

doi:10.3788/gzxb20174602.0214001

基于激光拍频实现啁啾光纤光栅色散的测量

王旭, 李小康, 张豪杰, 温泉, 陈龙飞, 王芳, 刘玉芳

(河南师范大学 电子与电气工程学院, 河南 新乡 453007)

摘 要:以啁啾光纤光栅为例,研究了激光拍频的产生机制,并建立对啁啾光纤光栅色散的测量模型.详细阐述了系统结构和测量原理,并对测量结果和理论值进行了分析与比较,结果一致性较好.在频谱分析仪分辨率为 2.5kHz 的情况下,色散测量准确度可以达到 0.1ps,啁啾光纤光栅色散的实际测量也证实了该系统的可行性,系统相对简单,测量准确度高,可为色散测量提供参考.

关键词:光纤激光;色散;拍频;啁啾光纤光栅

中图分类号:O436.3

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)02-0214001-5

Dispersion Measurement of Chirped Fiber Bragg Grating Based on Laser Beat Frequency

WANG Xu, LI Xiao-kang, ZHANG Hao-jie, WEN Quan, CHEN Long-fei, WANG Fang, LIU Yu-fang
(College of Electronic and Electrical Engineering, Henan Normal University, Xinxiang, Henan 453007, China)

Abstract: The generation mechanism of the laser beat frequency was studied by using chirped fiber Bragg grating as an example, and a model was established to realize the dispersion measurement of chirped fiber Bragg grating. The system structure and measuring principle are detailed demonstrated. The measurement results and the theoretical values are analyzed and compared, as a result, they are in good consistency. The accuracy of the dispersion measurement reaches to 0.1 ps at the spectrum analyzer resolution of 2.5 kHz. The dispersion measurement of chirped fiber Bragg grating confirms the feasibility of the system, at the same time, the system is relatively simple and highly accuracy. So it is expected to provide reference for the dispersion measurement.

Key words: Fiber laser; Dispersion; Beat frequency; Chirped fiber Bragg grating

OCIS Codes: 140.3500; 060.2300; 060.2410

0 引言

光纤光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)一直是光纤通信系统中最具实用价值的无源光器件之一.色散是光纤光栅的一个重要参量,是产生误码,影响通信质量的重要原因. FBG 被广泛应用在光纤传感中,在温度、应力、液位等测量领域具有不可替代的作用,而啁啾光纤光栅(Chirped Fiber Bragg Grating, CFBG)作为无源偏振不敏感器件,与现有光纤系统兼容性好,具有体积小、损耗低、不受非线性影响等优点,可用于补偿.因此,CFBG 色散的测量显得异常重要,也是光纤通信迈向大容量、长距离传输的重要一步.目前,FBG 色散测量的方法主要有时延法^[1-4]、干涉法^[5-8]、相移法^[9-12]. 1977 年, Cohen L. G 等利用脉冲时延法测得了光纤的色散; 2011 年, Neumann N, Herschel R 等利用脉冲通过光纤延时线滤波器估测了边缘带宽时延. 时延法测量对仪器设备准确度和稳定性要求较高,主要受限于激光光源的稳定性^[1-2]和光脉冲宽度^[3-4],其准确度也有待进一步提高.干涉法测量分为马赫-曾德干涉法^[5-7]和萨尼亚克干涉法^[8]. 2011 年, Zong Liang-jia 等搭建了非

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 61307122, 61475043)和河南省基础和先进技术研究项目(No. 142102210450)资助

第一作者:王旭(1965-),男,副教授,博士,主要研究方向为光纤通信技术、电磁场与微波技术及其应用. Email: wangxuwl@htu.edu.cn

收稿日期:2016-11-11; **录用日期:**2016-12-12

<http://www.photon.ac.cn>

对称萨尼亚克结构实现了色散测量^[5];2014年,Marie-Claude N. Dicaire等通过马赫-曾德干涉测量了光纤光栅的群时延^[13].干涉法虽然大大提高了测量准确度,但其要求光偏振态一致或者偏振稳定,系统稳定性易受偏振的影响.相对来说,相移法测量比较普遍,它的稳定性较好,测量准确度也比时延法高.2010年,Wang Bin-hao, Yan Guo-feng等提出了光频域反射方法,纤维长度和色散信息可以通过分析两干涉光束频域中的相位差得到^[12];2014年,邹新海,张尚剑等提出了一种利用电光相位调制的光纤色散扫频测量方法,从衰落曲线的特征性凹陷频率确定出光纤色散^[14].现在市场上色散测量仪器基本都是采用相移法,如FDA-2200采用数字相位探测技术,可以分辨100 fs的群时延;CD500测试系统采用了微分相移法,测量速度较快.但相移法测量需要一个非常稳定的可调谐激光器^[9-11](Tunable Laser Diode, TLD),有的甚至还需要结合矢量网络分析仪^[12](Vector Network Analyzer, VNA)实现扫频.因此近年来,很多学者在试图探寻不借助可调谐激光器实现光纤色散测量的方法,该方面研究也越来越受到人们的重视.

激光拍频作为一种测量方法被广泛应用在温度、应力、超声波等光纤传感中,2011年,Tuan Guo, Allan C. L. Wong等将超声波作用在两个光纤光栅组成的分布式布拉格反射激光器(Distributed Bragg Reflector, DBR)上,实现了对超声波检测^[15];2013年,Liang Gao, Long Huang等研究了应力作用在增益光纤上拍频频率间隔的变化,测量了外界应力^[16];2015年,O. Méndez-Zepeda, S. Munoz-Aguirre等利用两对中心波长不一的光纤光栅实现了DBR拍频,实现了温度测量^[17].但是目前,激光拍频方法很少应用于色散测量领域.本文从实际应用出发,以激光拍频为立足点,综合考虑了测量稳定性和准确度,建立了激光拍频测量模型,该方法快速准确,无需借助可调谐激光器和网络分析仪,而是通过激光拍频频率变化来实现光纤光栅的时延测量,无需考虑偏振的影响,在一般实验室即可完成对色散的测量,测量系统简单、稳定性好,测量准确度高,具有很好的参考价值.

1 系统结构与原理

系统结构原理如图1.

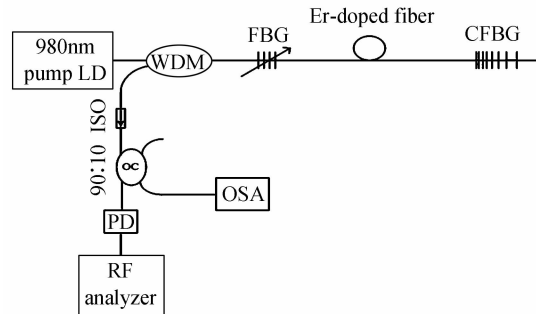


图1 基于激光拍频实现啁啾光栅色散测量结构原理图

Fig. 1 The structure of dispersion measurement of CFBG based on laser beat frequency

当泵浦光源达到阈值(电流90 mA)时,在可调谐光纤光栅和CFBG组成F-P腔中产生多纵模激光,纵模间拍频.实验中,为了尽量减少谐振腔中的多纵模,使拍频更稳定,采用了窄带宽的FBG,并在谐振腔中加入一段未泵浦的掺铒光纤作为饱和吸收体,从频谱分析仪可以获得直观的稳定的激光拍频信号.

激光谐振腔的谐振频率为

$$V_q = \frac{q \cdot c}{2 \cdot n \cdot L} \quad (1)$$

式中, q 为纵模的阶次, c 为光在真空中的传播速度, n 为介质的折射率, L 为激光谐振腔腔长.由式(1)可得相邻纵模的频率间隔为

$$\Delta V = V_{q+1} - V_q = \frac{c}{2 \cdot n \cdot L} \quad (2)$$

已知拍频频率,利用公式

$$t = \frac{1}{\Delta V} \quad (3)$$

可求时间,进而可得 CFBG 的时延.由于频谱分析仪的分辨率为 2.5 kHz,对式(2)进行微分得

$$\delta(\Delta V) = -\Delta V \cdot \frac{\Delta L}{L} \quad (4)$$

由频谱仪的分辨率 2.5 kHz 以及式(5)可知,谐振腔长变化量为

$$\begin{cases} \Delta L = \frac{2 \cdot n \cdot L^2 \cdot d(\Delta V)}{c} = 6 \times 10^{-5} \text{ m} \\ \Delta L = c \cdot \Delta t \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可得,导致谐振腔变化 ΔL 的时间为

$$\Delta t \approx 5 \times 10^{-13} \text{ s} = 0.5 \text{ ps}$$

所以理论上,该装置测量准确度量级在 0.1 ps 量级上.

如果频谱分析仪分辨率更高或者谐振腔长度更短,测得准确度也会相应提高.改变 FBG 的中心波长,测得一系列的拍频数据,然后对拍频数据进行处理和归一化可以达到色散测量的目的.

2 实验结果与分析

FBG 和 CFBG 组成一个光纤谐振腔,中心波长分别是 1 550.146 nm 和 1 550.147 nm,其中 FBG 反射率为 60%,3dB 带宽小于 0.08 nm,CFBG 色散为 1 700 ps/nm,3 dB 带宽为 0.5 nm.光纤谐振腔中设有非线性增益的掺饵光纤,长度 1m,整个光纤谐振腔长度约为 2.4 m.FBG 是由北京拓扑光研公司制作,CFBG 由武汉光迅公司提供.FBG 的透射谱如图 2 所示,CFBG 的反射谱和时延谱分别如图 3、图 4 所示.图 3、图 4 是由厂家给出,测试系统包括色散测试仪器 Agilent 86038B 与可调谐激光器 81642A.光谱分析仪是横河 YokogawaAQ6370C,分辨率是 0.01 nm,频谱分析仪是安泰信 AT6030DM,分辨率是 2.5 kHz.

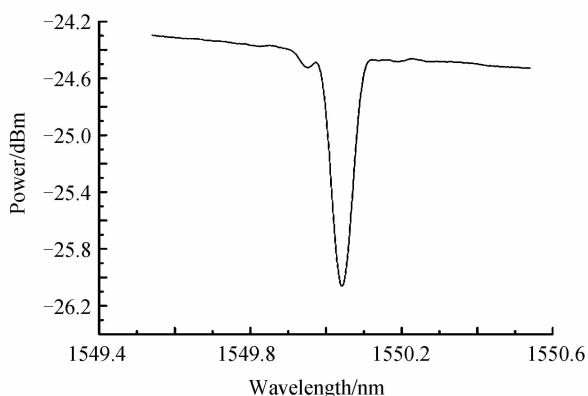


图 2 FBG 透射谱

Fig. 2 The transmission spectrum of FBG

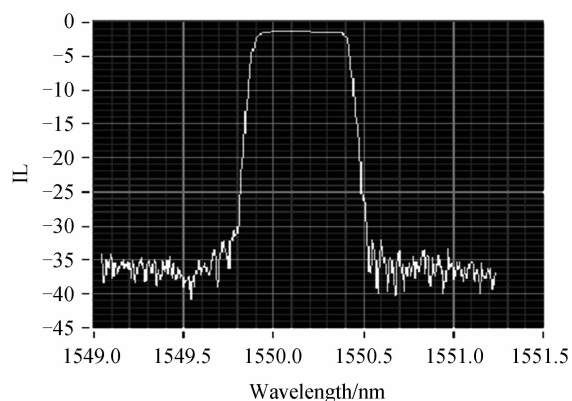


图 3 CFBG 反射谱

Fig. 3 The transmission spectrum of CFBG

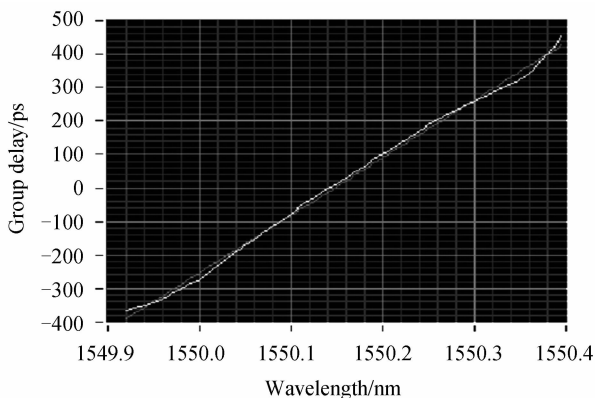


图 4 CFBG 的时延谱

Fig. 4 The group delay of CFBG

在无拉力的情况下,可知拍频的原始频率,然后通过不断改变 FBG 中心波长,每次移动 0.01 nm,待拍

频稳定,记录此时的拍频频率.图5为拍频频率变化过程.通过 OriginPro8.0 对实验数据进行拟合分别得到拍频频率和时延随波长的变化曲线,如图6、图7.

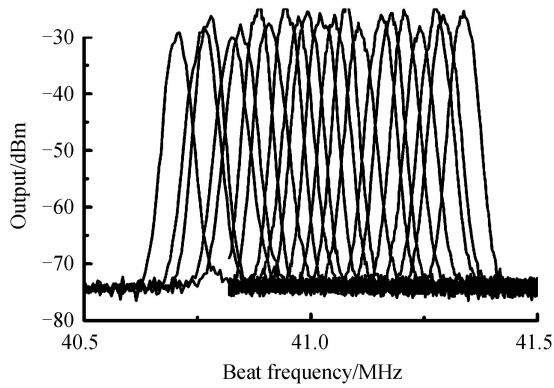


图5 拍频频率变化过程

Fig. 5 The change process of beat frequency

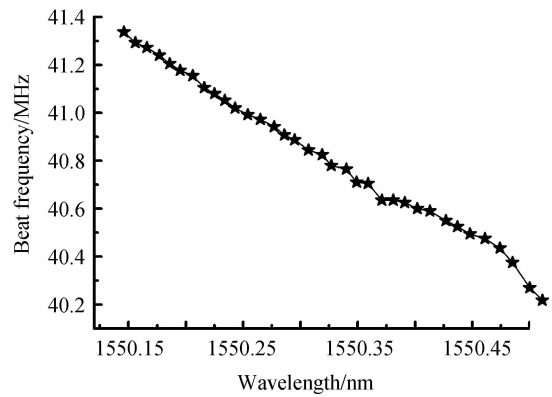


图6 拍频频率与波长的变化曲线

Fig. 6 The change curve of beat frequency and the wavelength

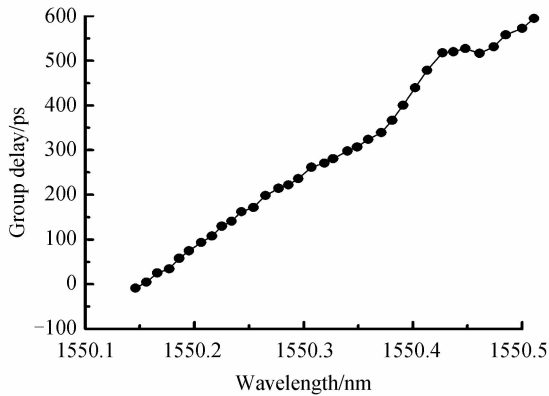


图7 时延与波长的变化曲线

Fig. 7 The change curve of group delay and the wavelength

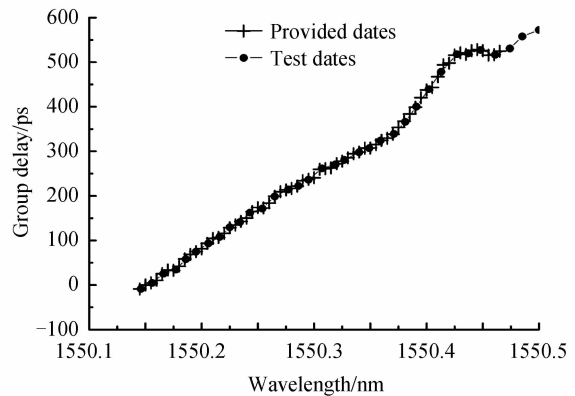


图8 所测时延与厂家数据对比曲线

Fig. 8 The contrast curve of measurement delay and manufacturer data

将所测时延和厂家提供的时延数据进行对比得到的结果如图8所示,可以看到,所测色散曲线与厂家提供的基本一致,色散率比公司提供的略小,可能的原因是读取拍频中心频率的误差.啁啾光纤光栅的实际测量也证实了该系统的可行性.由于色散补偿光纤的时延线性较好,接下来准备对色散补偿光纤进行测量,观察线性度是否符合,进一步对系统进行验证.

3 结论

本文从实用性角度出发,综合考虑色散测量的稳定性和准确度等因素,提出了基于激光拍频原理测量光纤色散的方法.把测量数据拟合的结果和理论结果进行了比较,对比结果表明,拟合线性度比实际理论值稍小,但相差甚微,完全可以作为真实值反应色散情况,也验证了该系统的可行性和合理性.系统测量准确度高,目前可以达到 0.1 ps.如果频谱分析仪分辨率更高或者谐振腔更短,都能使测量准确度进一步提高.同时,对系统稍加改进,可以实现对色散补偿光纤、色散器件以及光传输器件的色散测量,为色散测量提供了一种新的方法.

参考文献

- [1] COHEN L G, LIN C. Pulse delay measurements in the zero material dispersion wavelength region for optical fibers [J]. *Applied Optics*, 1977, **16**(12): 2136-2139.
- [2] NEUMANN N, HERSCHEL R, SCHUSTER T, *et al.* Dispersion estimation via vestigial sideband filtering using an optical delay line filter [J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2011, **3**(2): 155-161.
- [3] MOK J T, IBSEN M, DE STERKE C M, *et al.* Dispersionless slow light with 5-pulse-width delay in fibre Bragg grating [J]. *Electronics Letters*, 2007, **43**(25): 1418-1419.
- [4] SHAHOEI H, LI M, YAO J. Continuously tunable time delay using an optically pumped linear chirped fiber Bragg

- grating[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, **29**(15): 1465-1472.
- [5] ZONG Liang-jia, LUO Feng-guang, CUI Suo-chao, *et al.* Rpid and accurate chromatic dispersion measurement of fiber using asymmetric Sagnac interferometer [J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(5): 660-662.
- [6] WEN Xiao-dong, NING Ti-gang, YOU Hai-dong, *et al.* Uptapered fiber Mach-Zehnder interferometer fabricated by using a fusion splicer [J]. *Optoelectronics Letters*, 2013, **9**(5): 325-328.
- [7] GOMEZIGLESIAS A, O'BRIEN D, O'FAOLAIN L, *et al.* Direct measurement of the group index of photonic crystal waveguides via Fourier transform spectral interferometry[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **90**(26): 261107.
- [8] DORRER C, BELABAS N, LIKFORMAN J P, *et al.* Spectral resolution and sampling issues in Fourier-transform spectral interferometry[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2000, **17**(10): 1795-1802.
- [9] DAIKOKU K, SUGIMURA A. Direct measurement of wavelength dispersion in optical fibers-difference method [J]. *Electronics Letters*, 1978, **14**(5): 149-151.
- [10] FU B, HUI R. Fiber chromatic dispersion and polarization-mode dispersion monitoring using coherent detection[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, **17**(7): 1561-1563.
- [11] XIE Jing-ya, ZHOU Lin-jie, ZOU Zhi, *et al.* Continuously tunable reflective-type optical delay lines using microring resonators [J]. *Optics Express*, 2014, **22**(1): 817-823.
- [12] WANG Bin-hao, YAN Guo-feng, YAN Chun-sheng. Fiber length and chromatic dispersion measurement technology using a novel optical frequency domain reflectometry[C]. OSA-IEEE-COS, 2010.
- [13] DICAIRE M C N, UPHAM J, LEON I D, *et al.* Group delay measurement of fiber Bragg grating resonances in transmission: Fourier transform interferometry versus Hilbert transform [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2014, **31**(31): 1006-1010.
- [14] ZOU Xin-hai, ZHANG Shang-jian, WANG Heng, *et al.* Accurate measurement of chromatic dispersion of optical fibers based on phase-intensity modulation conversion[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2014, **25**(5): 932-936.
邹新海, 张尚剑, 王恒, 等. 基于相位-强度调制转换的光纤色散精确测量方法[J]. *光电子 • 激光*, 2014, **25**(5): 932-936.
- [15] GUO Tuan, LIU Wei-sheng, Guan Bai-ou, *et al.* Beat-frequency adjustable Er^{3+} -doped DBR fiber laser for ultrasound detection[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(3): 2485-2492.
- [16] GAO Liang, HUANG Long, CHEN Lin, *et al.* Study on fiber ring laser in sensing application with beat frequency demodulation[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, **45**(1): 137-141.
- [17] MENDEZ-ZEPEDA O, MUNOZ-AGUIRRE S, BELTRAN-PEREZ G, *et al.* Alternative interrogation method for a dual laser sensor based on fiber Bragg gratings to measure temperature using the fundamental beating frequency intensity [J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, **67**: 159-163.