

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

冯凯滨 宋牟平 夏俏兰 陆 燕 尹 聪

浙江大学信息与电子工程学院, 浙江 杭州 310027

摘要 研究了基于瑞利散射的高性能定量检测分布式光纤传感技术。在相位敏感光时域反射计(Φ -OTDR)的基础上,用窄线宽激光器和微波电光调制实现对光频移的精确控制,构成直接检测相干光时域反射计(COTDR)传感系统。通过分析光频移产生的传感光纤瑞利散射光干涉图样的变化,得到了传感量(温度或应变)的定量信息。对直接检测COTDR传感系统进行了理论分析,并进行了COTDR工作过程和散射信号相关特性的仿真分析,验证了高分辨率分布式光纤传感原理。在此理论分析基础上,采用微波电光调制得到了可变光频移,组建了直接检测COTDR实验系统,实现了25 km分布式光纤温度传感实验,可测量到25 km光纤末端0.1 °C的温度变化。

关键词 传感器; 光纤传感; 分布式; 高分辨率; 光时域反射计

中图分类号 TP212 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0106002

High-Resolution Distributed Optical-Fiber Sensing Technology Based on Direct-Detecting Coherent Optical Time-Domain Reflectometer

Feng Kaibin Song Muping Xia Qiaolan Lu Yan Yin Cong

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

Abstract A high-performance quantitative detection distributed optical fiber sensing technology based on Rayleigh scattering is proposed and studied. Based on the phase-sensitive optical time-domain reflectometer (Φ -OTDR), a direct detection coherent optical time-domain reflectometer (COTDR) sensing system is set up, by combining the narrow-linewidth laser with microwave electro-optical modulation to obtain optical frequency-shift precisely. The sensing quantity (temperature or strain) can be obtained from the change of the Rayleigh scattering light interference pattern generated by the frequency shift of the light source. The sensing principle of the direct-detecting COTDR system is studied, with simulating and analyzing the COTDR sensing process and the correlation characteristics of the scattering signals. On the basis of theoretical analysis, the direct-detecting COTDR experimental system is built, and 25 km distributed optical fiber temperature sensing experiment is realized. The experiment results show that the COTDR experimental system can measure the temperature change of 0.1 °C at the end of the 25 km sensing fiber.

Key words sensors; fiber-optic sensing; distributed; high-resolution; optical time-domain reflectometer

OCIS codes 060.2300; 060.2370; 060.2630

1 引言

分布式光纤传感器(DOFS)^[1-5]可对被测量场的连续空间进行传感,已成为传感领域中一项引人注目的技术,并得到迅速发展。在一些应用场合,如地质、桥梁监测等方面,需要高分辨率定量检测分布式传感器。目前能实现对传感量(如温度或应变)进行定量检测的主要是拉曼散射^[2-3]和布里渊散射分布式光纤传感器,

收稿日期: 2015-07-23; 收到修改稿日期: 2015-08-26

作者简介: 冯凯滨(1990—),男,硕士研究生,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: 3090104137@zju.edu.cn

导师简介: 宋牟平(1971—),男,博士,副教授,主要从事光子器件、光纤通信/传感等方面的研究。

E-mail: songmp@zju.edu.cn(通信联系人)

其中布里渊散射分布式光纤传感技术^[4-9]由于其检测散射光功率比拉曼散射强,且布里渊频移与温度/应变存在线性关系,因而具有较好的性能,并得到了广泛关注。

但布里渊分布式光纤传感器的分辨率较差,布里渊频移分辨率约为 1MHz,对应 20 $\mu\epsilon$ 的应变变化或者 1 $^{\circ}\text{C}$ 的温度变化^[10-11]。而在相干光时域反射计(COTDR)系统中^[12-13],当光源波长为 1550 nm 时,134 MHz 的光频率变化对应的传感温度变化为 0.1 $^{\circ}\text{C}$ 。因此,COTDR 具有更高的理论传感精度,而且系统检测的是功率较大的瑞利散射光(与拉曼、布里渊散射相比),使得更易实现高分辨率分布式光纤传感。

对于相干检测光时域反射计(OTDR)^[14]和相位敏感 OTDR 传感系统^[15-18],一般用于检测光纤损耗或动态应变(振动),而 COTDR 通过判断干涉图样的频移变化^[12],可对温度/应变实现定量传感。2009 年,Koyamada 等^[12]利用相干检测 COTDR 技术实现了 8 km 光纤末端 0.1 $^{\circ}\text{C}$ 温度变化的测量。该实验采用 2 个恒温箱,温度设置为 25 $^{\circ}\text{C}$ 和 24.9 $^{\circ}\text{C}$,各采集 3 h 的数据,通过较长时间的测量,测得 0.1 $^{\circ}\text{C}$ 的温度变化。2010 年,该实验室在原有实验设备中加入双向掺铒光纤放大器(EDFA),在 31 km 的光纤末端实现了 0.1 $^{\circ}\text{C}$ 的温度测量^[13]。

由于相干检测对光偏振态控制的要求较高,偏振态难以精确控制,而偏振态不合适会影响相干检测 COTDR 干涉信号的相关性,会造成传感的失效。因此这里采用直接检测的 COTDR 系统来实现高分辨率分布式光纤传感。实验中加入了 EDFA 和拉曼光放大器,在光纤长度为 25 km 的条件下,得到了 0.1 $^{\circ}\text{C}$ 温度变化的实验结果。

2 传感原理

COTDR 传感原理如图 1 所示。将窄线宽频率可调光脉冲从光纤的一端注入,光探测器探测到的传感光纤后向瑞利散射信号是指数下降的不光滑曲线(与普通 OTDR 相比较),这是由于一个光脉冲内不同散射点之间的散射光相干叠加造成的^[19-20],从而形成随传感长度呈上下起伏的“干涉图样”。该图样取决于光纤状态,如折射率波动、光波长和环境因素等。

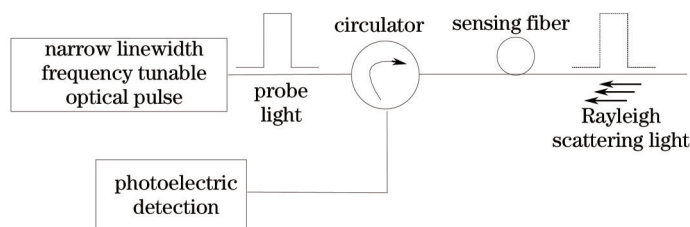


图 1 COTDR 传感原理

Fig.1 COTDR sensing principle

当传感光纤某区域内的温度或应变发生变化时,由于热膨胀或弹光效应,该区域内的光纤的折射率及密度将发生变化,从而导致该区域后向瑞利散射光相位的变化。多点瑞利散射光相位差的变化,又会引起检测到的瑞利散射干涉图样变化。因此,通过检测瑞利后向散射的干涉图样光强就可以分析得到光纤所处外界环境的信息。并且按照 OTDR 原理,利用入射脉冲光注入时间与入射端检测到瑞利散射光时间的的时间差就能够得到检测位置信息,从而实现分布式定量检测。

如图 2 所示,根据瑞利散射的一般机制,传感光纤存在一系列随机分布的离散点,可用入射光产生的

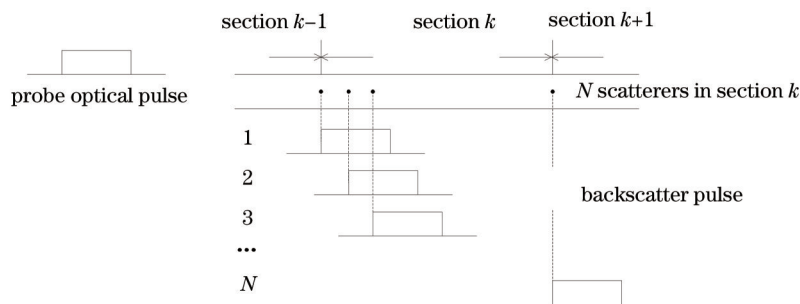


图 2 瑞利散射的离散模型

Fig.2 Discrete model of Rayleigh scattering

这些离散点来描述实际光纤中产生的后向瑞利散射。以光脉冲宽度时段内光在光纤中传播距离的一半为单位长度对光纤进行分段处理,以第 k 段为例进行分析。假设在第 k 段光纤中存在着 N 个散射点,从而在输入端接收到 N 个后向散射信号。

当光纤的一端注入脉宽为 W 的光脉冲时,在 $t_k = kW$ 时刻光纤输入端接收到的后向散射信号的光场可以表示为^[21]

$$E(t_k) = \sum_{i=1}^N a_i \exp[i2\pi v(t_k - \tau_i)], \quad (1)$$

式中 $E(t_k)$ 为 t_k 时刻第 k 段光纤中所有后向散射信号的幅度之和, N 为第 k 段光纤中散射点的总数, a_i 和 τ_i 分别为第 i 个后向散射信号的幅度和延时, v 为系统光源的频率。对于后向瑞利散射信号的光功率,其可以表示为

$$P(t_k) = |E(t_k)|^2 = \sum_{m=1}^M a_m \exp[i2\pi v(t_k - \tau_m)] \sum_{n=1}^N a_n \exp[-i2\pi v(t_k - \tau_n)] = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N a_m a_n \exp[i\pi v(\tau_n - \tau_m)]. \quad (2)$$

任意两个后向散射信号之间的时间差为

$$\tau_n - \tau_m = 2L_{nm} n_f / c, \quad (3)$$

式中 L_{nm} 是第 n 个散射点和第 m 个散射点之间的距离, n_f 为光纤的折射率, c 为光在真空中的传播速度。当传感光纤外部的温度或应变发生变化,光纤的折射率、长度和散射点之间的距离可能会发生改变,因而可以表示为

$$n_f(T, \varepsilon) = n_f(T_0, \varepsilon_0)(1 + c_\varepsilon \Delta\varepsilon + c_T \Delta T), \quad (4)$$

$$L_{nm}(T, \varepsilon) = L_{nm}(T_0, \varepsilon_0)(1 + \Delta\varepsilon + \rho_T \Delta T), \quad (5)$$

式中 $n_f(T, \varepsilon)$ 和 $n_f(T_0, \varepsilon_0)$ 分别为温度变化后和温度变化前的折射率, c_ε 为瑞利相关频移应变系数, c_T 为瑞利相关频移温度系数, $\Delta\varepsilon$ 为应变的变化量, ΔT 为温度的变化量; $L_{nm}(T, \varepsilon)$ 和 $L_{nm}(T_0, \varepsilon_0)$ 分别为温度变化后和温度变化前第 n 个散射点和第 m 个散射点之间的距离, ρ_T 为传感光纤的热膨胀系数。

温度或应变的变化导致时间差的变化,由(2)式可知,时间差的变化使得光功率也会发生改变。如果调节光源频率变化 $\Delta\nu$ 使光功率保持不变,即有

$$\nu_0 L_{nm}(T_0, \varepsilon_0) n_f(T_0, \varepsilon_0) / c = (\nu_0 + \Delta\nu) L_{nm}(T, \varepsilon) n_f(T, \varepsilon) / c, \quad (6)$$

将(4)式和(5)式代入(6)式,于是有

$$\Delta\nu \approx -\nu_0(1 + c_\varepsilon)\Delta\varepsilon - \nu_0(\rho_T + c_T)\Delta T, \quad (7)$$

其中, ν_0 为光源在初始温度和应变为 T_0 和 ε_0 时的频率。由(4)式和(5)式可知,温度或应变变化会引起散射点的距离 L_{nm} 或折射率 n_f 发生变化,用光源频率变化来补偿散射点距离 L_{nm} 的变化或折射率 n_f 的变化。瑞利散射频率不发生变化,变化的是光源的频率。

根据探测信号频移变化与温度/应变的近似线性关系,可进行温度/应变的分布式传感。对频移变化的检测,可通过对不同频率光的散射进行频域互相关运算获得。

3 仿真分析

假设在 a 时刻,测量整个光纤区域内的后向瑞利散射信号的强度及功率,得到该信号在频率-距离二维平面内的分布记为 $p_a(\nu, z)$,如图 3(a)所示,它是激光器频率 ν 和距离 z 的函数。同理,得到 b 时刻的后向散射功率谱 $p_b(\nu, z)$,如图 3(b)所示。如果在 a 和 b 时间段内光纤中没有温度和应变的变化,那么 $p_a(\nu, z)$ 和 $p_b(\nu, z)$ 应近似相等。另一方面,如果温度或者应变有变化,那么 $p_a(\nu, z)$ 将不再与 $p_b(\nu, z)$ 相等。与此同时, $p_a(\nu, z)$ 和 $p_b(\nu + \Delta\nu, z)$ 近似相等,其中 $\Delta\nu$ 是为了补偿应变或者温度的变化而产生的频率变化。这就意味着应变或者温度的改变引起了后向散射光功率 $p_b(\nu, z)$ 在光频率域的改变。根据以上分析, $p_a(\nu, z)$ 和 $p_b(\nu, z)$ 的归一化互相关值 $R_{ab}(f, z)$ 可以表示为

$$R_{ab}(f, z) = \frac{\sum_{i=1}^k [p_a(\nu_i, z) - \bar{p}_a(z)][p_b(\nu_i + f, z) - \bar{p}_b(z)]}{\left\{ \left[\sum_{i=1}^k (p_a(\nu_i, z) - \bar{p}_a(z))^2 \right] \left[\sum_{i=1}^k (p_b(\nu_i + f, z) - \bar{p}_b(z))^2 \right] \right\}^{0.5}}, \quad (8)$$

式中

$$\bar{p}_x(z) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k p_x(\nu_i, z), \quad x = a, b, \quad (9)$$

其中 k 是互相关的频率个数。由上述分析可知,如果在 a 和 b 时间段内温度或应变没有改变,那么 $R_{ab}(f, z)$ 在 $f=0$ 处取得最大值。另一方面,如果温度或者应变改变, $R_{ab}(f, z)$ 在 $f=\Delta\nu$ 处取得最大值。因此,可以得到每一个距离 z 上 $R_{ab}(f, z)$ 的峰值所对应的频率的改变量 $\Delta\nu$ 。用光源频率改变 $\Delta\nu$ 补偿应变的改变 $\Delta\varepsilon$ 或者温度的改变 ΔT , 根据文献[12], $\Delta\nu$ 与 $\Delta\varepsilon$ 、 $\Delta\nu$ 与 ΔT 的关系可以表示为

$$\frac{\Delta\nu}{\nu_0} \approx -0.78 \times \Delta\varepsilon, \quad (10)$$

$$\frac{\Delta\nu}{\nu_0} \approx -(6.92 \times 10^{-6}) \times \Delta T, \quad (11)$$

其中 ν_0 是激光器频率。应变或者温度改变量可以由激光器频率改变量 $\Delta\nu$ 得到。

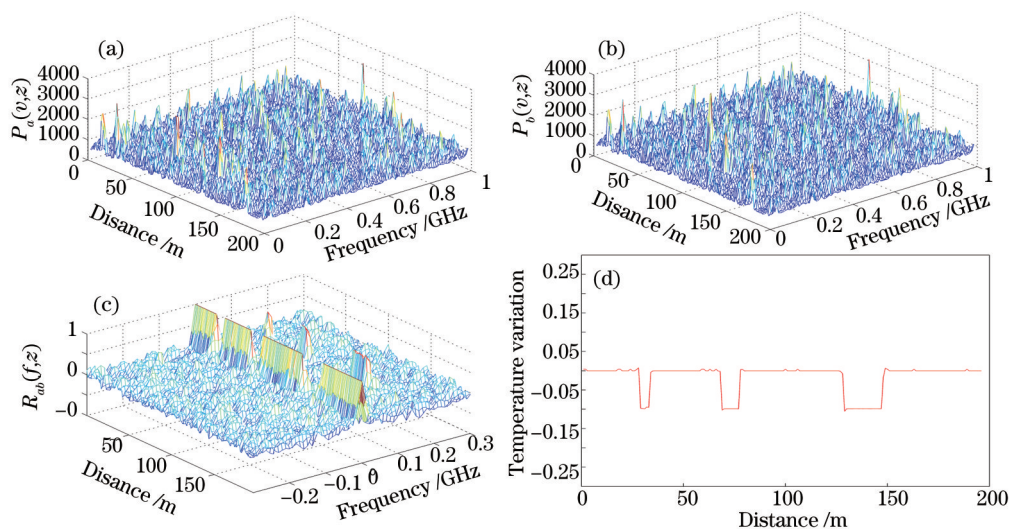


图3 仿真结果。(a) a 时刻 $P_a(v, z)$ 曲线; (b) b 时刻 $P_b(v, z)$ 曲线; (c) 互相关曲线; (d) 解调出的温度变化曲线

Fig.3 Simulation results. (a) $P_a(v, z)$ function profile at time a ; (b) $P_b(v, z)$ function profile at time b ; (c) cross-correlation curve; (d) temperature distribution curve

利用 Matlab 软件对上述过程进行仿真分析。仿真中,采用中心波长为 1550 nm 的窄线宽激光器作为系统光源,入射光脉冲宽度为 50 ns,频率步长为 10 MHz,频率步数为 100,共计得到 100 条 OTDR 曲线,所对应的频率范围是 0~0.99 GHz。数据采样周期为 10 ns(对应采样频率为 100 MHz)。

为了测量到 0.1 °C 温度变化对应的约 130 MHz 的频移,理论上采用的频率步进越小,解调的精度越高。但为了得到较好的频域互相关曲线,需综合考虑频率步进和扫频范围。日本的研究人员采用的频率间隔为 50 MHz,扫频范围为 2 GHz^[12-13]。综合考虑相关带宽,0.1 °C 的互相关频移以及 1 GHz 扫频范围,这里选择 10 MHz 作为扫频间隔,扫频步数为 100。

对 200 m 的距离进行模拟仿真,令 b 时刻 36~40 m、71~80 m、131~150 m 的光纤段上的温度比 a 时刻下降约 0.1 °C,可以得到的仿真结果如图 3 所示。

图 3(a)和(b)分别给出了 200 m 光纤上 a 时刻和 b 时刻的后向瑞利散射功率-距离-频移曲线。由于温度改变引起的 a 和 b 时刻后向散射功率的不同,很难直接从这两幅图中看出。图 3(c)给出了 a 和 b 时刻各 100 个频率的后向瑞利散射信号作互相关得到的曲线,在 36~40 m、71~80 m、131~150 m 光纤段上互相关的峰值所在频率约为 130 MHz,130 MHz 的频率变化补偿了这 3 段光纤上 0.1 °C 的温度下降。其余几段没有温度或应变改变,互相关峰值在 $f=0$ 处。图 3(d)给出了 200 m 光纤上的温度变化,在 36~40 m、71~80 m、131~150 m 三段光纤上, b 时刻和 a 时刻相比较温度下降了 0.1 °C。因此,分析两个时间瑞利散射光干涉信号的频移相关曲线,可以定量得到温度的变化量,从而可实现温度的定量检测。

4 实验研究

图 4 为直接检测 COTDR 的实验系统,用 1550 nm 窄线宽(<10 kHz)分布反馈激光器(DFB-LD)作为光源,

激光频率通过一个由微波信号源驱动的电光调制器(EOM1)改变光频移。电光调制器(EOM2)产生的 50 ns 脉宽的光脉冲经过掺铒光纤放大器进行放大,由偏振控制器(MPC)对偏振态进行扰偏以减小偏振噪声的影响,然后进入 25 km 传感光纤,传感光纤散射回来的后向瑞利散射光进入光电探测器(PD)进行光电转换,最终由数字采集卡(DAQ)采集并传输到计算机进行处理。由于 25 km 距离较长,末端信号比较微弱,因此在光纤前端加上光纤拉曼放大器(RFA)对信号进行放大。调制脉冲信号宽度为 50 ns,采集卡采样频率为 100 MHz,采样间隔约 1.05 m,并进行 4096 次硬件叠加。

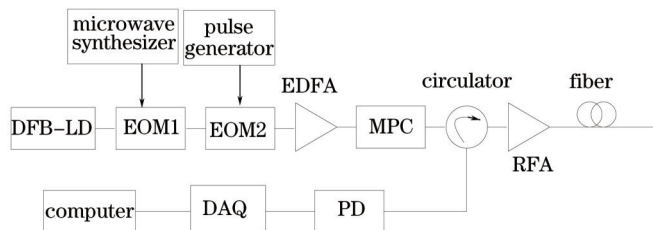


图4 实验装置图

Fig.4 Experimental setup

将实验中将传感光纤进行分段, A、B、C、D 对应长度依次 25.56、0.01、0.05、0.02 km, E 段为末端光纤,如图 5 所示。将 B、D 段光纤放入保温杯的热水中,在水冷却的过程中, B、D 两段光纤的温度随着水温下降而下降。设置微波信号源进行扫频,扫频间隔为 10 MHz,扫频步数为 100,扫频范围为 0.99 GHz。选取 2 个不同时刻 a 和 b ,将扫频的结果写入数组 $p_a(\nu, z)$ 和 $p_b(\nu, z)$ 中,用(8)式可以计算得出信号归一化互相关的结果。



图5 传感光纤分段示意图

Fig.5 Section of sensing optical fiber

图 6(a)和(b)分别给出了末端 200 m 光纤上 a 时刻和 b 时刻的后向瑞利散射功率-距离-频移曲线。图 6(c)给出了 a 、 b 两个时刻作互相关的结果。由图 6(c)可以看出,互相关的峰值分别在频率 0 和 130 MHz 处取得。A、C、E 段光纤的互相关峰值在 $f=0$ 处,此即表明 a 和 b 时间段内没有温度变化。而 B 和 D 两段光纤互相关峰值

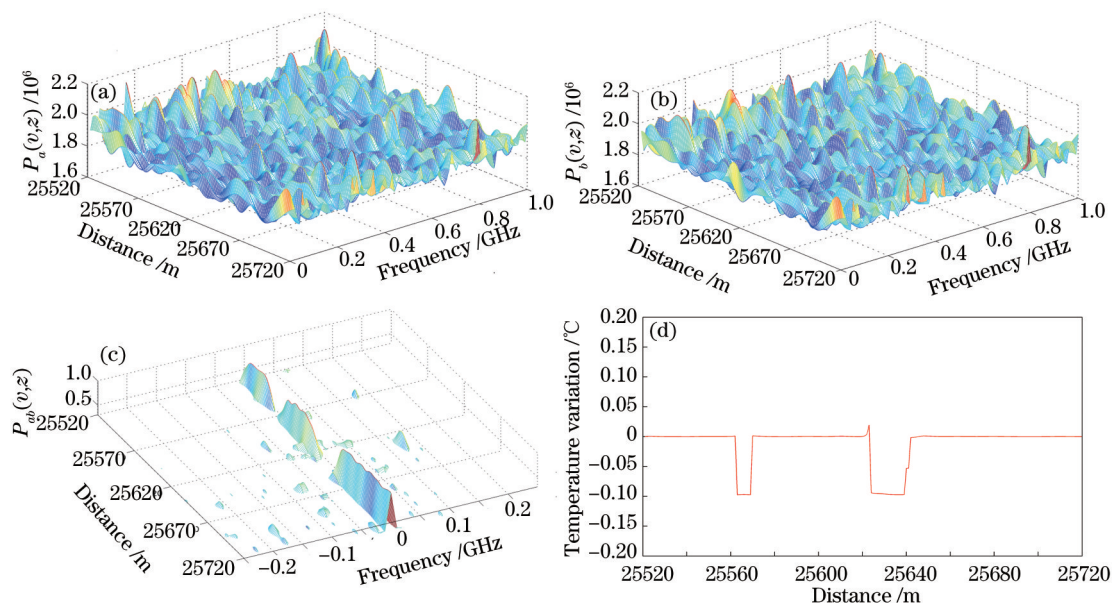


图6 实验结果。(a) a 时刻 $P_a(\nu, z)$ 曲线; (b) b 时刻 $P_b(\nu, z)$ 曲线; (c) 互相关曲线; (d) 解调出的温度变化曲线

Fig.6 Experimental results. (a) $P_a(\nu, z)$ function profile at time a ; (b) $P_b(\nu, z)$ function profile at time b ;

(c) cross-correlation curve; (d) temperature distribution curve

在 $f=130$ MHz处, 130 MHz频移补偿了由于热水温度下降而引起的B、D两段光纤温度的下降。由此解调出的温度变化如图6(d)所示, 从图中可以看出B、D两段温度下降约为 0.1 °C, 对应的互相关频移达到130 MHz。

5 结 论

基于后向瑞利散射的高性能分布式光纤传感技术, 对直接检测COTDR进行理论和实验研究, 研究结果表明直接检测COTDR具有超过普通分布式光纤传感器的定量高分辨率。采用微波电光调制产生精确光频移, 加入EDFA和拉曼放大, 实现了25 km的直接检测COTDR分布式光纤传感器实验系统, 可检测到 0.1 °C的温度变化。

参 考 文 献

- 1 Abhisek Ukil, Hubert Braendle, Peter Krippner. Distributed temperature sensing: Review of technology and applications[J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(5): 885–892.
- 2 Zhang Zaixuan, Wang Jianfeng, Liu Honglin, *et al.*. Experimental research of 30 km long distance distributed optical fiber Raman temperature sensor system[J]. Chinese J Lasers, 2004, 31(5): 613–616.
张在宣, 王剑锋, 刘红林, 等. 30 km 远程分布光纤拉曼温度传感器系统的实验研究[J]. 中国激光, 2004, 31(5): 613–616.
- 3 Liu Jiansheng, Li Zheng. Physical essentials and design consideration of temperature calibration for distributed optic fiber Raman temperature sensing system[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(10): 1168–1171.
刘建胜, 李 铮. 光纤拉曼测温系统的温度标定及设计考虑[J]. 光学学报, 2003, 23(10): 1168–1171.
- 4 Song Muping, Ma Zhigang. Optical signal processing in Brillouin optical time domain reflector based Morlet wavelet transform[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(5): 819–823.
宋牟平, 马志刚. 基于经典小波变换的布里渊光时域反射计光信号处理[J]. 光学学报, 2007, 27(5): 819–823.
- 5 Song Muping, Li Zhicheng, Qiu Chao. A 50 km distributed optical fiber sensor based on Brillouin optical time-domain analyzer[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(6): 1426–1429.
宋牟平, 励志成, 裘 超. 50 km 长距离布里渊光时域分析分布式光纤传感器[J]. 中国激光, 2010, 37(6): 1426–1429.
- 6 Bi Weihong, Yang Xipeng, Li Jingyang, *et al.*. Forward and backward Raman amplification of Brillouin scattering signal in Brillouin optical time domain reflectometer system[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(12): 1205007
毕卫红, 杨希鹏, 李敬阳, 等. 布里渊光时域反射系统中布里渊散射信号的前向和后向拉曼放大研究[J]. 中国激光, 2014, 41(12): 1205007.
- 7 Li Yongqian, Li Xiaojuan, An Qi. New method to improve the performance of Brillouin optical time domain reflectometer system[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0106003.
李永倩, 李晓娟, 安 琪. 提高布里渊光时域反射系统传感性能的方法[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0106003.
- 8 M A Soto, X A Vinuesa, S M Lopez, *et al.*. Extending the real remoteness of long-range Brillouin optical time-domain fiber analyzers [J]. J Lightwave Technol, 2014, 32(1): 152–162.
- 9 Y Muanenda, M Taki, F D Pasquale. Long-range accelerated BOTDA sensor using adaptive linear prediction and cyclic coding[J]. Opt Lett, 2014, 39(18): 5411–5414.
- 10 H Izumita, T Sato, M Tateda, *et al.*. Brillouin OTD remploying optical frequency shifter using side-band generation technique with high-speed LN phase-modulator[J]. IEEE Photon Technol Lett, 1996, 8(12): 1674–1676.
- 11 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.
- 12 Y Koyamada, M Imahama, K Kubota, *et al.*. Fiber-optic distributed strain and temperature sensing with very high measurand resolution over long range using coherent OTDR[J]. J Lightwave Technol, 2009, 27(9): 1142–1146.
- 13 R Shimano, Y Iitsuka, K Kubota, *et al.*. 31 km distributed temperature measurement with very high resolution using coherent-OTDR enhanced with bidirectional EDFA[C]. OECC, 2010: 330–331.
- 14 O Gautheron, J B Leroy, P Marmier. COTDR performance optimization for amplified transmission systems[J]. IEEE Photon Technol Lett, 1997, 9(7): 1041–1043.
- 15 Xiang Zhong, Chunxi Zhang, Lijing Li, *et al.*. Influences of laser source on phase-sensitivity optical time-domain reflectometer-based distributed intrusion sensor[J]. Appl Opt, 2014, 53(21): 4645–4650.

- 16 Xiaonan Hui, Taihang Ye, Shilie Zheng, *et al.*. Space-frequency analysis with parallel computing in a phase-sensitive optical time-domain reflectometer distributed sensor[J]. *Appl Opt*, 2014, 53(28): 6586-6590.
- 17 Zhou Jun, Pan Zhengqing, Ye Qing, *et al.*. Phase demodulation technology using a multi-frequency source for discrimination of interference-fading induced false alarms in a Φ -OTDR system[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(9): 0905003.
周 俊, 潘政清, 叶 青, 等. 基于多频率综合鉴别 Φ -OTDR 系统中干涉衰落假信号的相位解调技术[J]. *中国激光*, 2013, 40(9): 0905003.
- 18 Li Qin, Zhang Chunxi, Li Lijing, *et al.*. Influences of the frequency drift of the laser on location precision of the phase-sensitive optical time-domain reflectometry[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(3): 0305003.
李 勤, 张春熹, 李立京, 等. 激光器频率漂移对相位敏感光时域反射计扰动定位精度的影响[J]. *中国激光*, 2014, 41(3): 0305003.
- 19 Ren Meizhen, Xu Tuanwei, Zhang Faxiang, *et al.*. Statistical properties of Rayleigh backscattered light in single-mode fibers caused by a highly coherent laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(1): 0105001.
任梅珍, 徐团伟, 张发祥, 等. 单模光纤中高相干光源的瑞利散射光的统计特性[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0105001.
- 20 Lü Yuelan, Xing Yongwei. Investigation on Rayleigh scattering waveform in phase optical time domain reflectometer[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 31(8): 0819001.
吕月兰, 行永伟. 相位光时域反射计瑞利散射波形特性研究[J]. *中国激光*, 2011, 31(8): 0819001.
- 21 Zhi Yang, Shi Pengxiang, Li Yongqian. Research on COTDR for measuring distributed temperature and strain[J]. *Mechanic Automation and Control Engineering*, 2011: 590-593.

栏目编辑: 王晓琰