

光纤法布里-珀罗传感器腔长的傅里叶变换解调原理研究*

章鹏 朱永 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 在宽带光源条件下对光纤法布里-珀罗传感器腔长的傅里叶变换解调原理进行了详细的理论推导,在此基础上给出了具体的实现算法和仿真对比实验. 仿真结果表明:采用傅里叶变换可以有效地对光纤法布里-珀罗传感器进行腔长解调.

关键词 法布里-珀罗传感器;傅里叶变换;腔长;解调

中图分类号 TP212 **文献标识码** A

0 引言

光纤法布里-珀罗传感器(以下简称光纤法-珀传感器)由于具有体积小,灵敏度高,不受电磁场和恶劣环境的影响,适合于远程信号处理以及可以复用等众多优点,在民用基础设施和军事上得到了广泛的应用^[1,2]. 在光纤法-珀传感测量系统中,腔长解调是整个测量系统的重要组成部分,它直接影响着系统的稳定性、测量准确. 对传感器腔长的解调,既可以直接在波长域中进行,如传统的峰-峰法,也可以在变换域中进行. 傅里叶变换是信号分析中一种重要的数学分析方法,而且存在着相应的快速傅里叶算法,因此对光纤法-珀传感器的傅里叶变换解调方法的原理进行研究具有重要的理论和实用意义.

1 光纤法-珀传感器腔长的傅里叶变换解调原理

光纤法-珀传感器腔长测量系统原理如图1所示.

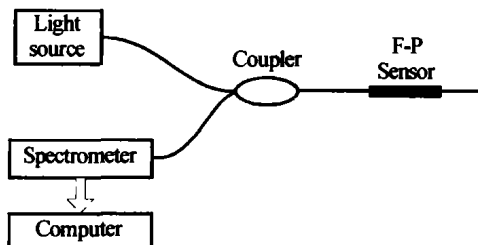


图1 光纤法珀传感器系统
Fig. 1 Fiber optical F-P sensor system

宽带光源通过 3 dB 耦合器入射到该法-珀腔内,在法-珀腔的两端面发生多次反射和透射,形成多光束干涉后经同一耦合器被光谱仪所接收. 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 ,在不考虑损耗的情况下根据多光束干涉原理,反射光的光强分布为^[3,4]

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

当光纤法-珀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, $1 + R^2 - 2R \cos \frac{4\pi l}{\lambda} \approx 1$,式(1)就可以近似为式(2)

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

由于光波长 λ 、光频率 ν 和光速 c 之间存在如下关系

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

将式(3)代入式(2),则有

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

在工程实际应用中,理想宽带光源是不存在的,任何一种实际光源所发出的光中各波长的强度是不同的,其强度随波长的分布呈近似高斯分布,其表达式为

$$I_0(\lambda) = I_0 e^{-\frac{(\lambda - \lambda_p)^2}{B_\lambda^2}} \quad (5)$$

式中, 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宽度. 当峰值波长 $\lambda_p = 825\text{nm}$,光谱半宽度 $B_\lambda = 40\text{nm}$ 时,其波形如图2所示.

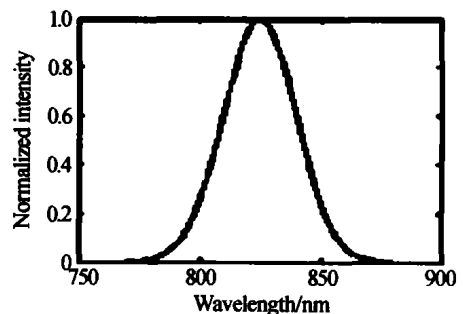


图2 光源光谱分布
Fig. 2 Optical source spectrum

*国家自然科学基金重点项目资助(No. 50135030)
Tel: 023-65112164 Email: zhangpl@cqnc.com
收稿日期: 2003-10-28

将式(5)代入式(2),可以得到实际光源条件下,光纤法-珀传感器双光束干涉输出光强表达式为

$$I_r(\lambda) = 2RI_0 [1 - \cos(\frac{4\pi l}{\lambda})] e^{-\frac{(\lambda - \lambda_p)^2}{B^2}} \quad (6)$$

如果采用图2所示的光源,当 $R = 0.04, l = 30 \mu\text{m}$ 时,其强度随波长变化的关系曲线如图3所示.

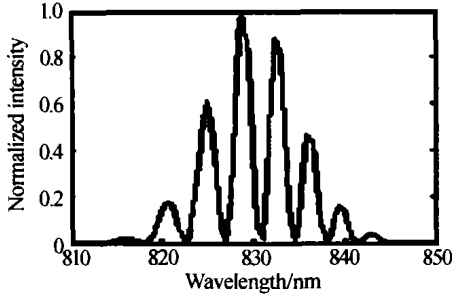


图3 实际光源条件下 F-P 传感器输出光强信号
Fig.3 Output of the F-P strain sensor in real condition

从图3可以看出,在实际光源条件下,传感器的输出不再是近似余弦函数,而是具有高斯包络的振荡信号.

将 $v = c/\lambda$ 代入式(5),则式(5)变为

$$I_0(v) = I_0 e^{-\frac{(v - v_p)^2}{2(\sigma_\lambda v_p/c)^2}} \quad (7)$$

式中, $v_p = c/\lambda_p, \sigma_\lambda = \frac{B}{\sqrt{2}}$. 也就是说实际光源强度对光频率 v 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

$$\frac{v - v_p}{v} = \frac{v - v_p}{v_p} - \frac{(v - v_p)^2}{v_p^2} + \dots = \frac{v - v_p}{v_p} (1 - \frac{v - v_p}{v_p} + \dots) \quad (8)$$

取一阶近似,代入式(7),得

$$I_0(v) = I_0 \exp [-\frac{(v - v_p)^2}{2\sigma_v^2}] \quad (9)$$

式中, $\sigma_v = \frac{\sigma_\lambda v_p}{c}$. 显然,高斯光源强度对光频率 v 仍可近似成高斯分布,其傅里叶变换为

$$F[I_0(v)] = \sqrt{2\pi}\sigma_v I_0 \exp(-jv_p \Omega) \cdot \exp(-\sigma_v^2 \Omega^2 / 2) \quad (10)$$

根据傅里叶变换的卷积定理

$$F[f_1(t)f_2(t)] = \frac{1}{2\pi} F_1(j\Omega) * F_2(j\Omega) \quad (11)$$

式(6)的傅里叶变换为

$$F(j\Omega) = 2 \sqrt{2\pi} R I_0 \sigma_v [\exp(-jv_p \Omega) \exp(-\frac{\sigma_v^2 \Omega^2}{2}) + \sqrt{2\pi} R I_0 \sigma_v \{ \exp [-j(\Omega - \frac{4\pi l}{c} v_p)] \exp [-\sigma_v^2 (\Omega - \frac{4\pi l}{c})^2 / 2] \} + \sqrt{2\pi} R I_0 \sigma_v \{ \exp [-j(\Omega + \frac{4\pi l}{c} v_p)] \cdot$$

$$\exp [-\frac{\sigma_v^2 (\Omega + \frac{4\pi l}{c})^2}{2}] \} \quad (12)$$

不考虑负频率时,式(12)的幅频特性曲线如图4所示.

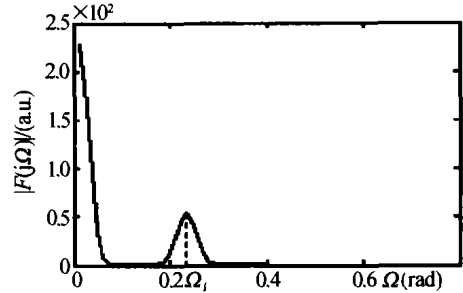


图4 F-P 传感器输出信号幅频特性曲线
Fig.4 Amplitude spectrum curve of fourier transform of F-P sensor output signal

从图4可以看出,在实际光源条件下,光纤法-珀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 $\Omega_1 = \frac{4\pi l}{c}$ 处. 因此,采用实际光源时,只要两高斯频谱不产生混叠,利用傅里叶变换可以完成光纤法-珀传感器的腔长解调. 然而,当腔长较小时,角频率 Ω_1 靠近直流零点,必然会产生频谱混叠. 为了将频率成分 Ω_1 提取出来,必须保证光纤法-珀传感器的腔长 l 大于一最小值 l_{\min} .

2 算法的实现及仿真验证

要从算法上利用傅里叶变换方法实现光纤法-珀传感器腔长的解调,只能采用离散傅里叶变换,同时要求离散光强信号对光频率均匀采样. 然而在实际应用中,无论采用光谱仪还是波长可调滤波器,得到的反射输出信号都是对光波长均匀采样的离散光强信号,能否直接对它们进行快速傅里叶变换呢?

事实上,光频率间隔 δv 和光波长间隔之间存在着下列关系

$$\delta v = \frac{c}{\lambda} - \frac{c}{\lambda + \delta \lambda} = \frac{c \delta \lambda}{\lambda(\lambda + \delta \lambda)} \quad (13)$$

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,可以认为 $\lambda(\lambda + \delta \lambda) \approx \lambda_p^2$, 即

$$\delta v = \frac{c \delta \lambda}{\lambda_p^2} \quad (14)$$

也就是说光强信号对光频率来说仍然可以看成近似均匀采样. 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作离散傅里叶变换,则有

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

式中, $x(n)$ 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_i , 由数字频率 $\omega_i = \frac{2\pi k_i}{N}$ 和角频率 $\Omega_i = \frac{4\pi l}{c}$ 的关系 $\omega_i = \Omega_i \delta v$ 可以得到光纤法珀传感器腔长 l .

$$l = \frac{ck_i}{2N\delta v} = \frac{k_i \lambda_p^2}{2N\delta \lambda} \quad k_i = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (16)$$

从式(16)可以看出, 光纤法-珀传感器的腔长 l 与离散下标 k_i 成线性关系. 为了验证以上结论的正确性, 在计算机上进行了仿真实验. 光源光谱的峰值波长 λ 取 825 nm, 半带宽 B_λ 取 40 nm, 波长分辨率 $\delta\lambda$ 取 0.4 nm, 反射率 R 取 0.04, 腔长从 30 μm 以 0.1 μm 的步长连续增加, 将以上参数代入式(6)中, 在同一腔长条件下计算出 512 点不同波长时的反射输出光强信号(波长范围为 722.6 ~ 927 nm), 然后对光强信号分别进行峰-峰法和傅里叶变换方法解调($l = 1.662k_i \mu\text{m}$), 解调结果如图 5 所示.

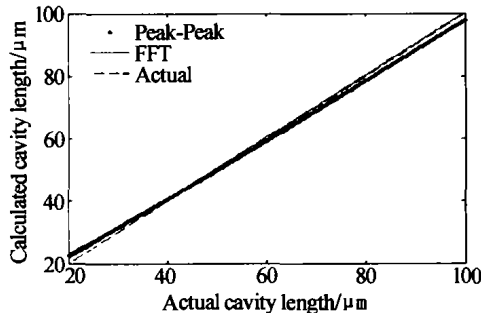


图 5 峰-峰法和傅里叶变换解调仿真结果的比较
Fig. 5 Simulated result comparison of pak-pak and Fourier transformation method

从图 5 可以看出, 和传统的峰-峰解调法相比, 傅里叶变换解调法的解调结果和真实值之间的误差虽然要大一些, 但是真实腔长与计算腔长之间却具有很好的线性关系, 也就是说真实腔长和下标之间存在着线性关系, 这也证实了式(16)中推导的线性关系是成立的.

在实际应用中, 由于噪声信号的影响在进行峰-峰法解调之前必须进行低通滤波, 而滤波系数的选择与腔长的大小有关, 当系统的测量动态范围较大时必须采用自适应滤波. 而采用傅里叶变换解调方法时, 由于噪声信号的频谱幅度要远远小于包含腔长信息成分的频谱幅度, 因此傅里叶变换解调法受信号噪声的影响小; 同时, 傅里叶变换解调方法还可以利用频谱差异对不同腔长的光纤法-珀传感器复

用信号进行解调, 这是峰-峰法无法实现的; 加上峰-峰法解调的准确与光谱仪的分辨率有关, 分辨率越高, 解调准确越高, 成本也越高, 而傅里叶变换解调法只要求采样率满足奈奎斯特频率就不会影响解调准确^[5,6]. 因此, 光纤法-珀传感器的傅里叶变换解调法具有很多优点.

3 结论

本文从理论上对光纤法-珀传感器腔长的傅里叶变换解调原理进行了详细的推导, 提出了相应的实现算法并进行了仿真实验, 仿真结果表明: 虽然在傅里叶变换解调原理的推导过程中采用了一些近似处理, 但是腔长和频谱幅度最大值所对应下标之间仍然存在着很好的线性关系, 因此只要利用高准确的刻度装置对测量系统进行刻度, 傅里叶变换解调方法将具有较高的测量准确.

参考文献

- 江毅, 刘莉. 光纤 Fabry-Perot 腔振动传感器. 光子学报, 2003, 32(9): 1059 ~ 1062
Jiang Y, Liu L. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(9): 1059 ~ 1062
- 阮驰, 高应俊, 刘志麟, 等. 光纤法布里-珀罗 (Fabry-Perot) 腔液位传感器. 光子学报, 2003, 32(10): 1170 ~ 1174
Ruan C, Gao Y G, Liu Z L, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(10): 1170 ~ 1174
- 朱永, 张洁, 陈伟民, 等. 提高光纤 F-P 应变传感器输出信号质量的方法研究. 光子学报, 2004, 33(5): 544 ~ 548
Zhu Y, Zhang J, Chen W M, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(5): 544 ~ 548
- Ayres J W, Rogers C A. Qualitative health monitoring of a steel bridge joint via piezoelectric actuator/sensor patches. *Smart Structure and Materials. SPIE*, 1996, 2719, 123 ~ 131
- 孙吉勇, 陈伟民, 王宁, 等. 光源光谱对光纤法布里-珀罗应变传感系统的影响. 光学学报, 2002, 22(5): 598 ~ 600
Sun J Y, Chen W M, Wang N, et al. *Acta Optical Sinica*, 2002, 22(5): 598 ~ 600
- 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. 中国激光, 2003, 30(1): 80 ~ 92
Chen W M, Wang N, Zhu Y, et al. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, 30(1): 80 ~ 92

A Study on Fourier Transformation Demodulating Theory of the Gap of Optical Fiber Fabry-Perot Sensor

Zhang Peng, Zhu Yong, Chen Weimin

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

Received date: 2003-10-28

Abstract The detailed theoretical derivation on the Fourier transformation demodulating theory of the gap of optical fiber Fabry-Perot sensor with the wide light source is firstly worked out, based on it, the practical realization and simulation are forwarded out. It is verified by the simulation that effective gap demodulation can be implemented by the Fourier transformation.

Keywords Fabry-Perot sensor; Fourier Transformation; Gap; Demodulation

Zhang Peng was born in 1970, in Hubei, China. He is a Ph. D. candidate at Department of Optoelectronic Engineering, Chongqing University. His major research fields include signal processing and analysis.