

文章编号: 0253-2239(2005)02-186-4

基于傅里叶变换的光纤法布里-珀罗 传感器解调研究*

章 鹏 朱 永 唐晓初 陈伟民

(重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 从双光束干涉的基本原理出发,分析了高斯分布光源条件下利用傅里叶变换解调光纤法布里-珀罗传感器的原理。针对高斯分布光源特点,提出直接对波长均匀采样得到的光谱数据进行快速傅里叶变换,然后利用传感器腔长与频域中峰值频率之间的关系求解传感器腔长的可行性。在此基础上,采用频谱插值技术提高了系统解调精度,并利用宽带光源和光谱仪等组成的解调系统,对所提出的方法进行了实验验证。结果表明,从实验中测得的数据与理论计算值能较好地吻合。

关键词: 信息光学; 傅里叶光学与光信号处理; 法布里-珀罗传感器; 傅里叶变换; 高斯分布; 解调
中图分类号: O438.2 文献标识码: A

Demodulation of the Optical Fiber Fabry-Perot Sensor Based on Fourier Transform

Zhang Peng Zhu Yong Tang Xiaochu Chen Weimin

(The Key Laboratory for Optoelectronic Technology & System, Education Ministry of China,
Chongqing University, Chongqing 400044)

Abstract: Based on the principle of two-beam interferometer, the demodulating theory of optical fiber Fabry-Perot sensor illuminated by Gauss distributed optical source was demonstrated via Fourier transform method. According to the characteristic of Gauss distributed optical source, the feasibility of measuring cavity length was presented by directly applying an fast Fourier transform (FFT) algorithm to the data sampled at equal optical wavelength interval and using the relation of cavity length and the peak frequency in the frequency domain. The demodulation precision was increased with frequency spectrum interpolating technology, and the experimental verification was accomplished with the help of the demodulating system constituted by broadband light source and spectrometer etc. The measured data are coincident well with theoretically calculated data.

Key words: information optics; Fourier optics and optical signal processing; Fabry-Pérot sensor; Fourier transform; Gauss distribution; demodulation

1 引 言

利用傅里叶变换方法对光纤法布里-珀罗传感器解调受信号噪声的影响小;可以对法布里-珀罗传感器复用信号解调;解调速度快,适合于数据实时采集场合,是光纤法布里-珀罗传感器的解调方法之一。通过对光频率均匀采样的反射输出光强信号做傅里

叶变换,找出腔长所对应的频率后根据腔长与频率的关系就可以求解出光纤法布里-珀罗传感器的腔长^[1,2]。然而,以上结论是在各波长单色光强度相等的理想宽带光源条件下得出的,在实际应用中,通常采用的是各波长强度呈高斯分布的宽带光源,该光源将影响光纤法布里-珀罗传感系统^[3,4]。因此,在高斯

* 国家自然科学基金重点项目(50135030)资助课题。

作者简介:章鹏(1970~),湖北荆州人,博士研究生,主要从事光纤传感及信号处理方面的研究。

E-mail: zhangpeng1970@yahoo.com.cn.

收稿日期:2004-01-16;收到修改稿日期:2004-06-15

分布光源条件下对傅里叶变换解调光纤法布里-珀罗传感器的原理进行研究具有重要的实用意义。

2 解调原理

光纤法布里-珀罗传感器主要基于白光多光束干涉的原理,其结构如图 1 所示。

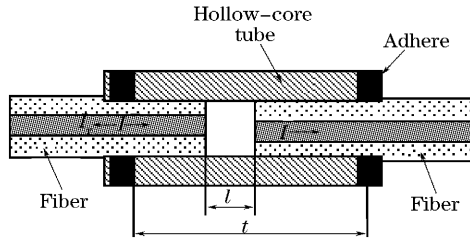


图 1 光纤法布里-珀罗传感器结构

Fig. 1 Structure of the fiber Fabry-Pérot sensor

当一束光通过光纤入射到法布里-珀罗腔时,在腔的两端面将发生多次反射和透射,形成多光束干涉。若两个镜面的反射率皆为 R ,入射光波长与强度分别为 λ, I_0 ,根据多光束干涉原理,在不考虑损耗的情况下可以得到反射光的光强分布为

$$I_r = \frac{2R[1 - \cos(4\pi l/\lambda)]}{1 + R^2 - 2R\cos(4\pi l/\lambda)} I_0. \quad (1)$$

当光纤法布里-珀罗腔的两个端面反射率较小时,可以用双光束干涉代替多光束干涉,此时,

$$1 + R^2 - 2R\cos(4\pi l/\lambda) \approx 1,$$

(1) 式就可以近似为下式^[5]:

$$I_r = 2R \left[1 - \cos\left(\frac{4\pi l}{\lambda}\right) \right] I_0, \quad (2)$$

由于光波长和光频率之间存在着下列关系:

$$\nu = \frac{c}{\lambda}, \quad (3)$$

(2)式可以写成下式的形式:

$$I_r = 2R \left[1 - \cos\left(\frac{4\pi \nu l}{c}\right) \right] I_0, \quad (4)$$

在实际应用中,一般采用各波长强度呈高斯分布的宽带光源,其表达式为:

$$I_0(\lambda) = I_0 \exp\left[-\frac{(\lambda - \lambda_p)^2}{B_\lambda^2}\right], \quad (5)$$

其中 λ_p 是光源光谱的峰值波长, B_λ 是光源光谱带宽所决定的高斯函数的半峰全宽。

将 $\nu = c/\lambda$ 代入(5)式,得到

$$I_0(\nu) = I_0 \exp\left[-\frac{(\nu - \nu_p)^2}{-2(\sigma_\lambda \nu \nu_p / c)^2}\right], \quad (6)$$

式中 $\nu_p = c/\lambda_p, \sigma_\lambda = B/\sqrt{2}$ 。也就是说实际光源强度对光频率 ν 来说已不是高斯分布,如果将上式中指数部分的变量展开为泰勒级数:

$$\begin{aligned} \frac{\nu - \nu_p}{\nu} &= \frac{\nu - \nu_p}{\nu_p} - \frac{(\nu - \nu_p)^2}{\nu_p^2} + \dots = \\ &= \frac{\nu - \nu_p}{\nu_p} \left(1 - \frac{\nu - \nu_p}{\nu_p} + \dots \right), \end{aligned} \quad (7)$$

取一阶近似,代入(6)式得

$$I(\nu) \approx I_0 \exp\left[-\frac{(\nu - \nu_p)^2}{2\sigma_\nu^2}\right], \quad (8)$$

即光源强度对光频率仍可近似为高斯函数分布。

将(8)式代入(4)式,可以得到高斯光源条件下的传感器反射输出光强信号为

$$I_r = 2R \left[1 - \cos\left(\frac{4\pi \nu l}{c}\right) \right] \exp\left[-\frac{(\nu - \nu_p)^2}{2\sigma_\nu^2}\right] I_0, \quad (9)$$

对(9)式作傅里叶变换,可以得到

$$\begin{aligned} F(j\Omega) &= 2 \sqrt{2\pi} R I_0 \sigma_\nu \left[\exp(-j\nu_p \Omega) \exp(-\sigma_\nu^2 \Omega^2 / 2) \right] + \\ &= \sqrt{2\pi} R I_0 \sigma_\nu \left\{ \exp\left[-j\left(\Omega - \frac{4\pi l}{c}\right)\nu_p\right] \exp\left[-\sigma_\nu^2 \left(\Omega - \frac{4\pi l}{c}\right)^2 / 2\right] \right\} + \\ &= \sqrt{2\pi} R I_0 \sigma_\nu \left\{ \exp\left[-j\left(\Omega + \frac{4\pi l}{c}\right)\nu_p\right] \exp\left[-\sigma_\nu^2 \left(\Omega + \frac{4\pi l}{c}\right)^2 / 2\right] \right\}. \end{aligned} \quad (10)$$

当中心波长 $\lambda_p = 825$ nm,光谱半峰全宽 $B_\lambda = 40$ nm,反射率 $R = 0.04$,腔长 $l = 30$ μm 时,光纤法布里-珀罗传感器的仿真输出光强信号及其傅里叶变换如图 2、图 3 所示。

从图 3 可以看出,在高斯光源条件下,光纤法布里-珀罗传感器反射输出光强信号的傅里叶变换的

幅频特性曲线由两高斯函数组成。函数的中心点分别位于直流零点和 $\Omega_i = 4\pi l/c$ 处。因此,只要两高斯频谱不产生混叠,利用傅里叶变换得到腔长所对应的角频率 Ω_i 后,由下式就可以得到光纤法布里-珀罗传感器的腔长值:

$$l = \Omega_i c / (4\pi). \quad (11)$$

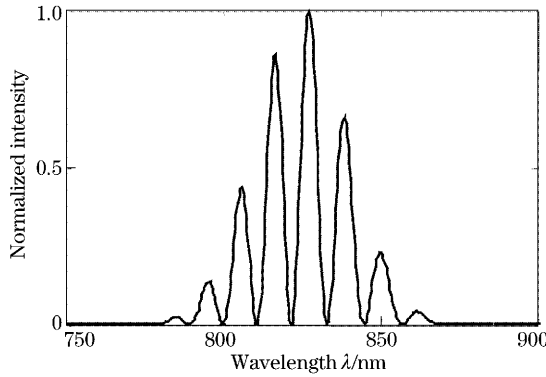


图 2 光纤法布里-珀罗传感器仿真输出信号

Fig. 2 Simulated output intensity of the Fabry-Pérot sensor

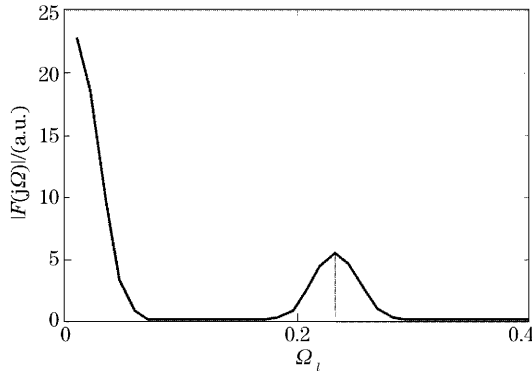


图 3 光纤法布里-珀罗传感器仿真输出信号的傅里叶变换幅度谱

Fig. 3 Amplitude spectrum of Fourier transform of Fabry-Pérot sensor output signal

3 解调算法的实现

从以上解调原理可以看出,傅里叶变换都是对光频率来进行的,对应到离散域来说,必须要求光谱输出设备对光频率均匀采样才能满足傅里叶变换的要求。然而,在高斯分布光源条件下,由下列分析可以不必进行插值处理。

设波长的最大值和最小值分别为 λ_{\max} 和 λ_{\min} , 采样点为 N , 则波长间隔为

$$\delta\lambda = (\lambda_{\max} - \lambda_{\min})/N, \quad (12)$$

对应的光频率间隔为

$$\delta\nu = \frac{c}{\lambda} - \frac{c}{\lambda + \delta\lambda} = \frac{c \cdot \delta\lambda}{\lambda(\lambda + \delta\lambda)}, \quad (13)$$

由于光源光强的高斯分布特性,幅值较大的样本主要分布在中心频率 λ_p 附近,因此可以认为 $\lambda(\lambda + \delta\lambda) \approx \lambda_p^2$, 即

$$\delta\nu = c \cdot \delta\lambda/\lambda_p^2, \quad (14)$$

也就是说光强信号对光频率来说仍然可以看成是均

匀采样的。因此,对一维光强信号进行高通滤波滤去直流成分后可以直接做离散傅里叶变换:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \exp(-j \frac{2\pi}{N} nk), \quad (15)$$

其中 $x(n)$ 为滤波后的光强信号。通过找出 $|X(k)|$ 的最大值所对应的数字下标 k_l , 由数字频率 $\omega_l = 2\pi k_l/N$ 和角频率 $\Omega_l = 4\pi l/c$ 的关系 $\omega_l = \Omega_l \delta\nu$ 可以得到光纤法布里-珀罗传感器腔长

$$l = \frac{ck_l}{2N\delta\nu}. \quad k_l = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (16)$$

从(14)式可以看出,当采样点 N 一定时,光纤法布里-珀罗传感器的分辨率取决于 k_l 的分辨率。而 k_l 只能取离散的整数值,因此必须对 k_l 进行插值才能得到频谱幅值最大值所对应的数字下标。

设离散下标 $k_l - 1, k_l$ 和 $k_l + 1$ 所对应的频谱幅值分别为 $|X(k_l - 1)|, |X(k_l)|, |X(k_l + 1)|$, 由高斯插值公式可以得到

$$k_p = k_l + \frac{\ln \frac{|X(k_l - 1)|}{|X(k_l)|} - \ln \frac{|X(k_l + 1)|}{|X(k_l)|}}{2 \left[\ln \frac{|X(k_l - 1)|}{|X(k_l)|} + \ln \frac{|X(k_l + 1)|}{|X(k_l)|} \right]}, \quad (17)$$

腔长计算公式(14)可以写为(16)式:

$$l = ck_p/(2N\delta\nu) = k_p \lambda_p^2/(2N\delta\lambda), \quad (18)$$

和(16)式相比,(18)式用三点高斯插值 k_p 取代 k_l , 从而提高了传感器腔长的解调精度。从(18)式可以看出,光纤法布里-珀罗传感器的腔长与经过细化后的数字傅里叶变换下标 k_p 成正比。

4 实 验

为验证以上理论分析的正确性,设计了如图4所示的实验装置。其中,宽带光源采用中心波长 $\lambda_0 = 835$ nm, 半峰全宽 $B_\lambda = 35$ nm 的超辐射发光二极管(SLD); 而光谱接收器采用美国海洋公司定制的USB2000型光谱仪,波长分辨力 $\delta\lambda = 0.152947$ nm, 采样点为2048点; 微动台采用Melles Griot公司的

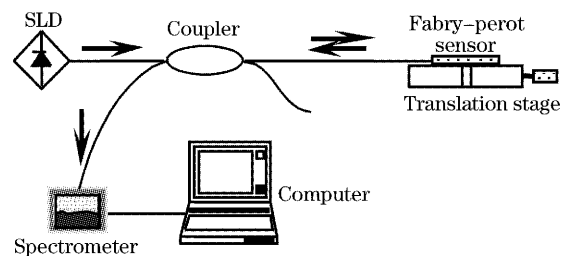


图 4 实验装置

Fig. 4 Experimental setup

17MAX600 型光纤对准仪。由(18)式可以得到传感器腔长与数字下标的关系为

$$l = 1.113k_p. \quad (19)$$

将一腔长较小的光纤法布里-珀罗传感器两端夹持在对准仪的固定台上。当腔长分别以 $4 \mu\text{m}$ 的步长增加时,所得到的数字频率变化量与微动台移动量的关系曲线如图 5 所示。

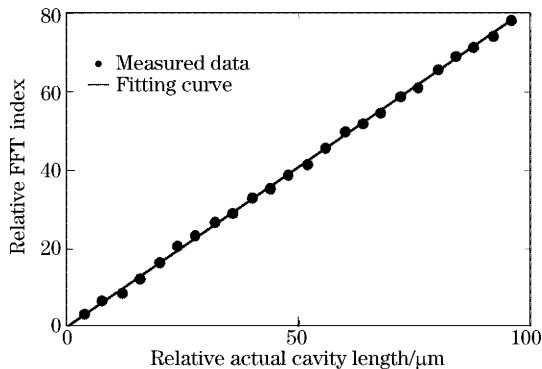


图 5 实验结果

Fig. 5 Experimental result

经过对测得数据分析,测量数据的线性拟合度为 0.9991,拟合方程为 $\Delta l = 1.2323\Delta k - 0.0777$ 。和(19)式相比,线性关系存在着一定的误差,这些误差主要来自原理上的近似处理以及测试系统。由于良好的线性关系,通过校正关系式校正后仍然可以应用于实际工程中。

5 结 论

在理论分析的基础上,通过计算机仿真和实验

证明:在高斯光源条件下,利用傅里叶变换解调光纤法布里-珀罗传感器的原理仍然成立。同时,由于光谱的高斯特点,可以对光波长均匀采样的光强输出信号低通滤波后直接做傅里叶变换,然后根据频域中峰值频率与腔长的关系就可以完成腔长的测量,由于省去了烦琐的插值过程,系统解调速度快,解调精度也较高,实验结果表明,本文提出的解调方法可以应用于实际工程中。

参 考 文 献

- 1 G. F. Fernando, T. Liu. A frequency division multiplexed low-finesse fiber optic Fabry-Perot sensor system for strain and displacement measurements[J]. *Rev. Sci. Instru.*, 2000, **71**(3): 1275~1278
- 2 Pang Shengli, Gao Zhanfeng, Zhang Yujun. Real-time processing the data acquired by optical fiber sensor for measuring strain[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2000, **7**(37): 22~24 (in Chinese)
庞胜利,高占凤,张育军. 应变光纤传感器测量数据的实时处理[J]. *电测与仪表*, 2000, **7**(37): 22~24
- 3 Sun Jiyong, Chen Weimin, Zhuyong *et al.*. Influence of optical source spectrum on optical fiber F-P strain sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(5): 596~600 (in Chinese)
孙吉勇,陈伟民,朱永等. 光源光谱对光纤法布里-珀罗应变传感器的影响[J]. *光学学报*, 2002, **22**(5): 596~600
- 4 Chen Weimin, Wang Ning, Zhu Yong *et al.*. Experimental study on the affection of Gaussian spectrum of light source on the optical fiber F-P strain sensor[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(1): 88~92 (in Chinese)
陈伟民,王宁,朱永等. 实际光源光谱分布对相位型光纤法-珀应变传感器的影响及其实验研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(1): 88~92
- 5 Bi Weihong. Mathematical model for fiber-optical non-symmetrical Fabry-Perot interferometric cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(7): 873~878 (in Chinese)
毕卫红. 本征不对称光纤法布里-珀罗干涉仪的理论模型[J]. *光学学报*, 2000, **20**(7): 873~878