

# 基于光开关和激光拍频的光纤色散快速测量方法

王旭, 李小康\*, 陈龙飞

河南师范大学电子与电气工程学院, 河南 新乡 453007

**摘要** 提出了一种光纤色散的简单快速测量方法。该方法采用光纤激光器结构,由 Sagnac 环和光纤耦合器组成的光纤环形镜作为谐振腔一端的反射腔镜,另一端反射腔镜为不同中心波长的光纤光栅。利用光开关依次构成  $n$  个独立的光纤激光器。通过对激光拍频的测量得到在不同波长下待测光纤的时延,进一步可以得到待测光纤的色散系数。利用该方法实现了对一根长度为 500 m 的色散补偿光纤的色散测量。结果表明,该方法切实可行、操作简单,能够实现光纤色散的快速测量,从而为通信系统中光纤的类型、长度等参数的合理选用提供参考。

**关键词** 光纤光学; 色散; 拍频; 光开关; 色散补偿光纤

中图分类号 TN24

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.030603

## Fast Measurement of Optical Fiber Dispersion Method Based on Optical Switch and Laser Beat Frequency

Wang Xu, Li Xiaokang, Chen Longfei

College of Electronic and Electrical Engineering, Henan Normal University, Xinxiang, Henan 453007, China

**Abstract** A simple and fast dispersion measurement method is proposed based on the fiber laser structure. The resonant cavity is composed of two mirrors, one composed of Sagnac ring and fiber coupler and the other composed of the fiber gratings with different central wavelengths. The fiber lasers are established with different independent wavelengths based on optical switch. Gauging the laser beat frequency, we can obtain the time delay of the optical fiber under different wavelengths and then can obtain the dispersion coefficient. The dispersion of a 500-m-long dispersion compensation fiber is tested by the proposed method. The results show that the method is feasible, easy to implement, and can realize the rapid measurement of the optical fiber dispersion. The method can provide a reference for the selection of fiber parameters such as the fiber type and length in the communication applications.

**Key words** fiber optics; dispersion; beat frequency; optical switch; dispersion compensation fiber

**OCIS codes** 060.2300; 060.2410; 140.3500

## 1 引言

色散是光纤的基本参数,在光纤通信系统中,光纤色散造成了光脉冲展宽,引起码间干扰,从而影响通信质量<sup>[1-4]</sup>。特别是随着长距离、高速率光纤通信技术的发展应用,色散愈加成为影响其系统性能的重要因素。为了降低脉冲展宽,通常采取色散补偿措施,而色散补偿则需要对光纤的色散进行有效测量。目前光纤色散测量的方法主要有时延法<sup>[5-7]</sup>、干涉

法<sup>[8-11]</sup>以及相移法<sup>[12-15]</sup>等。时延法是最早出现的色散测量方法,通过测量不同波长光脉冲间的时延量来对光纤色散进行测量,此方法操作简单,但易受激光光源稳定性的影响,因此测量精度不高。干涉法的测量精度高,结构相对简单,能够测量短光纤,适合于价格昂贵的特种光纤,如光子晶体光纤等,但由于需要一个可调参考臂,这给长距离光纤系统的测量带来不便。相移法应用比较广泛,测量精度高,稳定性好,是商用色散测量仪器采用的标准方法,一般通过检测不同波长

收稿日期: 2017-10-18; 收到修改稿日期: 2017-10-25

基金项目: 新乡市科技攻关计划(CXGG17003)

作者简介: 王旭(1965—),男,博士,副教授,主要从事光纤通信技术、电磁场与微波技术等方面的研究。

E-mail: wangxuwl@htu.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: lixiaokangllz@163.com

调制信号的相对相移来测量光纤色散,但相移法需要可调谐激光器和网络分析仪,测量系统成本较高。一般商用的光纤色散测量仪器系统复杂、价格昂贵,而且测量速度缓慢。在实际工程应用中,往往并不需要对光纤色散进行高精度测量。由于光纤的色散参数能够通过测量不同波长下激光经过待测光纤(FUT)的时延而得到,因此,本文基于光纤激光器结构,提出了一种新的光纤色散快速测量方法。该方法以色散补偿光纤为例,通过研究光纤激光器中拍频频率<sup>[16]</sup>和时延的关系,将光信号转变为电信号,降低了测量仪器的成本。本方法设计简单、快速便捷,适用于光纤的快速色散测量,可以在工程中得到实际应用。

## 2 测量结构与原理

测量系统的结构原理如图 1 所示。系统采用

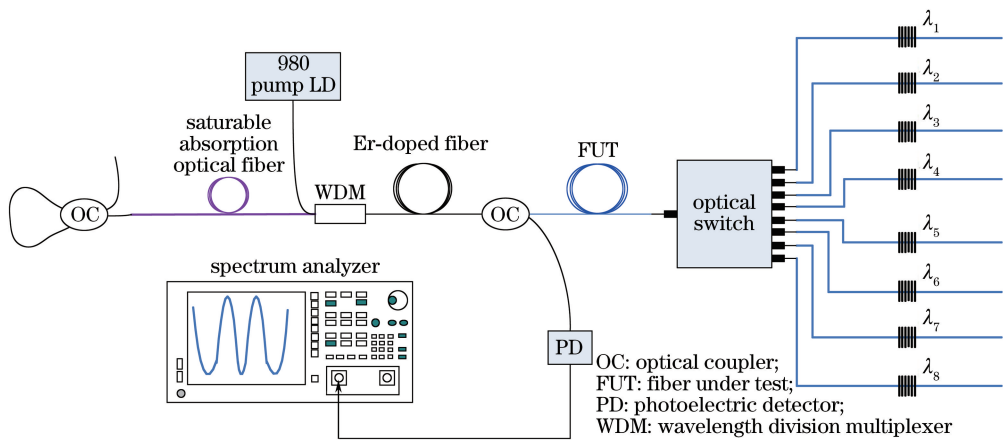


图 1 基于光开关和激光拍频的光纤色散测量系统原理图

Fig. 1 Schematic of optical fiber dispersion measurement system based on optical switch and laser beat frequency

各光纤激光器产生的多纵模拍频频率为

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

式中,  $q$  为正整数,  $c$  为光在真空中的传播速度,  $n$  为光纤的有效折射率,  $L$  为激光谐振腔腔长。激光拍频频率间隔为

$$\Delta\nu = \nu_{q+1} - \nu_q = \frac{c}{2 \cdot n \cdot L}. \quad (2)$$

频率间隔  $\Delta\nu$  的倒数为激光器中光波循环一周的时间:

$$t = 1/\Delta\nu. \quad (3)$$

通过对激光器拍频频率的测量,能够得到各工作波长下激光器中的激光传输时延。在光纤激光器中加入待测光纤,不同波长的激光通过待测光纤的时延量不同,利用已知光纤光栅的反射波长和频谱分析仪上所测得的拍频频率之间的关系可得待测光

纤激光器结构,由 Sagnac 环和光纤耦合器组成的光纤环形镜作为谐振腔一端的反射腔镜,另一端反射腔镜为不同中心波长的光纤光栅。利用光开关分别把  $n$  个不同中心波长的光纤光栅 ( $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ ) 接入光路,各光纤光栅之间有相同的波长间隔,通过光开关依次构成  $n$  个独立的光纤激光器。由 980 nm 激光器作为抽运光源,通过波分复用器将抽运光接入设有一段增益掺铒光纤的谐振腔中。当抽运光达到阈值,由于谐振腔中存在偏振和空间烧孔,抽运光被非均匀加宽,谐振腔内产生多纵模激光,任意两个纵模之间产生拍频。为了让拍频更加稳定,系统采用窄带宽的光纤光栅,并在光纤谐振腔中加入一段未抽运的掺铒光纤作为饱和和吸收体,从频谱分析仪上可以观测到稳定的拍频信号。

纤的色散系数。为了提高拍频频率的分辨率,选取频谱分析仪上的较高倍频信号作为检测频率。

利用光开关和多个光纤光栅可依次形成多个光纤激光器,当光纤激光器中未加待测光纤时,通过激光拍频频率的测量分别得到激光器中光波循环一周的时间为  $\tau_{\lambda_1}, \tau_{\lambda_2}, \tau_{\lambda_3}, \dots, \tau_{\lambda_n}$ ; 加入待测光纤后,每个激光器中光波循环一周的时间分别为  $\tau_{\lambda_1} + \Delta\tau_{\lambda_1}, \tau_{\lambda_2} + \Delta\tau_{\lambda_2}, \tau_{\lambda_3} + \Delta\tau_{\lambda_3}, \dots, \tau_{\lambda_n} + \Delta\tau_{\lambda_n}$ 。两次时间值相减得到的时延差  $\Delta\tau_{\lambda_1}, \Delta\tau_{\lambda_2}, \Delta\tau_{\lambda_3}, \dots, \Delta\tau_{\lambda_n}$ , 即为待测光纤在各波长下的时延。根据测量的数据可以得到时延随波长变化的曲线图,经线性拟合可得到时延与波长的函数关系,待测光纤的色散系数可表示为

$$D = \frac{1}{l} \cdot \frac{\Delta\tau}{\Delta\lambda}, \quad (4)$$

式中,  $l$  为待测光纤长度,  $\Delta\tau$  为待测光纤在相邻波长下的时延差,  $\Delta\lambda$  为各激光器的波长间隔,在只考

考虑一阶色散情况下,色散系数  $D$  为常量。各激光器的波长间隔  $\Delta\lambda$  越小,测得精度越高。

### 3 实验结果与分析

测量系统中选用了 8 个光纤光栅( $\lambda_1, \lambda_2 \dots \lambda_7, \lambda_8$ )和光纤环形镜分别构成 8 个独立的光纤激光器。光纤光栅中心波长分别为 1541.100, 1543.204, 1545.158, 1547.280, 1549.186, 1551.120, 1553.194, 1555.042 nm, 反射率为 60%, 3 dB 带宽小于 0.08 nm。激光器谐振腔中掺铒光纤的长度约为 6 m, 在光纤环形镜和波分复用器之间加入长度约为 3 m 的饱和吸收体进行稳频。实验中选用色散补偿光纤作为待测光纤, 长度为 500 m, 标称色散系数在 1545 nm 处为  $-131.507 \text{ ps} \cdot (\text{nm} \cdot \text{km})^{-1}$ 。利用频谱分析仪(安泰信 AT6030DM, 分辨率为 2.5 kHz)对拍频进行测量。

980 nm 的抽运光源经过波分复用器进入谐振腔, 逐步调节抽运功率, 可以在光谱仪和频谱仪上分别观测到激光信号和拍频信号, 利用光开关依次选取不同中心波长的光纤光栅, 在光谱仪和频谱分析仪上分别观测到激光波长移动和拍频频率变化。图 2 显示了光谱分析仪上观测到的激光从 1541 nm 到 1555 nm 的波长移动。

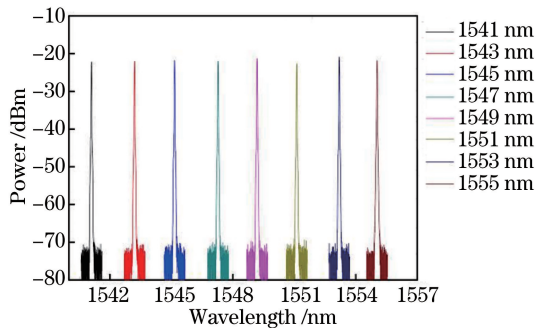


图 2 激光从 1541 nm 到 1555 nm 波段的波长移动光谱图  
Fig. 2 Spectrum of wavelength shift from 1541 nm to 1555 nm

系统中未加待测光纤前, 可测得 8 个中心波长不同的光纤光栅分别接入光路时的拍频频率, 并计算其对应的时延量。实验中采用拍频较稳定的 48 倍频( $48f_0$ )处作为测量数据, 并对数据进行处理和归一化后得到相应的时延。具体数据如表 1 所示。

在系统中掺铒光纤和光开关之间加入待测光纤, 通过光开关依次选择不同中心波长的光纤光栅, 分别测量激光器在每一个工作波长处的拍频频率, 进一步计算得到时延。为提高测量精度, 选取较拍

频稳定的 1000 倍频( $1000f_0$ )作为测量频率, 具体数据如表 2 所示。

表 1 未加待测光纤前的实验数据

Table 1 Experimental data without the fiber under test

Wavelength /nm	$48f_0$ /MHz	$\tau_\lambda$ /ps
1541	266.001250	180450.280
1543	266.385000	180190.326
1545	267.862500	179196.416
1547	265.673750	180672.724
1549	266.957500	179803.901
1551	266.593358	180049.497
1553	268.023358	179088.869
1555	271.721250	176651.624

表 2 加入待测光纤后的实验数据

Table 2 Experimental data with the fiber under test

Wavelength /nm	$1000f_0$ /Hz	$\tau_\lambda + \Delta\tau_\lambda$ /ps
1541	195.118750	5125084.083
1543	195.137500	5124591.634
1545	195.187500	5123278.898
1547	195.141250	5124493.156
1549	195.183750	5123377.330
1551	195.183750	5123377.330
1553	195.231250	5122130.806
1555	195.332500	5119475.766

将系统中加入待测光纤前、后分别得到的时延相减, 得到时延差  $\Delta\tau_1, \Delta\tau_2, \Delta\tau_3, \dots, \Delta\tau_n$ , 即为待测光纤在各波长下的时延。待测光纤的色散曲线及其拟合曲线如图 3 所示。

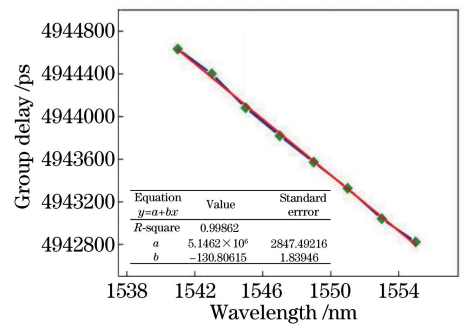


图 3 时延与波长的变化曲线

Fig. 3 Group delay as a function of wavelength

通过图 3 的实验结果可以得到, 待测光纤的色散系数为  $-130.80615 \text{ ps} \cdot (\text{nm} \cdot \text{km})^{-1}$ , 与厂家提供色散参考值基本相符, 线性拟合相关系数为 0.99862。实验结果证实了本方法的可行性。在实际测量中, 通过对拍频频率的探测即可实现对光纤色散的测量, 无需光谱仪等贵重仪器。如果所用光开关的输出端口更多, 即相邻两个光纤光栅的中心波长间隔更小, 那么测量结果的精度将会进一步提高。

## 4 结 论

基于光开关和激光拍频技术提出了一种快速简单的光纤色散测量方法,并以色散补偿光纤为例对其色散进行了实际测量,测量结果和厂家提供的参数相符,相关系数达到了0.99862。这种方法采用光纤激光器结构,技术的核心是将时延的测量转变为极易测量的拍频频率,利用拍频进行解调,即通过包含腔长信息的多纵模拍频信号来测量色散,有效地避免了测量系统的复杂性。本文提出的光纤色散测量技术优势在于系统无需昂贵仪器,结构简单,测量速度快,利用电信号进行测量有助于该技术在工程应用中为光纤类型、长度等的快速合理选用提供支持。

## 参 考 文 献

- [1] Majumder S P, Azhari A, Abbou F M. Impact of fiber chromatic dispersion on the BER performance of an optical CDMA IM/DD transmission system [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(6): 1340-1342.
- [2] Pincemin E, Karaki J, Loussouarn Y, *et al.* Challenges of 40/100 Gbps and higher-rate deployments over long-haul transport networks [J]. *Optical Fiber Technology*, 2011, 17(5): 335-362.
- [3] Maeda J, Kusama K, Fukuchi Y. Mitigation of signal fading in radio over fiber transmission using fiber nonlinearity [J]. *Optics Express*, 2009, 17(6): 4518-4525.
- [4] Brendel F, Poette J, Cabon B, *et al.* Chromatic dispersion in 60 GHz radio-over-fiber networks based on mode-locked lasers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(24): 3810-3816.
- [5] Lin C, Tynes A R, Tomita A, *et al.* Chromatic dispersion measurements in single-mode fibers using picosecond InGaAsP injection lasers in the 1.2- to 1.5- $\mu\text{m}$  spectral region [J]. *The Bell System Technical Journal*, 1983, 62(2): 457-462.
- [6] Thevenaz L, Pellaux J P, von der Weid J P. All-fiber interferometer for chromatic dispersion measurements [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1988, 6(1): 1-7.
- [7] 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.

- [8] Wang S J, Zhang Y Y, Hu M L, *et al.* Chromatic dispersion measurement of photonic crystal fibers using spectral interferometry [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(1): 215-219.  
王思佳, 张玉颖, 胡明列, 等. 频域干涉法测量光子晶体光纤的色散特性 [J]. *中国激光*, 2010, 37(1): 215-219.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Tsuchida H. Optical fiber chromatic dispersion measurement using incoherent heterodyne interferometry [J]. *Electronics Letters*, 2016, 52(8): 645-646.
- [12] Li Y, Xi L X, Zhang X G, *et al.* Experimental research on chromatic dispersion measurement based on digital phase detector [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(10): 1004003.  
李赞, 席丽霞, 张晓光, 等. 基于数字鉴相的色散测量实验研究 [J]. *中国激光*, 2016, 43(10): 1004003.
- [13] Horiuchi Y, Namihira Y, Wakabayashi H. Chromatic dispersion measurement in 1.55  $\mu\text{m}$  narrow-band region using a tunable external-cavity laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1989, 1(12): 458-460.
- [14] Daikoku K, Sugimura A. Direct measurement of wavelength dispersion in optical fibres-difference method [J]. *Electronics Letters*, 1978, 14(5): 149-151.
- [15] Cohen L. Comparison of single-mode fiber dispersion measurement techniques [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1985, 3(5): 958-966.
- [16] Wang X, Zhang H J, Wen Q, *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.