

波长扫描型布里渊光时域反射仪

赵晓东 路元刚 胡君辉 李 密 张旭苹

(南京大学光通信工程研究中心, 江苏 南京 210093)

摘要 布里渊光时域反射仪(BOTDR)是一种具有广泛应用前景的分布式光纤传感器。对于特定的入射波长,自发布里渊散射光的布里渊频移与温度和应变成线性关系,通过测量光纤沿线布里渊频移分布可实现温度或应变的分布式传感。布里渊功率谱扫描是 BOTDR 获取布里渊频移的常用手段,已有光频差扫描与电频扫描两种方式。基于布里渊频移对波长的依赖性,提出一种波长扫描型 BOTDR。采用可调谐激光器作为光源,通过扫描入射光波长,来获取布里渊功率谱,该方法兼具光频差扫描与电频扫描的优点。实验证明了该方法的可行性,对 23.4 km 光纤进行测量,实现了 5 m 的空间分辨率与 2.2 °C 的温度测量精度。

关键词 光纤光学;波长扫描型布里渊光时域反射仪;相干探测;布里渊频移;波长依赖性

中图分类号 O439;TP212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0805003

A Wavelength-Scanning Brillouin Optical Time Domain Reflectometer

Zhao Xiaodong Lu Yuangang Hu Junhui Li Mi Zhang Xuping

(Institute of Optic Communication Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China)

Abstract Brillouin optical time domain reflectometer (BOTDR) is a distributed optical fiber sensor with broad application prospects. For a given input light wavelength, the Brillouin frequency shift of spontaneous Brillouin scattering light has a linear relationship with both temperature and strain. The distributed temperature or strain can be obtained by measuring the Brillouin frequency shift (BFS) along the fiber. In a BOTDR, Brillouin power spectrum scanning is a commonly used means to obtain the BFS, and there has been two types: the optical frequency-difference scanning method and the electrical frequency scanning method. A wavelength scanning BOTDR is proposed based on the wavelength dependence of the BFS. With a tunable laser as the light source, the Brillouin power spectrum is obtained by scanning the input light wavelength. This method combines the advantages of the optical frequency-difference scanning method and the electrical frequency scanning method. The feasibility of this proposed method is demonstrated experimentally. By use of this method, a temperature accuracy of 2.2 °C along a 23.4 km sensing fiber with a 5 m spatial resolution is achieved.

Key words fiber optics; wavelength-scanning Brillouin optical time domain reflectometer; coherent detection; Brillouin frequency shift; wavelength dependence

OCIS codes 060.2370; 120.4825; 290.5830

1 引 言

通过探测自发布里渊散射光,布里渊光时域反射仪(BOTDR)可实现对温度或应变的分布式测量,已被广泛应用于多个领域^[1,2]。凭借高灵敏度与对瑞利散射信号的分离能力,自外差相干检测方式常

被用于检测微弱布里渊信号^[3~5]。布里渊信号具有一定带宽,其功率谱呈洛伦兹形状。为了得到布里渊频移,常用功率谱扫描法来获取布里渊功率谱,多次测量分别得到布里渊功率谱的不同频谱成分,通过洛伦兹拟合来确定完整布里渊功率谱的形状。功

收稿日期: 2012-03-10; 收到修改稿日期: 2012-04-25

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327803)、国家自然科学基金(61027017)、中央高校基础研究基金(1095011801、1118011808)和苏州市应用基础研究计划(SYG201106)资助课题。

作者简介: 赵晓东(1988—),男,硕士研究生,主要从事布里渊光纤传感技术方面的研究。E-mail: zxd620@gmail.com

导师简介: 路元刚(1977—),男,副教授,硕士生导师,主要从事光电检测、光纤传感等方面的研究。

E-mail: luyg@nju.edu.cn(通信联系人)

率谱扫描法一般有光频差扫描和电频扫描两大类。前者通过调节探测脉冲光与本振参考的频率差来实现扫频,如声光调制器频率转换环路^[6],微波高速相位调制^[7],微波光电调制^[8]等;而后者使用高频探测器获取完整相干信号,然后应用可调微波信号源对获取的宽带布里渊电信号进行电频扫描,称为微波相干探测^[9,10]。电频扫描相对于光频差扫描,具有结构简单、稳定性高的优点,并消除了本振参考光自拍频噪声的影响;光频差扫描的优势在于扫描过程中处理的电信号频率不变,探测器对该频率的信号增益恒定,避免探测电路增益不平坦的影响并简化了后端处理。

提出了一种新的布里渊功率谱扫描方法。该方法不同于传统扫描方法,既不改变探测脉冲光与本征光的频率差,也不在后端使用可调微波信号源进行电频扫描,而是使用一个可调谐激光器进行波长扫描来获取布里渊功率谱。在 1550 ± 15 nm 范围内,布里渊频移与入射波长成线性关系。线性改变光源波长时,相干探测得到的电信号的功率谱在频率轴上线性平移。通过探测电功率谱上某个固定频率对应的功率,可得到波长功率曲线,呈洛伦兹形状,其中心波长对应的布里渊频移即为观测电频率。由上述信息以及事先标定的布里渊波长-频移系数,可获知 1550 ± 15 nm 范围内任意波长对应的布里渊频移。实验证明该方法结构简单,实施方便,稳定性高,对 23.4 km 光纤进行测量,在 5 m 的空间分辨率上实现了 2.2 °C 温度测量精度。

2 原 理

后向自发布里渊散射光的功率谱呈现洛伦兹形状,相干探测后的电信号功率谱与其成正比,因而频率 ν 处的功率 $g(\nu)$ 可描述为^[10]

$$g(\nu) = g_0 \frac{(\Delta\nu/2)^2}{(\nu - \nu_B) + (\Delta\nu/2)^2}, \quad (1)$$

式中 g_0 为功率谱峰值, ν_B 为布里渊频移, $\Delta\nu$ 为功率谱带宽。布里渊频移 ν_B 与入射光波长 λ_P 的关系为^[11]

$$\nu_B = \frac{2V_A n}{\lambda_P}, \quad (2)$$

式中 V_A 为光纤中的声速, n 为光纤折射率。在光纤所受温度与应变确定时,对于 1520~1558 nm 范围内的波长,布里渊频移随入射光波长线性变化^[12],

$$\nu_B(\lambda) = \nu_B(\lambda') + C(\lambda - \lambda'), \quad (3)$$

式中 C 为频移波长系数。对于标准单模光纤,若

$n=1.45, V_A=5.96$ km/s^[11],由(2)式可得到 ν_B 与 λ_P 的关系,如图 1 所示。对图中数据使用线性函数拟合,得到 $C=-7.195$ MHz/nm,拟合均方根误差为 0.343 MHz。

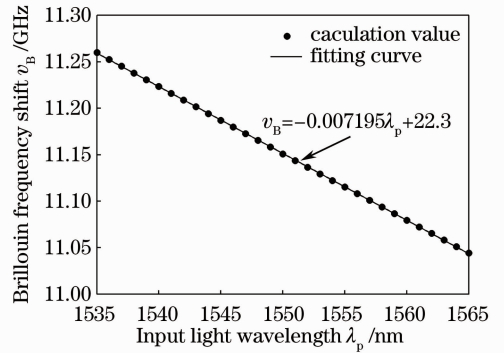


图 1 入射光波长与布里渊频移的关系图

Fig. 1 Relationship between input light wavelength and Brillouin frequency shift

从图 1 可以看出,入射波长在 1550 ± 15 nm 范围内变化时,(3)式成立,该 C 值是在选择的波长范围内特定的折射率与声速下得到的,实际应用中 C 的取值需要事先标定。

光纤的温度与所受应变线性地改变布里渊频移,波长从 1320 nm 增加 233.8 nm 到 1553.8 nm 时,温度频移系数与应变频移系数分别降低了约 8.33% 与 9.7%^[13,14],改变较小,在 1550 ± 15 nm 范围内可认为基本不变。因而虽然 $\nu_B(\lambda)$ 与 $\nu_B(\lambda')$ 随着温度与应变的变化而变化,但变化量基本相同,(3)式仍然成立。

根据布里渊频移与波长的关系,提出一种如图 2 所示的波长扫描型 BOTDR。

窄线宽可调谐激光器发出的某个波长的连续光,通过光纤耦合器后被分为两路,一路被调制成探测脉冲光,然后通过环形器注入光纤以激发自发布里渊散射光;另一路作为本振参考光,在经过扰偏器(PS)扰乱其偏振态以降低偏振噪声的影响后^[15],与自发布里渊散射光通过耦合器相叠加。平衡探测器用于光电转换,在射频输出口得到自发布里渊散射光与本振参考光的相干电信号。相干电信号与固定频率 ν_L 的微波信号源混频,然后通过窄带低通滤波器获取电信号的功率曲线,根据脉冲光注入光纤与接收到自发布里渊散射光的时间差可实现定位。如图 3(a) 所示,从光纤某一确定位置来看,窄带低通滤波器所得功率为相干电信号在频率 ν_L 处的功率,增大入射波长 λ_P 时,布里渊频移 ν_B 减小。在不同波长的入射光作用下,分别得到电信号在频率 ν_L 处

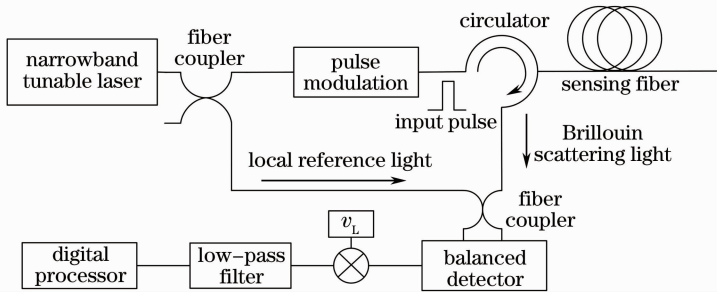


图 2 波长扫描型 BOTDR 结构示意图

Fig. 2 Schematic of the structure of wavelength-scanning BOTDR

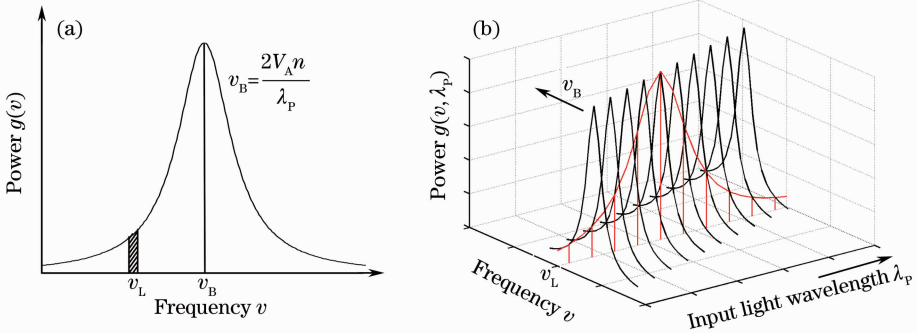


图 3 波长扫描示意图。(a)入射波长为 λ_p 时的相干电信号功率谱；(b)波长功率曲线的获取过程

Fig. 3 Schematic of the wavelength scanning process. (a) Power spectrum of the coherent electrical signal with input wavelength λ_p ; (b) acquisition process of wavelength-power curve

的功率,从而可绘制该位置处的波长功率曲线,该过程如图 3(b)所示。

由于波长与布里渊频移的线性关系,波长功率曲线可用洛伦兹函数 $g(\lambda) = g_0 \frac{(\Delta\lambda/2)^2}{(\lambda - \lambda') + (\Delta\lambda/2)^2}$ 拟合,得到功率曲线半峰全宽 $\Delta\lambda$ 与中心波长 λ' ,该波长下的布里渊频移 $v_B(\lambda')$ 即为 v_L ,而布里渊功率谱带宽为 $\Delta v = \Delta\lambda/C$ 。将 λ' 与 $v_B(\lambda')$ 代入(3)式,即可得到该位置处波长 λ 对应的布里渊频移 $v_B(\lambda)$ 。计算各个位置处的布里渊频移,最终得到布里渊频移位置曲线。

3 实验及结果分析

为了证明波长扫描型 BOTDR 的可行性,采用图 4 所示的实验装置来进行实验验证。图 4 中,可调谐激光器输出的连续光被 50/50 保偏耦合器分为探测光与本振参考光。探测光被两个串联电光调制器(EOM1 和 EOM2)调制成高消光比的探测脉冲光,经由掺铒光纤放大器(EDFA)放大后通过环形器进入传感光纤,在光纤沿线产生自发布里渊散射光。本振参考光为连续光,通过扰偏器以降低偏振噪声的影响。参考光与自发布里渊散射光通过耦合器相叠加,然后被带宽 12 GHz 的平衡探测器光电

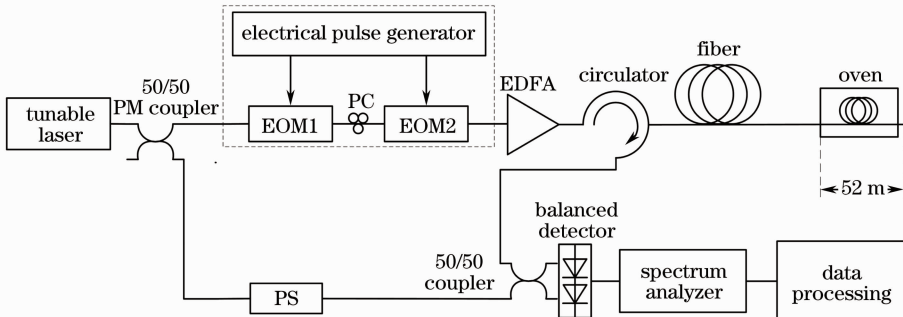


图 4 波长扫描型 BOTDR 实验装置图

Fig. 4 Configuration of wavelength-scanning BOTDR

转换为电信号。频谱仪工作在“zero-span”模式,测量频率 10.85 GHz 处的功率曲线。调节波长得到各自对应的功率曲线,组成三维布里渊功率谱,进行数据处理最终得到布里渊频移位置曲线。

可调谐激光器的波长可调范围为 1460 ~ 1580 nm,线宽恒定为 700 kHz,波长误差为 ± 1 pm,相应导致的频移误差约为 ± 0.14 kHz。探测脉冲光消光比为 50 dB,脉宽为 50 ns,对应于 5 m 的空间分辨率。传感光纤长 23.4 km,末端 52 m 放入恒温箱中加热至 60.0 °C,室温为 21.9 °C。经标定该光纤波长频移系数为 -6.9 MHz/nm。设置一个入射波长,频谱仪平均 4096 次得到一条功率曲线;波长从 1540 nm 调节到 1563 nm,调节步进为 1 nm,相应的功率曲线组成三维功率谱,如图 5 所示。

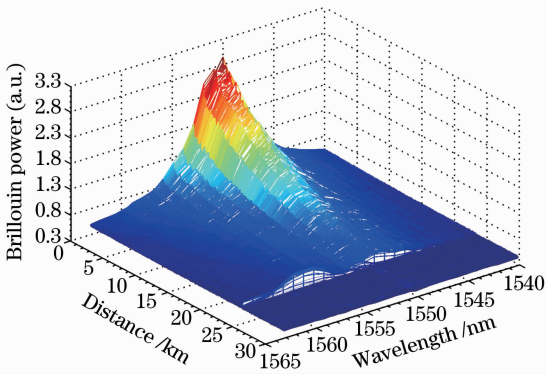


图 5 三维布里渊功率谱

Fig. 5 3D Brillouin power spectrum

对各个位置处的数据进行洛伦兹拟合以获取对应的中心波长,中心波长对应的布里渊频移即为观测频率 10.85 GHz。图 6 所示为光纤位置 4.75、19.75、23.35 km 处测量得到的功率谱以及相应的拟合曲线。

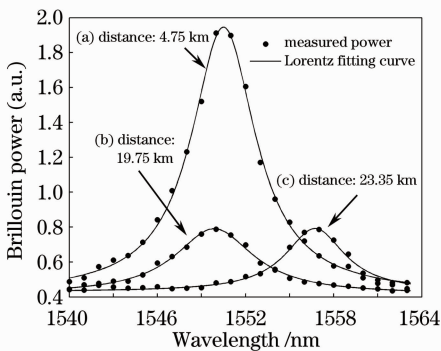


图 6 布里渊功率谱拟合

Fig. 6 Lorentz fitting of Brillouin power spectrum

从图 6 中可以看到,在光纤加热处获得的功率谱相对于未加热段,中心波长有明显的偏移。在获

得整个光纤各个位置处的中心波长后,计算波长 1550 nm 对应的布里渊频移位置曲线,结果如图 7 所示。光纤加热段与未加热段平均布里渊频移分别为 10.8948 GHz 和 10.8509 GHz,频移差 43.9 MHz,对应的温度差为 40.3 °C,由于实际温度差为 38.1 °C,因而温度测量精度为 2.2 °C。

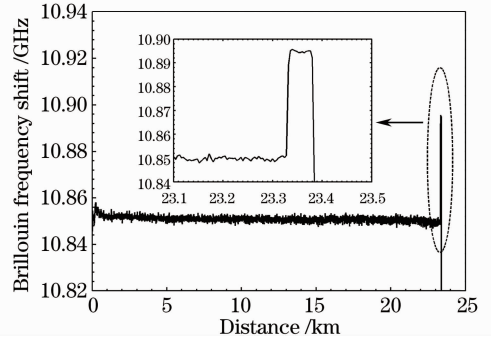


图 7 沿光纤的布里渊频移分布

Fig. 7 Distribution of Brillouin frequency shift along the fiber

4 结 论

基于布里渊频移对波长的依赖性,提出一种波长扫描型 BOTDR。布里渊频移与入射光波在一定范围内成线性关系,通过扫描入射光波长,可获取布里渊功率谱。该方法兼具光频差扫描与电频扫描的优点,光路结构简单,稳定性高,对激光器波长精度的要求低, ± 1 pm 波长误差仅造成 ± 0.14 kHz 频率误差。此外,由于测量的是特定频率上的电信号,因而对探测电路增益是否平坦不敏感。使用该方法对 23.4 km 光纤进行测量,同时获得了 5 m 空间分辨率与 2.2 °C 的温度测量精度。

参 考 文 献

- 1 H. Ohno, H. Naruse, M. Kihara *et al.*. Industrial applications of the BOTDR optical fiber strain sensor[J]. *Optical Fiber Technology*, 2001, **7**(1): 45~64
- 2 Zhang Xuping, Wang Feng, Lu Yuangang. Fully distributed optical fiber sensor based on Brillouin effect[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(11): 14~20
张旭苹,王峰,路元刚. 基于布里渊效应的连续分布式光纤传感技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(11): 14~20
- 3 Song Muping, Qiu Chao. Long-distance Brillouin optical time domain reflectometer with two-parameter sensing for standard single-mode optical fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 954~958
宋牟平,裘超. 普通单模光纤的长距离双参量传感布里渊光时域反射计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 954~958
- 4 Wang Jinbing, Lu Yuangang, Zhang Xuping *et al.*. Calibration of reference light power in Brillouin optical time domain reflectometer[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1456~1461
王金兵,路元刚,张旭苹等. 布里渊光时域反射仪中参考光的功

- 率校准[J]. 中国激光, 2010, **37**(6): 1456~1461
- 5 Liang Hao, Lu Yuangang, Li Cunlei *et al.*. Study on decoding method of correlation coded pulses based Brillouin optical time-domain reflectometric system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10): 1006002
梁浩, 路元刚, 李存磊等. 基于相关序列脉冲的布里渊光时域反射测量系统解码方法研究[J]. 光学学报, 2011, **31**(10): 1006002
- 6 K. Shimizu, T. Horiguchi, Y. Koyamada *et al.*. Coherent self-heterodyne Brillouin OTDR for measurement of Brillouin frequency shift distribution in optical fibers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(5): 730~736
- 7 H. Izumita, T. Sato, M. Tateda *et al.*. Brillouin OTDR employing optical frequency shift using side-band generation technique with high-speed LN phase-modulator [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(12): 1674~1676
- 8 Song Muping. The technique of Brillouin scattering-distributed optical fiber sensing based on microwave electrooptical modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1111~1114
宋牟平. 微波电光调制的布里渊散射分布式光纤传感技术[J]. 光学学报, 2004, **24**(8): 1111~1114
- 9 S. M. Maughan, H. H. Kee, T. P. Newson. 57-km single-ended spontaneous Brillouin-based distributed fiber temperature sensor using microwave coherent detection[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(6): 331~333
- 10 H. Ohno, H. Naruse, N. Yasue *et al.*. Development of highly stable BOTDR strain sensor employing microwave heterodyne detection and tunable electric oscillator [C]. *SPIE*, 2001, **4596**: 74~85
- 11 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics*[M]. Jia Dongfang, Yu Zhenhong *et al.*. Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010. 245~246
阿戈沃. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 贾东方, 余震虹等译. 北京: 电子工业出版社, 2010. 245~246
- 12 S. M. Maughan. *Distributed Fiber Sensing using Microwave Heterodyne Detection of Spontaneous Brillouin Backscatter*[D]. Southampton: University of Southampton, 2001. 78~80
- 13 T. Kurashima, T. Horiguchi, H. Izumita *et al.*. Brillouin optical-fiber time domain reflectometry [J]. *IEICE Trans. Commun.*, 1993, **E76-B**(4): 382~390
- 14 T. R. Parker, M. Farhadiroushan, V. A. Handerek *et al.*. Temperature and strain dependence of the power level and frequency for spontaneous Brillouin scattering in optical fibers [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(11): 787~789
- 15 Feng Wang, Cunlei Li, Xiaodong Zhao *et al.*. Using a Mach-Zehnder-interference-based passive configuration to eliminate the polarization noise in Brillouin optical time domain reflectometry [J]. *Appl. Opt.*, 2012, **51**(2): 176~180

栏目编辑: 马沂