

doi:10.3788/gzxb20184708.0806002

基于多纵模拍频测量光纤色散

王旭,张玲娟,陈龙飞,李小康,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:利用激光多纵模拍频频率与谐振腔色散系数的关系实现光纤的色散测量.测量系统采用可调光纤 Fabry-Perot 滤波器与光环行器构成窄带波长可调反射镜,作为光纤激光器的后腔镜,以光纤 Sagnac 干涉器作为前腔镜.将待测光纤置于谐振腔内,用频谱分析仪测量激光器拍频频率随激光输出波长的变化,得到待测光纤的色散系数.用该系统分别测量了色散补偿光纤和标准单模光纤的色散系数,实验结果表明该方法能够满足通信光纤的色散测量要求.该系统测量速度快、成本低、结构简单,具有良好的应用前景.

关键词:色散测量;光纤激光器;多纵模拍频;光纤可调谐 Fabry-Perot 滤波器;Sagnac 干涉器

中图分类号:TN247

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)08-0806002-5

Fiber Dispersion Measurement Based on Multi-longitudinal Mode Beat Frequency

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

Abstract: The dispersion measurement of optical fiber is realized by utilizing the relationship between the multi-longitudinal mode beat frequency of the laser and dispersion coefficient of resonant cavity. A narrow band and wavelength tunable reflector is used as the rear-cavity mirror of the fiber laser in the proposed system, which is based on the combination of the fiber Fabry-Perot tunable filter and the optical fiber circulator. The Sagnac interferometer is used as the front-cavity mirror. The tested optical fiber is inserted in the resonator. The beat frequency of the fiber laser is measured by the spectrum analyzer, which is changed with the output wavelength of laser, and then the dispersion coefficient of the sample is obtained. The dispersion coefficient of dispersion compensation fiber and standard single mode fiber are measured respectively. The experimental results indicate that the measurement accuracy of the proposed system can meet the requirements of the communication optical fiber measurement. The proposed method has the advantages of high measurement speed, low cost, simple structure and good application prospect.

Key words: Dispersion measurement; Fiber laser; Multi-longitudinal mode beat; Fiber tunable Fabry-Perot filter; Sagnac interferometer

OCIS Codes: 060.2300; 140.3510; 060.2430

0 引言

光纤通信系统中,光纤色散造成脉冲展宽,引起码间串扰,增加误码率,从而影响光纤通信的传输速率和距离.色散系数作为通信光纤一项基本参数,对其精确测量有着重要意义.传统的光纤色散测量方法有时延法^[1-3]、相移法^[4-6]和干涉法^[7-9]等.时延法为最早出现的色散测量方法,此方法操作简单,但容易受激光光源的不稳定和脉冲宽度的影响,测量精度较低.相移法现已普遍商用化且有成熟的产品,具有较高的测试精度

基金项目:国家自然科学基金(No.61307122,61475043),河南省基础和先进技术研究项目(No. 142102210450)和 2017 新乡市科技攻关计划项目(No.CXGG17003)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.Email:wangxuwl@htu.edu.cn

通讯作者:张玲娟(1992—),女,硕士研究生,主要研究方向为光纤通信技术.Email:2276656607@qq.com

收稿日期:2018-01-22; **录用日期:**2018-05-23

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

和稳定性,但需稳定的可调谐激光器和网络分析仪,这些仪器造价较高,增加了系统的成本,且速度慢.干涉法^[10]结构简单、测量精度较高,但受到干涉臂长度的限制,只能测量长度较短的光纤的色散.近年来色散测量的方式多种多样,基于相位-强度转换测量光纤色散^[11]的方法可实现不同长度以及不同种类光纤色散的快速扫频测量,解决了相位调制信号的衰落效应,测量速度较快,但采用相位调制器结合矢量网络分析仪,测量系统成本较高.基于微波光子学的色散测量技术^[12]利用同一微波信号同时调制两路不同波长的光载波在待测介质中传输,通过输出的干涉微波功率变化来计算待测介质在不同波长处的色散值,可以方便测得多扫描波长范围内对应的色散曲线,对于具有大色散量的光纤具有较好的测量优势,仅需相对低的调制频率,且准确度高,但实验过程中需要可调谐激光器的稳定度较高,同时需要较高的微波频率才能获得准确的色散测量值.此外,还有基于光纤中调制不稳定性的脉冲放大法^[13]和利用光纤激光器光谱边带效应测量光纤色散的方法^[14]等,这些方法虽各有优势,但也存在一定的局限性.色散测量仪器属精密测试仪器,增加了测量系统成本,而在实际工程应用中,通常并不需要对光纤色散进行高精度测量.因此,本文提出一种基于多纵模拍频测量光纤色散的方法,并构建系统测量了 1 530~1 575 nm 波段的色散补偿光纤和普通单模光纤的色散,利用光纤激光器中拍频频率^[15]和时延的关系,得到光纤色散测量值.该系统具有相对简单的结构和较快的测量速度,并且能够达到足够的测量精度.

1 系统结构及实验原理

图 1 为基于多纵模拍频测量光纤色散的系统结构.光纤激光器的谐振腔由两个腔镜构成:激光器的前腔镜采用耦合器构成的光纤环境,耦合器的耦合比为 45 : 55,相应的反射率为 99%;后腔镜采用环形器和光纤可调谐 F-P 滤波器组成的窄带可调谐反射镜.980 nm 激光器为光纤激光谐振腔的泵浦光源,通过波分复用器接入光纤谐振腔,谐振腔内设有一段增益的掺铒光纤.由于偏振烧孔和空间烧孔导致的非均匀加宽,谐振腔内会有多纵模产生,任意两个纵模相互外差产生拍频,可以在频谱分析仪上看到多纵模激光拍频信号,如图 2.光纤激光器的拍频频率变化量与其谐振腔的腔长变化量成反比,而谐振腔的腔长变化与光纤色散系数相对应,因而通过测量可调光纤激光器的拍频频率与其工作波长的关系,能够得到腔内光纤的色散系数.

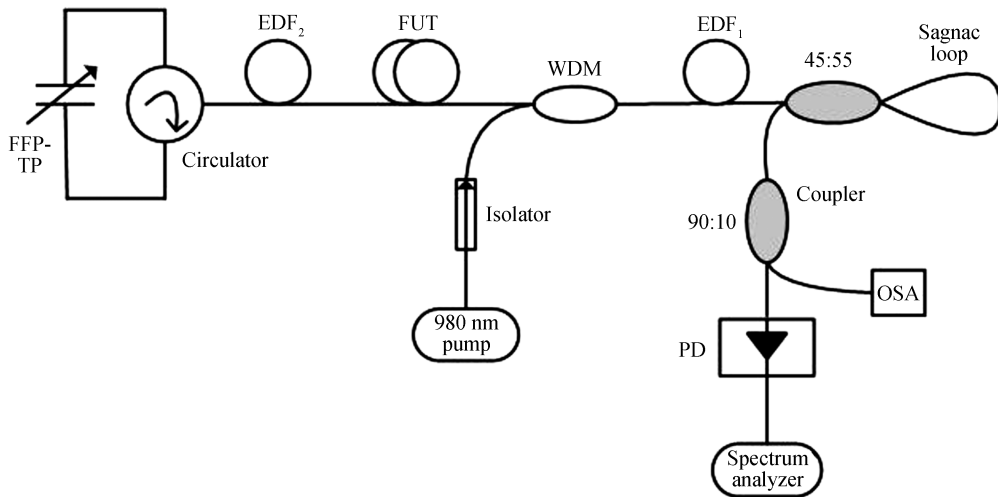


图 1 基于多纵模拍频测量光纤色散的光路系统

Fig.1 Optical path system for measuring fiber dispersion based on multi-longitudinal mode beat frequency

光纤激光谐振腔中产生的多纵模拍频可以表示为

$$v_k(\lambda) = k \cdot \frac{c}{2nL} \quad (1)$$

式中 $v_k(\lambda)$ 表示不同波长下的激光拍频频率 ($k=1, 2, 3, \dots$), c 是光在真空中的传播速度, n 是光纤纤芯的有效折射率, L 为光纤激光谐振腔腔长.拍频频率的大小与激光在谐振腔内的往返时间 $\tau(\lambda)$ 有关,往返时间可以表示为

$$\tau(\lambda) = \frac{k}{v_k(\lambda)} \quad (2)$$

由于待测光纤的色散特性,不同波长的激光通过待测光纤时具有不同的时延量,因此激光在光纤谐振腔内的往返时间等于对应波长激光通过待测光纤的时延量的 2 倍,可得待测光纤的色散系数 D 为

$$D = \frac{1}{L_{\text{FUT}}} \cdot \frac{d\tau}{d\lambda} \quad (3)$$

式中, τ 表示待测光纤的时延, L_{FUT} 表示待测光纤的长度。

对式(2)进行微分,得到待测光纤色散与拍频频率变化的关系为

$$\Delta v_k = -v_k(\lambda) \cdot \frac{c}{n} \cdot D \cdot \Delta\lambda \quad (4)$$

式中, Δv_k 表示拍频的变化量, $\Delta\lambda$ 表示光纤激光器的波长变化量.当光纤激光器的波长改变时,激光在谐振腔内的往返时间会相应地改变,同时对应的拍频也会变化,因此可以建立光纤激光器波长变化与多纵模拍频之间的关系,得到较为准确的光纤色散量.为了得到较高的色散的测量精度,选取频谱分析仪上的高倍频拍频信号作为待测信号参考频率.

2 实验结果分析

实验中,掺铒光纤采用 Nufern 公司的型号 EDF-C-980-HP,长度为 6 m.为了防止回波信号对于泵浦光源的影响,可以在系统中加入光纤隔离器.波分复用器和由 Sagnac 环之间加入 3 m 的掺铒光纤作为饱和吸收体以提高拍频信号的稳定性.采用 MOI 公司的光纤可调谐 Fabry-Perot(F-P)滤波器,在 1 550 nm 处,其自由光谱区宽度为 89.6 nm,3 dB 带宽为 0.166 nm.光纤可调谐 F-P 滤波器的输入功率受其精细度影响,最大值不能超过产品精细度对应的功率阈值.实验所用滤波器的精细度为 556,相应的最大输入功率不能超过 45 mW.通过调节加在滤波器内部压电陶瓷的负载电压来调节光纤激光器的工作波长,调节精度为 0.5 nm/0.1 V.泵浦光源型号为 980-600-B-FBG,光谱仪为恒河的 Yokogawa AQ6370C,分辨率为 0.01 nm,频谱分析仪为安泰信 AT6030DM,分辨率为 1 kHz.

实验中,分别测量色散补偿光纤和普通单模光纤的色散.色散补偿光纤的测试长度为 0.5 km,具有较高的负色散系数,厂家提供的参考色散系数为 -135 ps/nm/km .调节泵浦光源功率达到激光输出的阈值,在光谱分析仪上观测激光信号,再缓慢地增加泵浦功率直至可以在频谱分析仪上观测到稳定的功率较大的拍频信号.从 1 530 nm 到 1 575 nm 每隔 1 nm 调节光纤可调谐 F-P 滤波器的波长位置,可以在频谱分析仪上观测到对应波长下选定的参考拍频的频率移动.图 3 显示了光谱分析仪上观测到的激光从 1 550 nm 到 1 558 nm 的波长移动.拍频信号的基频频率为 200.3 kHz,根据式(4)可知激光每移动 1 nm,千倍频的拍频变化率为 5.27 kHz.图 4 显示了以千倍频率(200.468 MHz)为中心频率,频谱宽度为 1 MHz 的拍频频谱图.

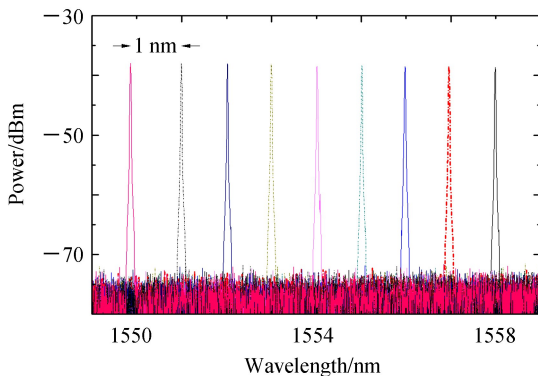


图 3 激光从 1 550 nm 到 1 558 nm 波段的波长移动
Fig.3 Wavelength shift of optical fiber laser from 1 550 nm to 1 558 nm

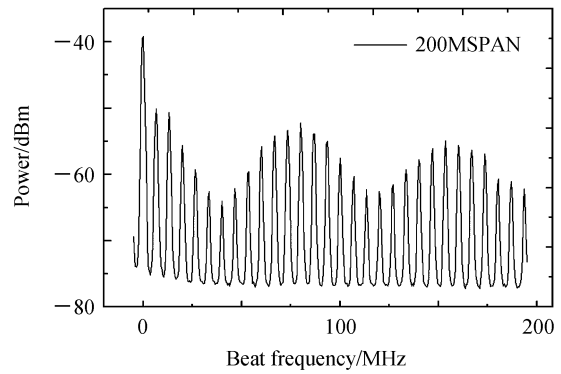


图 2 频谱分析仪上观测到的拍频信号

Fig.2 Beat frequency signal on radio frequency spectrum analyzer

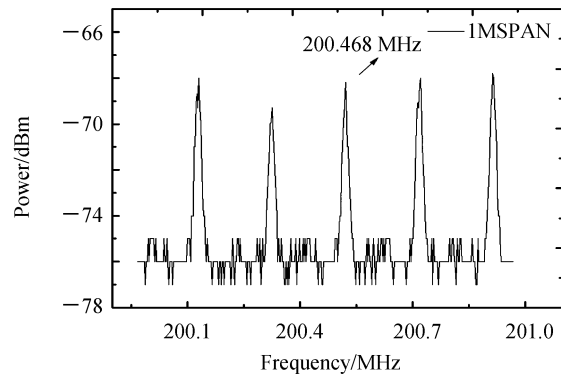


图 4 以 200.468 MHz 为中心频率,频谱宽度为 1000 Hz 的千倍拍频频谱

Fig.4 The 1 000th beat frequency spectrum with a central frequency of 200.468 MHz and a span of 1 000 Hz

图5显示了1000倍拍频从波长1545 nm到1561 nm的频率变化图谱.由图5可知,由于色散补偿光纤具有负的色散系数,当波长增大时,拍频频率呈增大趋势.以波长为横坐标,千倍拍频对应的激光通过待测光纤的时延值作为纵坐标,利用Origin8.0绘制出色散补偿光纤的色散曲线及其拟合曲线,如图6.图6中实心小圆代表每个波长下激光通过待测光纤的时延的千分之一,拟合曲线的斜率代表色散补偿光纤的色散系数的千分之一.拟合度达到0.999 55,测量色散补偿光纤的色散系数为 -132.69 ps/nm/km,与厂家提供参考值基本符合.

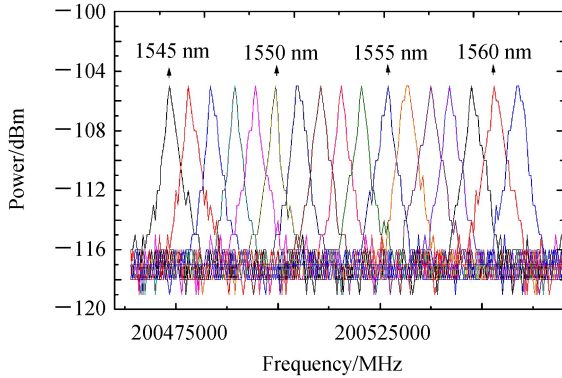


图5 1000倍拍频从波长1545 nm到1561 nm的频率变化图谱

Fig.5 The beat frequency variation of the 1000th frequency while the wavelength varies from 1545 nm to 1561 nm

实验采用相同的方法测量了长度为3.636 km的普通单模光纤的色散.由于普通单模光纤的色散系数较低,一般为 $16\sim 19$ ps/nm/km,选取较长光纤长度进行测量有助于色散的积累,也有助于提高拍频信号的测量精度.拍频信号的基频频率为27.5 kHz,根据式(4)可以算出,激光波长每移动1 nm,万倍拍频频率的拍频变化为1.03 kHz.同样利用Origin绘制出了普通单模光纤的色散曲线和拟合曲线,如图7.纵坐标代表万倍拍频频率对应的激光通过待测光纤的时延值,拟合曲线的斜率代表普通单模光纤的色散系数的万分之一.拟合度达到了0.999 14,普通单模光纤的色散测量值为 18.7 ps/nm/km,与厂家提供的色散参考值符合.

本文中测量结果的精确程度受激光拍频的稳定性影响,而激光拍频的稳定程度又受光纤激光器的激光信号的稳定性影响.因此提高激光信号的稳定性有助于色散测量值精度的提高.实验中提出了两种解决方案:1)电域频谱的时间平均法.在长腔光纤谐振腔中,微小的腔长变化等因素会引起拍频频率的随机不稳定性,导致色散测量精度和准确度的下降.在测量过程中,通过对所测量的拍频信号进行时间平均来降低这种随机不稳定性的影响.2)一段3 m的未泵浦的掺铒光纤作为饱和吸收体对谐振腔的一些模式选择性吸收,达到锁模的目的,从而稳定拍频.此外,选取窄线宽的光纤可调谐F-P滤波器以得到较窄带宽的激光输出,同时更精确地读取光纤激光波长能够进一步提高光纤的色散测量精度.

本次实验的测量结果与厂家提供的色散参考值基本符合,验证了实验的可行性.色散测量的准确值与光纤激光器的波长和多纵模拍频信号有关,实验使用的频谱分析仪的频率分辨率为1 kHz,光谱分析仪的波长分辨率为0.01 nm,如果这两种仪器的分辨率提高,则实验中色散测量结果的精度也会提高.

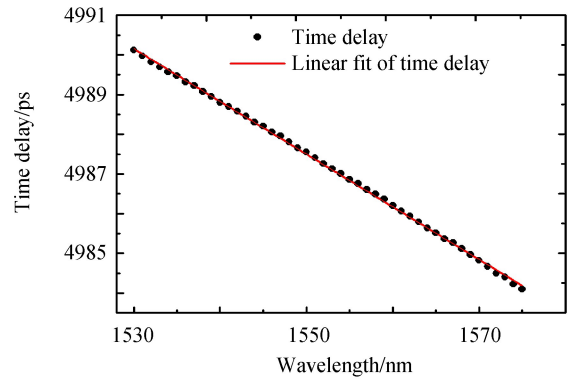


图6 色散补偿光纤1530~1575 nm波长范围内在千倍拍频频率处的色散曲线

Fig.6 The dispersion curve of the dispersion compensation fiber from 1530 nm to 1575 nm at the 1000th frequency

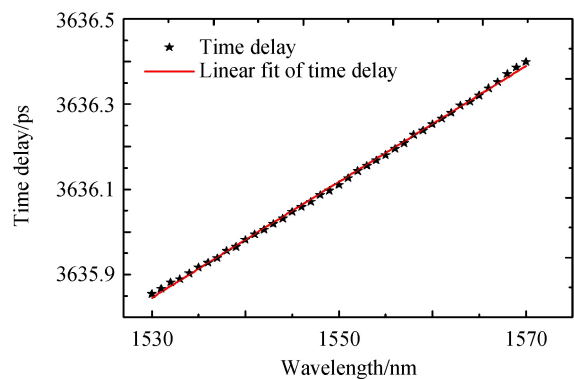


图7 普通单模光纤1530~1570 nm波长范围内在万倍拍频频率处的色散曲线

Fig.7 The dispersion curve of the single mode fiber from 1530 nm to 1570 nm at the 10000th frequency

3 结论

本文基于光纤激光器结合光纤可调谐 F-P 滤波器设计了一种利用激光多纵模拍频测量光纤色散的装置,通过实验测量了 1 530~1 570 nm 波段色散补偿光纤和普通单模光纤的色散,测量结果与色散参考值相符.实验通过搭建多纵模拍频光纤激光器,利用光纤可调谐 F-P 滤波器改变光纤激光器的波长,根据拍频会随着激光波长的变化而变化的原理,采用激光拍频解调得到了待测光纤的色散信息.相比传统的测量方法,这种方法采用电域的解调方法,把光信号转变为电信号处理,操作更加简单且成本较低,对于光纤色散测量具有一定的参考价值.

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] HULT J, WATT R S, KAMINSKI C F. Dispersion measurement in optical fibers using supercontinuum pulses[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, **25**(3):820-824.
- [4] CHEN Wu-jun, ZONG Yan, YANG Lu-na, *et al.* Determination of dispersion of single mode optical fiber by phase shift method[J]. *Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications*, 2016, **21**(1):93-96.
陈武军,宗研,杨璐娜,等.相移法测定单模光纤的色散[J].西安邮电大学学报, 2016, **21**(1):93-96.
- [5] GENTY G, NIEMI T, LUDVIGSEN H. New method to improve the accuracy of group delay measurements using the phase-shift technique[J]. *Optics Communications*, 2002, **204**(1-6):119-126.
- [6] SUN Si-min, CUI Sheng, KE Chang-jian, *et al.* Improved all optical chromatic dispersion monitoring method for WDM systems[J]. *Optical Fiber Technology*, 2013, **19**(2):115-120.
- [7] YE Q, XU C, LIU X, *et al.* Dispersion measurement of tapered air-silica microstructure fiber by white-light interferometry[J]. *Applied Optics*, 2002, **41**(22):4467-4470.
- [8] LEE J Y, KIM D Y. Versatile chromatic dispersion measurement of a single mode fiber using spectral white light interferometry[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(24):11608-11615.
- [9] HLUBINA P, KADULOVA M, CIPRIAN D. Spectral interferometry-based chromatic dispersion measurement of fiber including the zero-dispersion wavelength[J]. *Journal of the European Optical Society*, 2012, **7**(3):2017.
- [10] TSUCHIDA H. Optical fiber chromatic dispersion measurement using incoherent heterodyne interferometry [J]. *Electronics Letters*, 2016, **52**(8):645-646.
- [11] ZHANG Shang-jian, ZOU Xin-hai, ZHANG Ya-li, *et al.* Precise measurement of fiber dispersion based on phase-modulated signal fading[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2014, **56**(2):427-430.
- [12] ZHANG Ming. Research on chromatic dispersion measurement based on microwave photonics [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.
张敏. 基于微波光子学的色散测量技术研究[D].大连:大连理工大学, 2012.
- [13] WONG G K, CHEN A Y. Characterization of chromatic dispersion in photonic crystal fibers using scalar modulation instability [J]. *Optics Express*, 2005, **13**(21): 8662-8670.
- [14] YE Hui, XU Wen-cheng, LUO Zhi-chao, *et al.* Dispersion measurement for optical fiber in ring cavity using fiber laser sideband spectrum[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7):1323-1326.
- [15] WANG Xu, ZHANG Hao-jie, WEN Quan, *et al.* A stress fiber sensor based on laser beat frequency[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, **43**(8):0801011.
王旭,张豪杰,温泉,等.一种利用激光拍频实现应力测量的传感装置[J].中国激光, 2016, **43**(8):0801011.

Foundation item: The Natural Science Foundation of China (Nos.61307122, 61475043), the Basic and Advanced Technology Research Program of Henan Province (No.142102210450), 2017 Xinxiang Science and Technology Project (No.CXGG17003)

引用格式:WANG Xu, ZHANG Ling-juan, CHEN Long-fei, *et al.* Fiber dispersion measurement based on multi-longitudinal mode beat frequency[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(8):0806002

王旭,张玲娟,陈龙飞,等.基于多纵模拍频测量光纤色散[J].光子学报, 2018, **47**(8):0806002