

文章编号: 1001-3806(2013)01-0020-04

白光干涉法测量光纤布喇格光栅反射谱

李国水¹ 李 青^{1*} 陈哲敏²

(1. 中国计量学院 机械与电子工程学院 杭州 310018; 2. 浙江省计量科学研究院 杭州 310013)

摘要: 为了实现光纤布喇格光栅反射谱的低成本测量,采用白光干涉技术搭建了一套结构简单的反射谱测量装置,利用该装置进行了实验,对所采集的干涉信号进行了数据处理,获得了光纤布喇格光栅的反射谱,光谱分辨率达到 3pm,并对所测反射谱的光谱分辨率进行了理论分析。结果表明,利用该装置测得的反射谱具有良好的光谱分辨率,通过增加测量量程可以进一步提高光谱分辨率。

关键词: 衍射与光栅; 光纤布喇格光栅; 反射谱; 白光干涉; 相位重构

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.01.005

Measurement of FBG reflection spectra by white light interferometry

LI Guo-shui¹ LI Qing¹ CHEN Zhe-min²

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China; 2. Zhejiang Institute of Metrology, Hangzhou 310013, China)

Abstract: In order to measure the reflection spectra of fiber Bragg gratings at low cost, a simple measurement system was established based on white light interferometry. After processing the sampled interferogram, the reflection spectra was obtained with the spectral resolution about 3pm. Theoretical analysis of spectral resolution was conducted. Experiments show that the system has a fine spectral resolution.

Key words: diffraction and gratings; fiber Bragg grating; reflection spectra; white light interference; phase reconstruction

引 言

光纤布喇格光栅(fiber Bragg grating, FBG)是一种全光纤器件,其可靠性好、测量精度高、线性度好、测量范围大,而且抗电磁干扰、易于实现分布式测量,广泛应用于光纤传感领域。为了对 FBG 的特性进行分析,需要获得 FBG 的输出光谱,最常用的方法是用光谱分析仪(optical spectrum analyzer, OSA)直接检测输出光谱,这种方法结构简单、使用方便,但为了得到高精度、高分辨率的光谱,往往需要体积庞大、价格高昂的 OSA。1987 年, TAKADA^[1] 等人首次提出白光干涉技术,由于其成本低、精度高,广泛应用于光纤器件的色散、延时等参量的测量^[2-5]。随后, OBATON, CHAPELLEAU 等人^[6-7]对白光干涉法测量 FBG 反射谱进行了研究,验证了采用白光干涉技术可以测量 FBG 反射谱,但并未对实验结果进行理论分析。并且实验方

案中采用 He-Ne 激光干涉装置进行等距离触发,光路调整困难也不易于光纤集成,大大影响了系统的应用,触发信号和相应模数转换产生的延时也将增大所测光谱的不确定度。本文中采用分布反馈式(distributed feedback, DFB)激光器为核心的定位装置,构建了一套全光纤结构的测量系统,整体结构简单、安装调试方便,同时对实验所得 FBG 反射谱分辨率进行了理论分析。

1 实验原理

白光干涉技术采用宽谱光源,宽谱光经耦合器分成两束:一束为信号光,将通过待测 FBG;另一束为参考光,其光程可通过移动平台装置改变。当两路光光程差小于相干长度时,二者在耦合器处发生干涉,随着光程差的改变可以得到一系列干涉条纹。由部分相干理论^[8]可知,检测到的干涉信号强度 $I(z)$ 为:

$$I(z) \propto \operatorname{Re} \int_{-\infty}^{+\infty} r(\delta) s(\delta) \exp(2i\pi\delta z) d\delta \quad (1)$$

式中 z 是两路光的光程差, Re 代表实部, δ 是波数, $r(\delta)$ 是 FBG 的复反射系数, $s(\delta)$ 是光源的功率谱密度。由傅里叶变换理论可将(1)式转化为:

基金项目: 国家质检总局科技计划资助项目(2011QK156); 国家科技支撑计划资助项目(2012BAK10B05-3)

作者简介: 李国水(1987-),男,硕士研究生,主要从事光纤传感技术的研究。

* 通讯联系人。E-mail: lqing55@yahoo.cn

收稿日期: 2012-05-15; 收到修改稿日期: 2012-06-04

$$I(z) \propto \text{Re}\{\mathcal{F}^{-1}[r(\delta)s(\delta)]\} \quad (2)$$

通常宽谱光源的光谱带宽远大于待测 FBG 的带宽,因此在 FBG 频带内 $s(\delta)$ 可视为常量,则(2)式为:

$$I(z) \propto \text{Re}\{\mathcal{F}^{-1}[r(\delta)]\} \quad (3)$$

即:

$$I(z) \propto \text{Re}\{h_c(z)\} \quad (4)$$

式中 $h_c(z)$ 为待测 FBG 的复脉冲响应。由(4)式可知,待测 FBG 复脉冲响应的实部与干涉信号成比例。根据相位重构^[9-11]理论,对干涉信号 $I(z)$ 做 Hilbert 变换可以得到与待测 FBG 复脉冲响应成比例的复干涉信号 $I'(z)$:

$$I'(z) \propto h_c(z) \quad (5)$$

最后通过对复干涉信号 $I'(z)$ 做傅里叶变换,可以得到与待测 FBG 复反射谱 $r_c(\delta)$ 成比例的 $I'(\delta)$:

$$r_c(\delta) \propto I'(\delta) \quad (6)$$

式中 $I'(\delta)$ 的模与 FBG 反射谱成比例。

2 实验装置与实验结果

图 1 为白光干涉系统的实验装置图。由单模 2×2 光纤迈克尔逊干涉仪和超辐射发光二极管 (superluminescent diode, SLD) 作为近似的白光光源组成白光干涉仪。SLD 光源型号为 Thorlabs SLD1325。SLD 光源中心波长为 1325nm,谱宽为 110nm,在 110nm 谱宽内可视为白光光谱。SLD 发出的光经过光纤耦合器分为两路,一路作为参考光经过光纤准直镜校准后平行入射到平面镜后被反射,参考光的光程由计算机控制的可动平移台调节,平移台采用 Thorlabs 公司生产的 NRT150 电动线性平台,其中的偏振控制器用于更好地匹配两干涉臂的偏振态,从而提高干涉条纹的对比度;另一路光直接入射到被测 FBG 后被反射,两路反射光在耦合器处相遇并发生干涉,干涉信号经光隔离器入射到光电探测器中转换为电信号,由数据采集卡采集到计算机,利用 LABVIEW 软件完成干涉信号的检测。由(5)式和(6)式可知,对干涉信号做 Hilbert 变换后可求得复脉冲响应,对复脉冲响应做傅里叶变换后再求模,可得 FBG 反射谱的谱形。

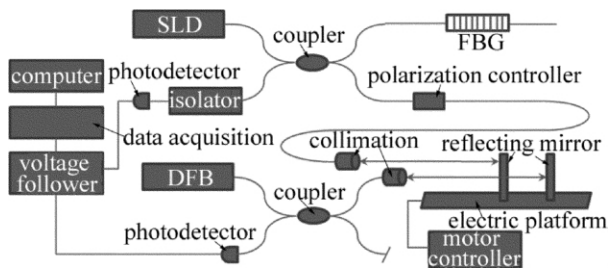


Fig. 1 Setup of white light interference system

在光谱计算中,为了得到 FBG 的复反射系数,脉冲响应必须是等时间间隔采样的,然而实际上平移台的运动不可能是匀速的,需要在采集白光干涉信号时同步采集 DFB 激光干涉信号用于白光干涉信号位置的校准。DFB 激光器发出的激光经光纤端面的 FC/PC 和反射镜的反射在耦合器处形成干涉信号,通过调整光路使得白光干涉信号直流量和 DFB 激光干涉信号的强度在平移台量程内保持稳定,周期性变化的 DFB 激光干涉信号可以对白光干涉信号的位置进行校准。

图 2 是白光干涉仪处测得的干涉信号,如图 2 所示,从白光干涉仪处得到的信号包含光源背景功率等直流量,需要对测得的数据滤除直流分量。

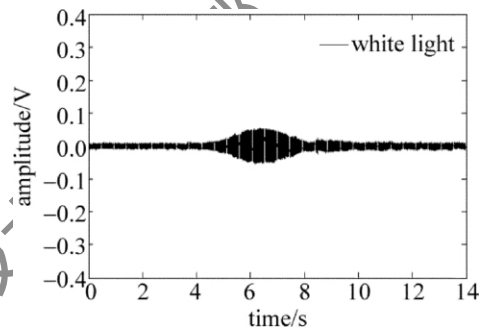


Fig. 2 Signal of white light interference

图 3 为同步采集到的 DFB 激光干涉图样的一小部分。由于在实验中所用 SLD 光源中心波长在 1300nm 左右,小于 DFB 激光波长(1550nm 左右)的 2 倍,不满足奈奎斯特采样定律,因此,无法采用常规过零检测的方式测量位移的变化。采用相移解调的方式对平移台的位移进行等间隔处理,然后通过插值的方式得到时域等间隔的白光干涉信号。

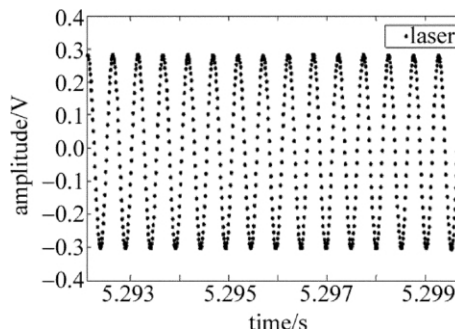


Fig. 3 Interferogram of DFB laser

分析的对象是 4 个不同的高斯切趾 FBG,用白光干涉系统和 OSA 分别对其测量。由(6)式可知,实验得到的反射谱中各波长对应的反射率大小与实际值成比例,为了与 OSA 测得的结果进行比较,需要对白光干涉系统测得的反射谱归一化,并利用 OSA 测得的 FBG 最大反射率对其等比例缩放。结果如图 4 所示。

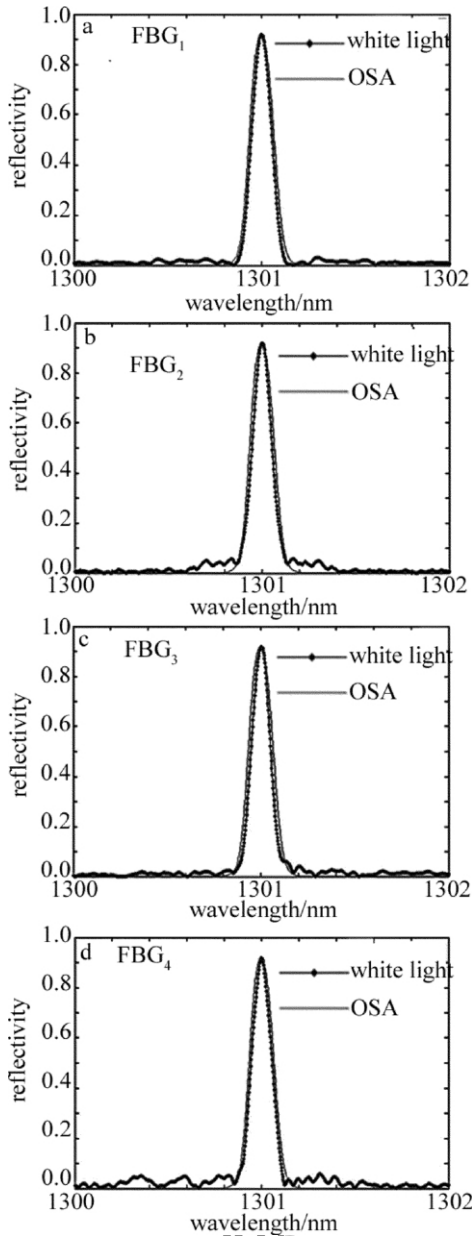


Fig. 4 Reflection spectra of four FBGs

从图 4 可以看到,采用白光干涉技术得到的 FBG 的反射谱在通频带内与 OSA 的结果非常接近,其半峰全宽比 OSA 测得的值略小,原因是干涉信号中不可避免地会掺杂着许多噪声信号,如光源波动、探测器以及数据采集卡中调理电路的噪声等,另外采集卡 A/D 转换产生量化误差,计算机受字长限制会引起截断误差,平移台的抖动引起的采样偏差等^[12],这些误差和噪声将导致测量结果与实际值的偏差。

下面对测量得到的光谱分辨率进行分析:假设步进电机以速率 v 匀速行进,数据采集卡的采样速率 M ,步进电机通过计算机采样得到的最小采样位移间隔为 $\Delta L = \frac{v}{M}$,由于光的来回反射作用,实际光程被放大至 2 倍,步进电机位移间隔为 $2\Delta L$;根据频率和时间的对应

关系,被测干涉信号的频率最大值为 $f = \frac{1}{\Delta t} = \frac{c}{2\Delta L} = \frac{cM}{2v}$ 其中 c 为光在真空中的速度。根据傅里叶变换和采样原理,实际有效的采样频率为 $\frac{f}{2}$,而对应的采样点个数为 $\frac{Mt}{2}$, $t = \frac{L}{v}$ 是总的运动时间,而 L 为总行程。因此,可获的最小频率间隔为 $\Delta f = \frac{f}{Mt} = \frac{c}{L}$,光波长和频率的转换关系为 $f = \frac{c}{\lambda}$,同样地,频率间隔为 $\Delta f = \frac{c}{\lambda_0} - \frac{c}{\lambda_1} = c \frac{(\lambda_1 - \lambda_0)}{\lambda_0 \lambda_1}$,当 λ_0 与 λ_1 极为接近时 ($\lambda_1 \approx \lambda_0$),此时有 $\Delta f = \frac{c\Delta\lambda}{\lambda_0^2}$, $\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_0$,综上可以得到测量的波长间隔为 $\Delta\lambda = \frac{\lambda_0^2}{2L}$ 。

实验中白光干涉系统的参考臂总行程为 15cm,因此当光纤光栅中心波长为 1300nm,其波长分辨能力大约为 5.6pm。根据白光干涉测量的实际结果,发现在光纤光栅脉冲响应的后期干涉信号幅值变化的接近于 0,通过对测量结果补零延长可以使波长分辨能力得到加强,当补零延长至 2.5 倍时,得到的波长分辨率小于 3pm,如图 5a 和图 5b 所示。为了提高波长分辨率,可以在时域补零延长,但是在实际测量过程中,这种延长仅仅只是插值,并不能带来新的信息。因此,为了得到更加精细和准确可靠的波长分辨率,需要增加有效行程。

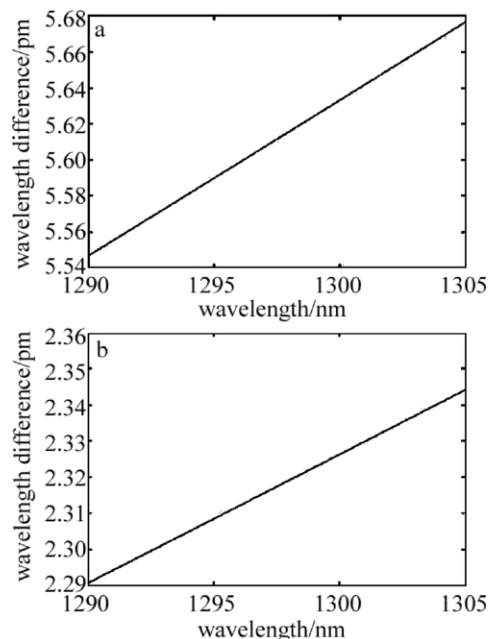


Fig. 5 a—spectral resolution before interpolation b—spectral resolution after interpolation

3 结 论

介绍了一种基于白光干涉技术的 FBG 光谱测量系统,利用该系统可以得到 FBG 的反射谱,通过对系统进行改进使其反射谱的精度得到提高,则可以代替 OSA 实现光谱形测量的功能。分析了 FBG 传感系统的传感性能如反射谱的变化和 Bragg 波长的漂移等,同时分析了系统的光谱分辨能力,通过增加有效测量量程,该系统可以得到较高的光谱分辨率,具有很好的应用价值。

参 考 文 献

- [1] TAKADA K, YOKOHAMA I, CHIDA K, *et al.* New measurement system for fault location in optical waveguide devices based on an interferometric technique [J]. *Applied Optics*, 1987, 26(9): 1603-1606.
- [2] YAN Ch Zh, LI Sh Y, ZHENG X P, *et al.* Time delay error in optical low coherence interferometry [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(1): 204-208(in Chinese).
- [3] YAN Ch Zh, LI Sh Y, ZHENG X P, *et al.* Time delay measurement of photonic crystal fiber by phase sensitive optical low coherence reflectometry [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2010, 21(12): 1813-1816(in Chinese).
- [4] JIANG F, CHENG Q Sh, LU N G, *et al.* Low coherence interferometric measurements of fiber Bragg gratings dispersion [J]. *Journal of Beijing Institute of Machinery*, 2006, 21(4): 26-28(in Chinese).
- [5] CHENG Q Sh, LU N G, JIANG F, *et al.* Analysis on error of low coherence interferometric measurement of dispersion of CFBGs [J]. *Tool Engineering*, 2009, 43(4): 94-98(in Chinese).
- [6] OBATON A F, PALAVICINI C, JAOUENJAOUEN Y, *et al.* Characterization of fiber Bragg gratings by phase-sensitive optical low-coherence reflectometry [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2006, 55(5): 1696-1703.
- [7] CHAPELEAU X, LEDUC D, LUPI C, *et al.* Experimental synthesis of fiber Bragg gratings using optical low coherence reflectometry [J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 82(24): 4227-4229.
- [8] LU N G. *FOURIER optics* [M]. Beijing: Mechanic Industry Press, 1988: 183-191(in Chinese).
- [9] PETERMANN E I, SKAAR J, SAHLGREN B E *et al.* Characterization of fiber Bragg gratings by use of optical coherence-domain reflectometry [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1999, 17(11): 2371.
- [10] CARBALLAR A, MURIEL M A. Phase reconstruction from reflectivity in fiber Bragg gratings [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(8): 1314-1322.
- [11] CHEN C, ZHOU J, GONG Sh G. Phase reconstruction of fiber gratings based on kolmogoroff method [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2004, 15(2): 160-164(in Chinese).
- [12] CHEN Q Sh. Research on fiber low-coherence interferometry an its application [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2009: 71-78(in Chinese).