

文章编号: 1007-5461(2005)02-0286-04

基于 MATLAB 的光纤 Fabry-Perot 干涉仪光源光谱信号的仿真计算

余瑞兰^{1,2}, 刘勇¹, 王安¹, 李保生¹

(1 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;

2 安徽师范大学物理与电子信息学院, 安徽 芜湖 241000)

摘要: 根据低反射率光纤 Fabry-Perot 干涉仪反射光强与腔长变化的关系, 利用 Matlab 求解了光源的光谱信号。通过实例运算了 632.8 nm 波长的 He-Ne 激光光源光谱, 说明该方法简单、方便且计算精度高, 为实验测量提供有益参考。

关键词: 纤维光学; Matlab; 光纤 F-P 干涉仪; 光谱信号

中图分类号: O646.54 **文献标识码:** A

1 引言

Matlab 是一套用于科学工程计算可视化的高性能语言与软件环境。它集数值分析、矩阵运算、信号处理和图形显示于一体, 构成了一个界面友好的用户环境, 在这个环境中, 问题与求解都能方便地以数学的语言或图形方式表示出来。其基本元素是无须定义维数的矩阵, 它研制的初衷是方便矩阵的存取, 但经过几十年的扩充和改善, 已成为各类科学研究与工程应用的标准工具, 其典型应用有: 数值分析、算法设计、自动控制、数字信号处理、图像处理以及模型仿真等等。本文根据低反射率光纤 F-P 干涉仪反射光强与腔长变化的关系, 利用 Matlab 求解了光纤 F-P 干涉仪的光源特征谱线。为实验测量提供有益参考。

2 光纤 F-P 干涉仪

光纤干涉仪是最有希望实现灵巧结构的干涉器件, 它具有体积小、易弯曲、抗电磁干扰等特点, 具有很大的研究、开发和应用价值。按结构分为麦克耳逊、马赫-泽德、赛格纳克和法布里-珀罗 (Fabry-Perot 缩写为 F-P) 型。而 F-P 型干涉仪因只需用一根光纤而受到研究者的广为研究和应用。其 F-P 腔是由一段光纤及在其两端镀上反射镜构成。通常是把光纤紧绕在压电陶瓷 (PZT) 上, 通过加在 PZT 上的信号来调制 F-P 干涉腔的长度, 从而达到改变光波相位的目的。低反射率单模光纤 F-P 干涉腔反射光强 I_R 与干涉腔长度变化 x 的关系为^[1]

$$I_R = 2I_0R \left[1 - \sin \left(\frac{4n\pi k_l}{\lambda} x \right) \right]. \quad (1)$$

式中 I_0 为入射光强, R 为 F-P 腔两端面反射率的乘积, n 为光纤折射率, k_l 为光纤应变系数。令 $I_d = 2I_0R$, $I_s = -2I_0R \sin \left(\frac{4n\pi k_l}{\lambda} x \right)$, 改写 (1) 式, 得

$$I_R = I_d + I_s(x). \quad (2)$$

基金项目: 中国科学院合肥分院院长基金资助项目, 安徽师范大学“皖泰”应用开发研究基金资助项目

收稿日期: 2003-11-06; **修改日期:** 2003-11-24

E-mail: wag@aiofm.ac.cn

探测器上产生的信号是直流部分 I_d 和交流部分 I_s 之和。从光谱实际测量来看, 一般来说仅有交流部分才有意义。滤去直流分量 I_d , 得

$$I_R = I_s(x) = k \sin\left(\frac{4n\pi k_l}{\lambda} x\right), \quad (3)$$

式中 $k = 2I_0R$ 。当 x 在较小的范围内变化时, 我们容易得到 $\frac{4n\pi k_l}{\lambda} x \ll 1$, 则 (3) 式等效为

$$I_s(x) = k \frac{4n\pi k_l}{\lambda} x. \quad (4)$$

3 光源光谱信号实例分析

用干涉仪虽能测得光源干涉图, 这干涉图又包含有全部入射光谱的信息。但从极为相似的干涉图去辨认光源的特征谱线却是十分困难的, 虽然有人对直接辨认干涉图作了种种尝试, 但到目前还不能直接进行分析, 因此还需要把含有各种光谱信息的干涉图变换成我们熟悉的光谱图, 实际上只要把 (3) 式或 (4) 式进行傅里叶数字变换, 就能得到我们需要的光源光谱 [2]

$$B(v) = \int_0^{+\infty} I_s(x) \cos 2\pi v x dx. \quad (5)$$

式中, v 为波数。在实际的测量中, 获得无穷大的光程差是不可能的, 这就需要对无限的干涉图进行截断, 一般采用矩形函数 $D(x)$ 来实现, 其形式如下式

$$D(x) = \begin{cases} 1, & -L < x < +L \\ 0, & x < -L \text{ 或 } x > +L, \end{cases} \quad (6)$$

截断后的光谱可以表达为

$$B(v) = \int_{-L}^{+L} I_s(x) \cos 2\pi v x dx. \quad (7)$$

下面我们以 $0.6328 \mu\text{m}$ 的氦氖激光光源为例, 用 Matlab 计算光纤 F-P 干涉腔光源干涉图和光谱图。

(1) $\frac{4n\pi k_l}{\lambda} x \ll 1$ 的情形当 $\frac{4n\pi k_l}{\lambda} x \ll 1$ 时, 我们施加频率为 f_1 的正弦信号电压驱动 PZT 以改变光纤 F-P 干涉腔长, 即 $x = A \sin 2\pi f_1 t$, A 为干涉腔长度改变的最大值, 且 $A \ll \frac{\lambda}{4n\pi k_l}$ 。取正弦信号电压的频率 f_1 为 50 Hz, 采样频率 f_s 为 500 Hz, 采样点数 N 取 512, 光纤折射率 n 取 1.5。当光纤直径约为 $5 \mu\text{m}$, 光源的波长为 $0.6328 \mu\text{m}$ 时, 光纤应变系数 k_l 为 $0.7912^{[1]}$, 计算该种情况下 F-P 干涉仪光源的特征谱线, 可以采用近似公式 (4), 其 Matlab 程序如下

```
t=0:0.001:0.2;
s=4*n*pi*k_l/w; x=sin(2*pi*f_1*t);
y=s*x; Y=fft(y,512);
Pyy=Y.*conj(Y)/512;
f=fs*(0:256)/512;
subplot(2,1,1); plot(y);
title('Interference signal of F-P');
xlabel('optical path change(μm)');
ylabel('Relative interference intensity');
```

```
subplot(2,1,2); plot(Pyy(1:257));
title('Spectrum signal of F-P');
xlabel('wavenumber(1/cm)');
ylabel('Relative spectrum intensity');
```

由此得到氦氖光源的干涉图和光谱图如图 1、2 所示。主峰两边出现的小的旁瓣是因为干涉图两端被突然截断，其值突然降为零，导致干涉图在此处出现尖锐的不连续，引起扰动而产生的。在实验测量中可以采用一个渐变的权重函数来乘干涉图，以缓和干涉图在此处的不连续性。

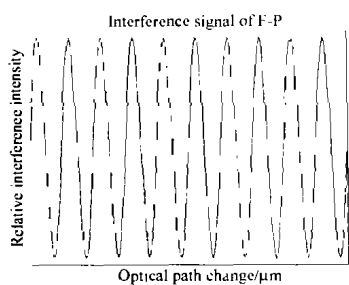


Fig.1 The interference signal of He-Ne as $x \ll 1$

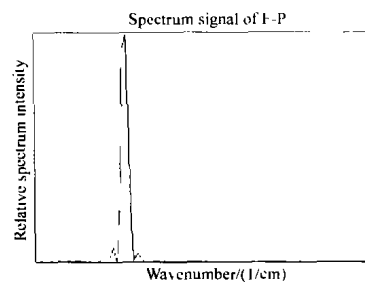


Fig.2 The spectrum signal of He-Ne as $x \ll 1$

(2) $\frac{4n\pi k_l}{\lambda}x > 1$ 的情形当 x 在较大的范围内变化时，我们就必须采用 (3) 式进行计算，将其 Matlab 程序中的 y 的表达式修改为 $y = \sin(s * x)$ 即可得如图 3、4 所示的干涉图和光谱图。图中出现的其它几个小的尖峰是由所加正弦信号电压引起的高次谐波产生的。在实际实验测量与应用中，可以采用适当的滤波器将其滤除。

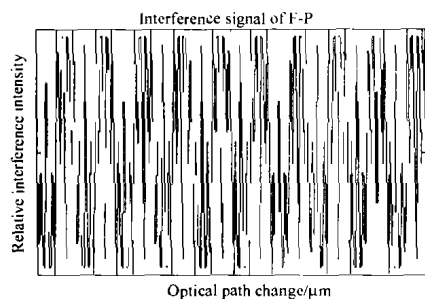


Fig.3 The interference signal of He-Ne as $x > 1$.

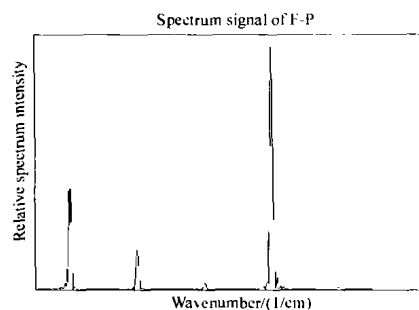


Fig.4 The spectrum signal of He-Ne as $x > 1$.

为了避免高次谐波引起的其它尖峰的出现，在实际实验和应用中可以采用锯齿波信号电压驱动 PZT 来改变 F-P 干涉腔的长度。这时只需在上面用正弦信号计算的 Matlab 程序的基础上把驱动电压信号 x 的表达式改为 $x = \text{sawtooth}(2 * \pi * f_1 * t)$ ，其它参数不变，即可得到如图 5、6 所示的干涉图和光谱图。

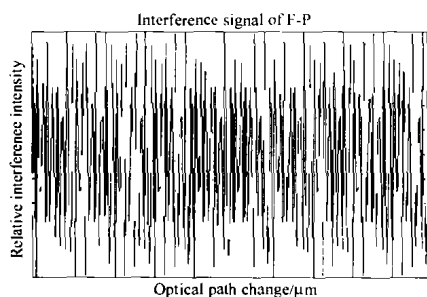


Fig.5 The interference signal of He-Ne as $x > 1$

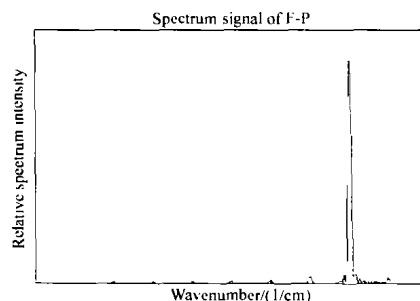


Fig.6 The spectrum signal of He-Ne as $x > 1$

4 讨 论

(1) 本文以工作波长 $\lambda=632.8$ nm 作为典型值, 用 Matlab 软件计算了光纤 F-P 干涉仪光源的特征谱线, 为实验测量提供有益参考。其计算和分析方法同样适用于其它工作波长的光源。

(2) 在计算技巧方面, 由于使用 Matlab 编程运算与人进行科学计算的思路和表达方式完全一致, 所以不象其它高级语言 — 如 Basic、Fortran 和 C 等那样难于掌握, 用 Matlab 编写程序犹如在演算纸上排列出公式与求解问题, 对所要求解的问题, 用户只需简单地列出数学表达式, 其结果便以数值或图形方式显示出来。

参考文献:

- [1] Bi Weihong, Mathematical models for fiber-optical Fabry-Perot interferometric cavity [J]. *Acta Photonica Sinica*(光子学报), 1999, 28(8): 744-747 (in Chinese).
- [2] Lin Miao, Wu Pingping, et al, *Applied Infrared Fourier-transform Spectroscopy* [M]. Beijing: China environmental Science Press, 1991. 9 (in Chinese).
- [3] Zhang Peiqiang. *Matlab Language* [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1995. (in Chinese)
- [4] Xiao Shaorong, Chen Jinbang, Yan Jie. Analysis of signals in fiber optic gas sensor based on opening cell [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics* (量子电子学报), 2002, 19(6): 531-535 (in Chinese).
- [5] Wang Xia, Wang Xiaodong. Improvement of the interferometric precision of laser beams based on genetic algorithms [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics* (量子电子学报), 2003, 20(3): 332-337 (in Chinese).

Simulation of light source's spectrum signal of fiber-optic Fabry-Perot interferometer based on MATLAB

YU Rui-lan^{1,2}, LIU Yong¹, WANG An¹, LI Bao-sheng¹

(1 Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China ;

2 College of Physics and Electronic Information, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China)

Abstract: According to the relationship between fiber-optical F-P cavity longitudinal change of a low reflectivity and intensity of the interferometric light, we calculated the spectrum signal of light source with MATLAB. Using this method, we have obtained the spectrum signal of He-Ne laser whose wavelength is 632.8nm. The result shows that this method has the advantages of simple, convenient and high precision, and also can present helpful reference to experiment.

Key words: fiber optics; Matlab; fiber optic F-P interferometric cavity; spectrum signal

作者简介: 余瑞兰 (1976 -), 女, 安徽黄山人, 1998年毕业于安徽师范大学应用电子专业, 同年留校任教。现为中国科学院安徽光学精密机械研究所攻读硕士, 从事光纤傅里叶变换光谱仪的研究工作。