phi)$  当作一个数组变量（一个单变量），循环运算求解  $\theta, \phi, \lambda$ 。当最小分辨角度为  $1^\circ$  时，在  $60^\circ$  的视场中该变量共有  $45 \times 45$  个元素（对应选用的探测器），则每个角度分别对应一个确定的  $(\theta, \phi)$ ，再将  $(\theta, \phi)$  作为一个常数带入(7)式，循环运算至  $\lambda = \lambda_1 = \lambda_2$  时， $\lambda$  为激光波长，此时  $(\theta, \phi)$  为激光角度。由图 1 可以看出两个干涉仪的位置相差一个  $\beta$  角度垂直放置，计算可知对于干涉仪 1 的  $\theta$  相当于干涉仪 2 的  $\phi + \beta$ ，同时对于干涉仪 2 的  $\theta$  相当于干涉仪 1 的  $\phi + \beta$ ，即将激光方向分解到  $xOy$  面上的  $\phi$  和  $yOz$  面上的  $\theta$  的矢量和，所以以上循环运算时仅有一组  $(\theta, \phi)$  唯一可使(7)式成立，同时加入  $\beta$  角可以有效避免完全垂直造成的在两干涉具角平分线上的不可识别区域。

### 3 仿真计算

在边长 30 mm，斜楔角度  $\alpha = 0.1^\circ$  的条件下，应用 Matlab 对光程差进行仿真实验，得到关于干涉位置  $x'$  与入射角度  $\theta$  的光程差函数  $\Delta = f(x', \theta)$ 。图 4(a), (b) 表示当激光平行  $xOy$  面，分别以角度  $\theta$  从高、低入射时的光程差函数；图 4(b) 表示当激光入射方向与  $yOz$  面平行入射时的光程差函数。

通过对干涉条纹函数方程的仿真，再取值分析可知在倾斜入射时，得到的光程差变化量峰值部分保持时间长，零附近的变化快，所以产生的条纹应该是明条纹宽于暗条纹；在图 4(a) 中光程差超过波长整数倍的部分可以等同于在一个周期内进行相干处理，所以对比图 4(a) 与图 4(b) 可知在同样角度及位置变化过程中，倾斜入射的激光所产生的光程差变

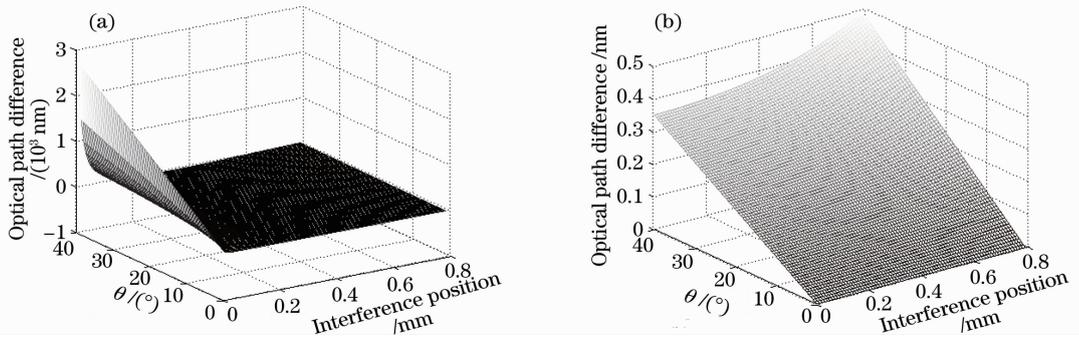


图 4 干涉仪光程差函数。(a)  $Q_z=0$  情况下的光程差; (b)  $Q_z \neq 0$  情况下的光程差

Fig. 4 Optical path difference function in interferometer. (a) optical path difference by  $Q_z=0$ ;

(b) optical path difference by  $Q_z \neq 0$

化速率快,这表示比垂直入射情况下的干涉条纹要密;(7)式中三个变量可以唯一的确定该点光程差。

## 4 实 验

采用折射率  $n=1.46$ , 边长 30 mm、斜楔角度  $0.1^\circ$  的非扫描式傅里叶变换干涉仪,激光中心波长 850 nm,两条线阵 CCD 探测器,通过串口将数据采集传输给数字信号处理器(DSP),再由 DSP 对干涉条纹进行数据处理,当视场在  $60^\circ$  视场内变化时,条纹变化如图 5 所示。

图 6(a)为 850 nm 激光器在垂直入射非扫描式傅

里叶变换干涉仪后,在探测器上采集到的干涉条纹的 12 bit 灰度数据;图 6(b)为条纹通过傅里叶变换后得到的频谱。当激光入射角度改变时,带入相同的傅里叶变换程序中(这里不一一列出),仍然可以得到该激光的频谱,但是因为受到角度变化的影响,波长将发生变化,由实验数据得,每改变  $1^\circ$  对应的投影分量增加,从而向长波方向频谱偏移 2 nm,超过本光谱分析软件最低分辨率 1 nm 的分辨极限,所以在每改变  $1^\circ$  的条件下可以识别,即探测精度为  $1^\circ$  时波长可最小识别 2 nm 的差别,且在单波长激光入射时满足同时判断激光角度与方向的要求。

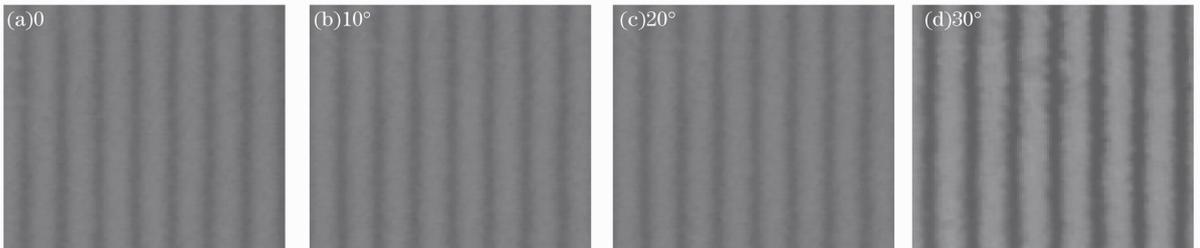


图 5 不同角度入射产生的干涉条纹

Fig. 5 Interference pattern in difference angle

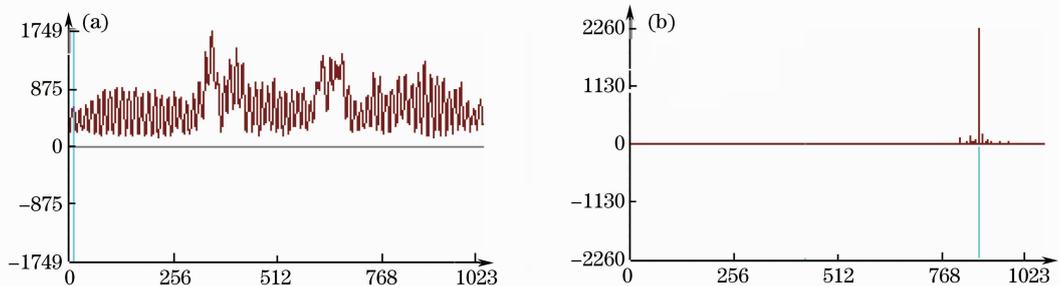


图 6 850 nm 激光傅里叶变换频谱图。(a)干涉图;(b)激光波长

Fig. 6 Spectrum of 850 nm laser by FFT. (a) interference pattern; (b) laser wavelength

通过采集干涉条纹 12 bit 灰度变化值,应用傅里叶变换程序将灰度数据导入数据输入端,通过快速傅里叶变换得到的功率谱中求出干涉条纹的平均

长度,经光谱标定算法求解可得  $\Delta x'_1, \Delta x'_2$ 。由(7)式可得角度变化在  $1^\circ$  内对波长的影响为 2 nm(为满足干涉仪材料特性要求以 1100 nm 为上限),满足

精度要求,所以选择最小变化角度为  $1^\circ$ ,每当角度变化  $1^\circ$  时产生干涉条纹宽度最小变化量为  $0.008\Delta x'$ ,可以在满足探测精度的条件下实现(7)式中的循环求解。

## 5 结 论

针对非扫描式傅里叶变换干涉仪探测视场小的缺点,改进了现有静态干涉仪的结构特性,提出了用于大视场激光光谱探测的方法。计算了在  $60^\circ$  视场角范围内对倾斜入射干涉仪而产生的干涉条纹方程,推导了角度与光程差、条纹间距与入射角度的函数。仿真结果显示,在确定位置干涉条纹可对应确定的光程差函数,干涉条纹会随着入射角度的增大变密,条纹周期个数也会增大,但仍能探测。在设计中  $\beta$  角起到了避开探测盲区的效果。采用双 CCD 线阵探测器采集干涉条纹,再分析得到的灰度值变量。实验结果表明,当激光方向选择最小识别角度为  $1^\circ$ ,波长最小分辨率为  $2\text{ nm}$ ,采用该方法可以同时检测激光方向与波长。

## 参 考 文 献

1 K. C. Dilip. Examination of the long-path open-air FTIR technique for air monitoring in the state of kentucky[C]. *SPIE*,

1995, **2365**: 347~357

2 Cui Yan, Ji Zhongying, Gao Jing *et al.*. Measurement of degree of polarization of spatially modulated imaging Fourier transform spectrometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(6): 1025~1027

崔燕, 计忠瑛, 高静等. 空间调制干涉光谱成像仪偏振度测试[J]. *光子学报*, 2008, **37**(6): 1025~1027

3 I. R. Lewis, N. C. Chaffin, M. E. Gunter *et al.*. Vibrational spectroscopic studies of asbestos and comparison of suitability for remote analysis [J]. *Spectrochim. Acta A*, 1996, **52**: 315~328

4 T. W. William. Sensitive detection of chemical agents and toxic industrial chemicals using active open-path FTIR [C]. *SPIE*, 2004, **5270**: 144~150

5 Ao Lei, Tan Jiubin, Cui Jiwe *et al.*. Fast and precise center location for circle target of CCD laser autocollimator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 253~258

敖磊, 谭久彬, 崔继文等. 一种快速高精度激光 CCD 自准直仪圆目标中心的定位方法 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 253~258

6 Lü Qunbo, Yuan Yan, Xiangli 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

7 Li Sining, Wang Qi, Liu Jinbo *et al.*. Experimental research on resolution of streak tube imaging lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 1023~1026

李思宁, 王骐, 刘金波等. 条纹管激光成像系统空间分辨力实验研究 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 1023~1026

8 M. Ghazel, A. Traboulsee, R. K. Ward. Optimal filter design for multiple sclerosis lesions segmentation from regions of interest in brain MRI [C]. *IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology*, 2006, 1~5