

相干光时域反射计的光频扫描扩展检测

宋牟平^{**}, 吴嫒^{*}, 朱伟基, 庄守望, 王轶轩
浙江大学信息与电子工程学院, 浙江 杭州 310027

摘要 通过改变微波电光调制器的调制频率, 实现光频率扫描。利用光频移产生的后向瑞利散射光干涉图样的变化, 可得到传感温度变化信息。基于温度变化前后两次扫描频率曲线的互相关特性及其与温度变化量的对应关系, 提出了光频率扫描扩展方案。理论分析和实验结果表明, 该方案可有效提高系统的温度测量检测范围。实验中, 信噪比提升了 2.13 dB, 系统可检测的最小温度变化量约为 0.029 °C。

关键词 传感器; 分布式光纤传感; 相干光时域反射计; 温度传感; 光频扫描

中图分类号 TP212

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0410002

Optical Frequency Scanning Extension Detection of Coherent Optical Time Domain Reflectometry

Song Muping^{**}, Wu Ying^{*}, Zhu Weiji, Zhuang Shouwang, Wang Yixuan

College of Information Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

Abstract By changing the modulation frequency of the microwave electro-optic modulator, we achieve the optical frequency scanning. Using the variation of the interference pattern of the backward Rayleigh scattered light generated by the optical frequency shift, we can obtain the information of the sensing temperature change. Based on the cross-correlation properties of the two scanning frequency curves before and after the temperature change and their correspondence with the temperature variation, we propose an optical frequency scanning extension scheme. Theoretical analysis and experimental results show that the proposed scheme can effectively improve the temperature detection range of the system. In the experiment, the signal-to-noise ratio is improved by 2.13 dB, and the minimum detectable temperature change of the system is about 0.029 °C.

Key words sensors; distributed fiber optical sensing; coherent optical time-domain reflectometer; temperature sensing; optical frequency scanning

OCIS codes 060.2370; 290.5870; 060.2310

1 引 言

分布式光纤传感器^[1-3]可实现高分辨率的分布式温度监测, 具有较广阔的应用前景, 但需要合适的传感技术。分布式光纤温度传感有多种实现技术, 基于光纤非线性散射的拉曼分布式光纤温度传感器^[4-6]或布里渊分布式光纤温度传感器^[7-9], 可实现较稳定的温度定量传感, 但由于检测光信号微弱的限制, 温度分辨率较低, 难以达到 1 °C 以下。普通光时域反射计(OTDR)^[10-11]是基于较强的光纤线性瑞利散射, 可获得沿光纤传输的光损耗信息, 但普通 OTDR 系统的温度灵敏度低, 难以实现有效的温度

传感。采用窄线宽光源的相位敏感 OTDR (Φ -OTDR)^[12-16]进行检测, 其检测到的瑞利散射光功率信号随温度变化, 是关于温度的函数, 然而该函数为非线性函数, Φ -OTDR 系统难以对温度进行定量测量。为了将该系统应用于分布式温度传感领域, Pastor-Graells 等^[17]提出了一种基于直接检测 Φ -OTDR 的线性啁啾单脉冲发射方案, 系统结构简单, 但精确度不高且温度检测范围有限。采用快速连续频移扫描的光频域反射计(OFDR)^[18-19]可实现高空间分辨率的分布式光纤传感, 但由于采用的是频域信号处理检测光的幅度(不是相位)变化信息, 长距离高温分辨率传感难以实现。

收稿日期: 2018-11-21; 修回日期: 2018-12-13; 录用日期: 2019-01-22

* E-mail: m13023266624@163.com; ** E-mail: songmp@zje.edu.cn

基于光频移扫描的相干光时域反射计(COTDR)^[20-22]可实现高分辨率的长距离分布式温度定量传感,这是因为环境温度变化会导致传感光纤的后向瑞利散射干涉图样(相位变化信息)发生改变。当光频率以一定频率间隔,周期性地扫描时,根据光频率变化与温度变化分别对瑞利散射图样产生的影响,可以定量计算出传感温度变化。光频率扫描是直接影响 COTDR 系统的重要性能参数,温度检测的检测范围由光频率扫描范围决定。采用微波电光调制(EOM)可实现光频移精确变化,但扫频间隔增大会导致温度分辨率降低,扫频步数增多会导致扫频时间变长,尤其对于温度随时间非线性变化的检测环境,易出现测量误差。

基于 COTDR 系统中光频移与温度变化量之间的补偿关系,本文提出一种光频扫描扩展方案,在不影响温度检测分辨率和测量准确性的前提下,扩展光频率扫描范围,从而提升系统的温度检测范围。

对系统中后向瑞利散射光信号的模拟计算验证了该方案的有效性,并在实验中实现了采用该光频扫描扩展方案的 COTDR 系统,传感系统的测温范围和信噪比都得到了有效提高。

2 原 理

2.1 系统原理

COTDR 系统的工作原理图如图 1 所示。在 COTDR 系统中,激光器发射的光波的归一化电场可表述为

$$E_{\text{Laser}}(t) = \cos(\omega_c t), \quad (1)$$

式中: ω_c 为光波的角频率, t 为时间。微波信号发生器产生一系列单频正弦调制信号 $P_m \cos(\omega_m t)$,其中 P_m 为调制信号的强度, ω_m 为调制角频率。光频率移动是通过微波电光调制光波来实现,通过改变调制信号的调制角频率 ω_m (分别设为 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$, 其中 n 为扫描光频率的个数),实现该系统的光频率扫描。

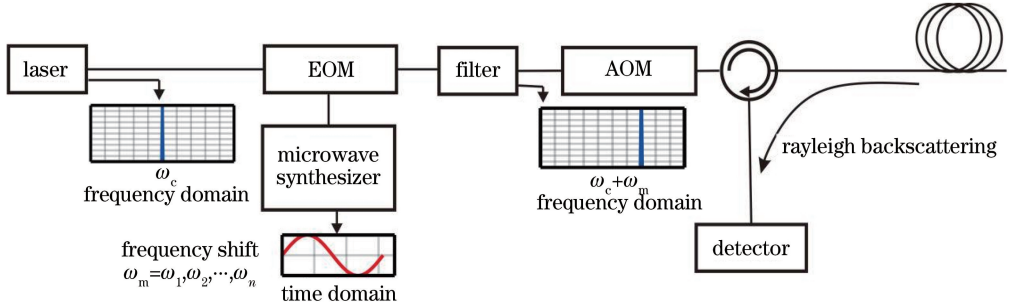


图 1 COTDR 系统的工作原理图

Fig. 1 Working principle diagram of COTDR system

频率调制后的光源再经脉冲声光调制器(AOM)进行脉冲调制,由此形成的窄线宽频移脉冲光进入待测光纤(FUT),假设半个脉宽内的散射点总数为 M ,在发射端检测到待测光纤中的后向瑞利散射光强度可表述为^[20]

$$P_{\text{pulse}}(z) = \sum_{a=1}^M \sum_{b=1}^M P_p \exp(-2\alpha z_a) \times P_p \exp(-2\alpha z_b) \cos\left[\frac{4\pi n_f \nu (z_a - z_b)}{c}\right], \quad (2)$$

式中: α 为单模光纤的衰减系数, P_p 为入射光脉冲强度, c 为光在真空中传播的速度, n_f 为光纤中的折射率, ν 为光源的频率, z_a 和 z_b 分别为第 a 和第 b 个散射点在光纤中的位置。 $P_{\text{pulse}}(z)$ 为关于光源频率 ν 、折射率 n_f 、散射点分布 z_a 和 z_b 的函数,而折射率 n_f 和散射点位置会随外界温度的变化而变

化。因此,可以通过分析光频率扫描的后向瑞利散射光强度来实现分布式温度定量检测,具体方案如下。

在 t_1 时刻,通过微波电光调制,间隔 Δf 逐步改变光源频率 ν 进行光频率扫描,并记录下检测到的 n 条不同光频率所对应的后向瑞利散射轨迹,记为 $P_{t_1}(z, \nu)$,如图 2(a) 所示。在 t_2 时刻,用同样的方法检测记录后向瑞利散射轨迹,记为 $P_{t_2}(z, \nu)$,如图 2(b) 所示。若在 t_1 至 t_2 时刻没有温度变化,那么 $P_{t_1}(z, \nu)$ 与 $P_{t_2}(z, \nu)$ 轨迹相似。如果发生温度变化, $P_{t_1}(z, \nu)$ 与 $P_{t_2}(z, \nu)$ 之间会存在差异,但存在一个光频率偏移量 $\Delta \nu$ 可以补偿温度变化,使得后向瑞利散射轨迹 $P_{t_1}(z, \nu)$ 与 $P_{t_2}(z, \nu + \Delta \nu)$ 相似。 $P_{t_1}(z, \nu)$ 和 $P_{t_2}(z, \nu)$ 的互相关函数 $R_{12}(z, f)$ 可表示为

$$R_{12}(z, f) = \frac{\sum_{i=1}^k [P_{t_1}(z, \nu_i) - \bar{P}_{t_1}(z)] [P_{t_2}(z, \nu_i + f) - \bar{P}_{t_2}(z)]}{\sqrt{\left\{ \sum_{i=1}^k [P_{t_1}(z, \nu_i) - \bar{P}_{t_1}(z)]^2 \right\} \left\{ \sum_{i=1}^k [P_{t_2}(z, \nu_i + f) - \bar{P}_{t_2}(z)]^2 \right\}}}, \quad (3)$$

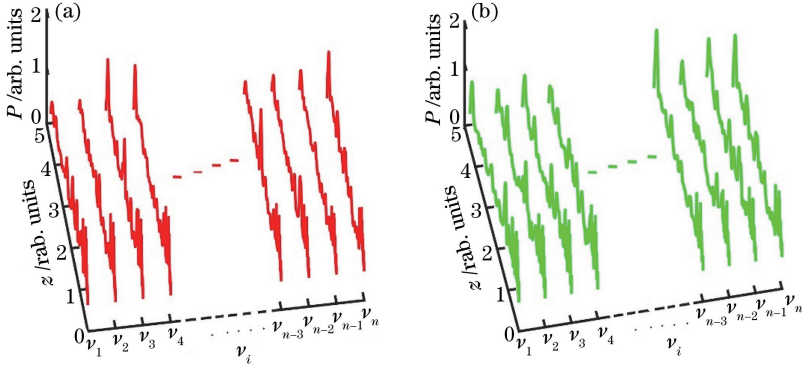


图2 不同时刻的检测信号。(a) t_1 时刻;(b) t_2 时刻

Fig. 2 Detection signal at different moments. (a) Time t_1 ; (b) time t_2

式中: k 为互相关计算中互相关窗口中包含的光频率个数; ν_i 为光频率扫描中的第*i*个光频率; $\max\{|f|\}$ 为互相关窗口最大滑动范围; $\bar{P}_{t_x}(z) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k P_{t_x}(z, \nu_i)$, $x=1, 2$ 。互相关函数峰值所对应的*f*即补偿温度变化的光频率偏移量 $\Delta\nu$ 。由(3)式可知,系统的温度分辨率由光频率扫描间隔 Δf 决定,温度检测范围由光频率扫频范围决定。

光频率偏移量 $\Delta\nu$ 与温度变化量 ΔT 呈线性关系^[20]:

$$\Delta\nu \approx -\nu(\rho_T + C_T)\Delta T, \quad (5)$$

$$\rho_T + C_T \approx 6.92 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}. \quad (6)$$

式中: ρ_T 为光纤材料的热膨胀系数, C_T 为光纤折射率的瑞利相关温度系数。

2.2 光频率扫描扩展方案

假设光频率扫描步数*n*为100,扫频间隔为 Δf ,温度在 t_1 时刻为 T_1 , t_2 时刻为 T_2 ,其中 $T_1 < T_2$ 。根据(5)式,利用光频率变化量 $\Delta\nu$ 与温度变化量 ΔT 之间的补偿关系,总能找到一个温度变化所对应的扫描频率步数间隔 $\Delta i \approx \frac{\nu(\rho_T + C_T)(T_1 - T_2)}{\Delta f}$,使得等式 $P_{t_1}(z, \nu_{i+\Delta i}) = P_{t_2}(z, \nu_i)$ 成立。该等式应当对任意光频率成立,由此可推测,对于超越扫频范围的光频率 $P_{t_1}(z, \nu_{i+\Delta i}) = P_{t_2}(z, \nu_j)$, ($i + \Delta i > 100, j < 100$)成立。图3(a)中虚线所示为依据 $P_{t_1}(z, \nu)$ 扩展得到的光频率。用同样的方法,可以扩展 $P_{t_2}(z, \nu)$ 的频率,如图3(b)虚线所示。

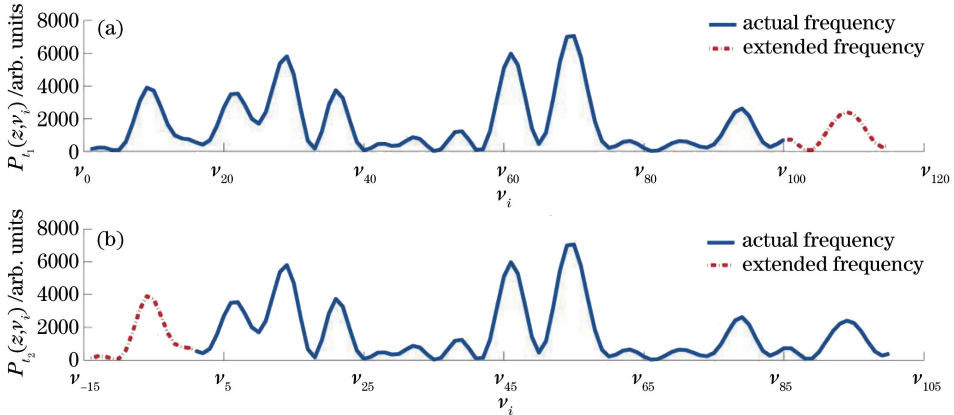


图3 不同时刻的光扫描频率扩展示意图。(a) t_1 时刻;(b) t_2 时刻

Fig. 3 Schematic of optical scanning frequency extension at different moments. (a) Time t_1 ; (b) time t_2

为验证该方案的有效性,根据(2)式,对COTDR系统进行模拟计算,假设光纤中散射点服

从均匀分布,周期性发射光频率扫描间隔 Δf 为3 MHz、宽度为200 ns的脉冲光,每个周期发射100

个不同光频率的脉冲光信号。 t_1 至 t_2 时刻,传感光纤温度变化量设为 $0.0679\text{ }^\circ\text{C}$ 。两次扫描周期中,接收端探测到的光功率信号强度 P 沿光频率轴的分布曲线图如图4(a)所示。依据上述光扫描频率扩展方案,可将 t_2 时刻的扫描频率范围扩展 30 MHz ,扩展后的曲线如图4(b)中实线所示。其他参数设置

与 t_2 时刻完全相同,将每个周期光频率扫描步数设为 110 ,得到一组如图4(b)虚线(十字)所示的原始数据,与光频率扩展后的曲线完全重合。光扫描频率扩展有效地扩展了光频率扫描范围,并且光频率扩展范围的宽度与温度偏移量的大小有关,温度偏移量越大,光扫描频率扩展得越多,如图4(c)所示。

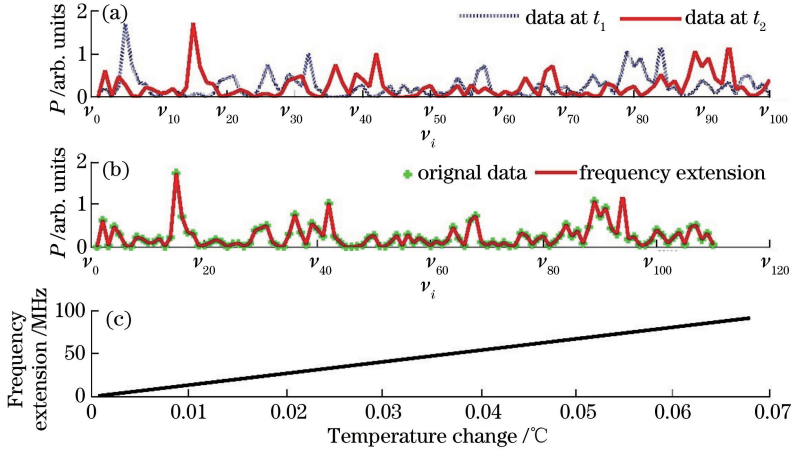


图4 频率扩展仿真图。(a)光功率信号强度分布曲线;(b)原始数据与光频率扩展数据对比;
(c)光频率扩展范围与温度变化量的关系曲线

Fig. 4 Optical frequency extension simulation. (a) Distribution curves of optical power signal intensity; (b) comparison of original data and optical frequency extension data; (c) range of optical frequency extension versus temperature change

3 实验与结果

实验系统如图5所示,激光器(RIO0195-3-02-1, RIO, 美国)发射线宽为 3 kHz 、波长为 1550 nm 的连续光,经电光调制器实现光频率调制。脉冲发生器驱动声光调制器(FCM-401E5C, IntraAction, 美国)将连续光调制成窄脉冲,脉冲宽度为 200 ns 。

由掺铒光纤放大器(EDFA, 23 dB)对光功率进行放大,再利用滤波器滤除 EDFA 自发受激辐射噪声。通过一个三端口耦合器,将脉冲光耦合进传感光纤。待测光纤中的后向瑞利散射光由光电探测器(BPD)接收并进行光电转换。采样率为 100 MSa/s 的数据采集卡(DAQ)采集并输出电信号,在电脑(PC)端进行数据处理与分析。

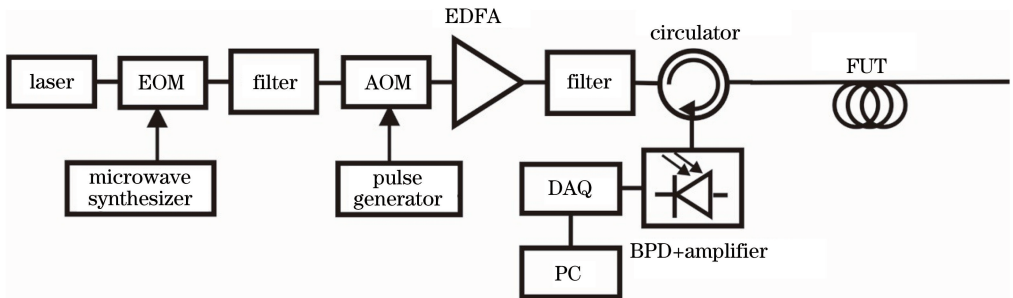


图5 COTDR 实验系统

Fig. 5 Experimental system of COTDR

实验中,在保温瓶中倒入 $70\text{ }^\circ\text{C}$ 的热水,令其自然冷却。将一段 150 m 长的光纤绕成环并作为待测光纤放入保温瓶中,其余光纤置于室温下。光频率扫描间隔为 5 MHz ,光频率扫描个数为 100 个,调频 100 次为一个周期,不断地进行光频率扫描。对温度变化前后的原始信号进行互相关运

算,实验结果即其互相关曲线 R_{original} 如图6(a)所示,置于保温瓶中的传感光纤($z \in [150\text{ m}, 300\text{ m}]$)无相关峰,这是因为补偿温度变化量所对应的光频率偏移量已超出光频率扫描范围,无法计算温度变化量。借助相邻周期的测量数据,经过光频率扩展处理后的互相关曲线 $R_{\text{extension}}$ 如

图 6(b)所示,在光频率偏移量为 155 MHz 处可看见清晰的相关峰,对应温度变化量为 0.1157 °C,温度变化被成功检测,较原温度检测范围,该方案的提升了 3.3%。温度检测范围扩展程度与相邻周期

温度变化量有关,相邻周期温度变化量越大,光频率扩展越多,温度检测范围扩展越明显。经实验验证,光频率扩展有效地提高了 COTDR 系统的温度检测范围。

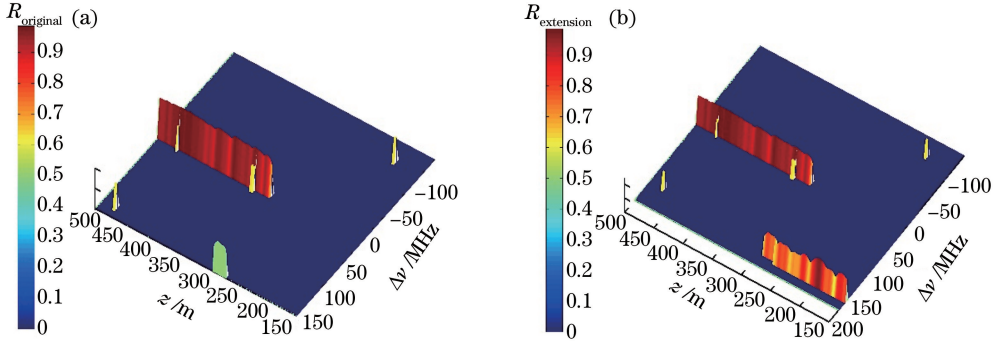


图 6 温度变化前后的互相关函数。(a)原始数据的互相关曲线;(b)光频率扩展后的互相关曲线

Fig. 6 Cross-correlation curves before and after temperature change. (a) Cross-correlation curve of original data; (b) cross-correlation curve after optical frequency extension

光频率扩展不仅可以扩展互相关运算时窗口的滑动范围(即检测范围),还可以扩展互相关窗口大小。光频率扫描范围固定,采用与之前一致的方案进行光扫描频率扩展,互相关窗口大小从 150 MHz 扩展到 185 MHz。图 7(a)和(b)分别是光频率扩展前后互相关运算的结果。经光频率扩展处理的信号

的信噪比为 6.45 dB,相比于原始信号提高了 2.13 dB。这里将信噪比定义为 $10\lg(A_m/A_n)$,其中 A_m 为信号相关峰的幅度值, A_n 为背景噪声的均方值。互相关窗口越大,其包含的信号光的特征信息越多,进行互相关计算时有利于减弱背景噪声的相关性,提高测量准确性。

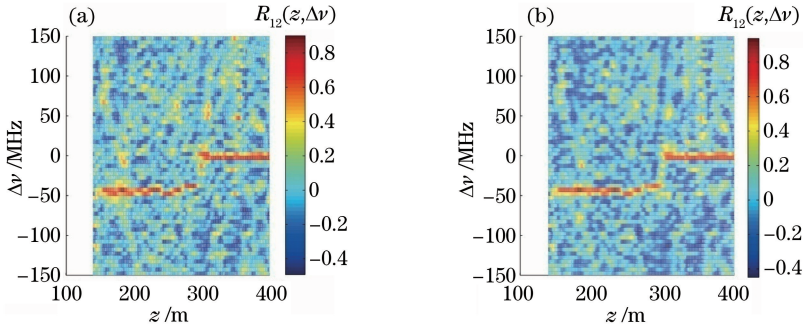


图 7 温度变化前后的互相关曲线。(a)原始数据的互相关曲线;(b)光频率扩展后的互相关曲线

Fig. 7 Cross-correlation curves before and after temperature change. (a) Cross-correlation curve of original data; (b) cross-correlation curve after optical frequency extension

利用该 COTDR 分布式光纤温度传感系统实现了长时间温度检测,检测结果如图 8 所示,可看出系统检测到的最小温度变化量约为 0.029 °C(图中正值表示温度上升,负值表示温度下降),这比一般的分布式温度传感器约高 1 个数量级。

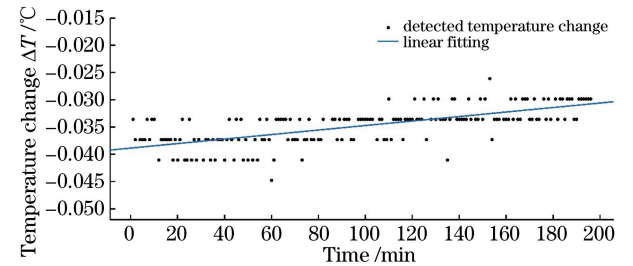


图 8 温度变化量随时间的变化

Fig. 8 Temperature change versus time

4 结 论

在实现 COTDR 分布式温度传感系统的基础上,提出了一种扩展 COTDR 系统温度监测范围的信号处理方法。利用温度变化前后两次扫描频率曲线的互相关特性与温度变化量的对应关系,实现了

光扫描频率扩展,突破了硬件设备对扫描频率的限制。仿真及实验论证了该方案的有效性,实验中,利

用该技术成功扩充了光扫描频率个数,分别通过扩展互相关窗口滑动范围和互相关窗口大小,有效提高了系统的温度检测范围,同时信噪比得到一定的提升。系统最小检测到的温度变化量约为 $0.029\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

参 考 文 献

- [1] Zhang Z X. The temperature effect of optical fiber back-scattering and the applied research for distributed optical fiber temperature sensor network [J]. Chinese Journal of Atomic and Molecular Physics, 2000, 17(3): 559-565.
张在宣. 光纤分子背向散射的温度效应及其在分布光纤温度传感网络上应用研究的进展[J]. 原子与分子物理学报, 2000, 17(3): 559-565.
- [2] Lu X, Soto M A, Thevenaz L. Impact of the fiber coating on the temperature response of distributed optical fiber sensors at cryogenic ranges[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(4): 961-967.
- [3] Iezzi V L, Loranger S, Kashyap R. High sensitivity distributed temperature fiber sensor using stimulated Brillouin scattering [J]. Optics Express, 2017, 25(26): 32591-32601.
- [4] Song M P, Bao C, Ye X F. Raman distributed optical fiber sensor with simplex coding optical external modulation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(6): 1462-1466.
宋牟平, 鲍翀, 叶险峰. 采用 Simplex 编码光外调制的拉曼散射分布式光纤传感器[J]. 中国激光, 2010, 37(6): 1462-1466.
- [5] Liu Y P, Ma L, Yang C, *et al.* Long-range Raman distributed temperature sensor with high spatial and temperature resolution using graded-index few-mode fiber [J]. Optics Express, 2018, 26(16): 20562-20571.
- [6] Zhang L, Feng X, Zhang W, *et al.* Improving spatial resolution in fiber Raman distributed temperature sensor by using deconvolution algorithm [J]. Chinese Optics Letters, 2009, 7(7): 560-563.
- [7] Song M P. 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.
- [8] Yang Z S, Soto M A, Chow D M, *et al.* Brillouin distributed optical fiber sensor based on a closed-loop configuration[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(5): 1239-1248.
- [9] Xu P B, Ba D X, He W M, *et al.* Distributed Brillouin optical fiber temperature and strain sensing at a high temperature up to $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ by using an annealed gold-coated fiber[J]. Optics Express, 2018, 26(23): 29724-29734.
- [10] Bethea C G, Levine B F, Cova S, *et al.* High-resolution and high-sensitivity optical-time-domain reflectometer[J]. Optics Letters, 1988, 13(3): 233-235.
- [11] Rourke M D. Measurement of the insertion loss of a single microbend [J]. Optics Letters, 1981, 6(9): 440-442.
- [12] Peng F, Wu H, Jia X H, *et al.* Ultra-long high-sensitivity Φ -OTDR for high spatial resolution intrusion detection of pipelines [J]. Optics Express, 2014, 22(11): 13804-13810.
- [13] Song M P, Zhu W J, Xia Q L, *et al.* 151-km single-end phase-sensitive optical time-domain reflectometer assisted by optical repeater[J]. Optical Engineering, 2018, 57(2): 027104.
- [14] Ye Q, Pan Z Q, Wang Z Y, *et al.* Progress of research and applications of phase-sensitive optical time domain reflectometry [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(6): 0600001.
叶青, 潘政清, 王照勇, 等. 相位敏感光时域反射仪研究和应用进展[J]. 中国激光, 2017, 44(6): 0600001.
- [15] Mei X W, Pang F F, Liu H H, *et al.* Fast coarse-fine locating method for φ -OTDR [J]. Optics Express, 2018, 26(3): 2659-2667.
- [16] Wang X, Liu M H, Yu M, *et al.* Analysis and improvement for digital quadrature demodulation algorithm on phase-sensitive optical time-domain reflectometric system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(12): 1210002.
王旭, 刘珉含, 于森, 等. 相位敏感光时域反射系统数字正交解调算法分析及改进研究[J]. 中国激光, 2017, 44(12): 1210002.
- [17] Pastor-Graells J, Martins H F, Garcia-Ruiz A, *et al.* Single-shot distributed temperature and strain tracking using direct detection phase-sensitive OTDR with chirped pulses [J]. Optics Express, 2016, 24(12): 13121-13133.
- [18] Du Y, Liu T G, Ding Z Y, *et al.* Cryogenic temperature measurement using rayleigh backscattering spectra shift by OFDR [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(11): 1150-1153.
- [19] Zhou D P, Qin Z G, Li W H, *et al.* Distributed vibration sensing with time-resolved optical frequency-domain reflectometry[J]. Optics Express, 2012, 20(12): 13138-13145.

- [20] Koyamada Y, Imahama M, Kubota K, *et al.* Fiber-optic distributed strain and temperature sensing with very high measurand resolution over long range using coherent OTDR [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(9): 1142-1146.
- [21] Feng K B, Song M P, Xia Q L, *et al.* High-resolution distributed optical-fiber sensing technology based on direct-detecting coherent optical time-domain reflectometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(1): 0106002.
- 冯凯滨, 宋牟平, 夏俏兰, 等. 基于直接检测相干光时域反射计的高分辨率分布式光纤传感技术[J]. *光学学报*, 2016, 36(1): 0106002.
- [22] Liehr S, Muanenda Y S, Münzenberger S, *et al.* Relative change measurement of physical quantities using dual-wavelength coherent OTDR [J]. *Optics Express*, 2017, 25(2): 720-729.