

弯曲损耗对分布式光纤拉曼测温解调的影响

申文博¹, 张东生^{2*}¹武汉理工大学机械工程学院, 湖北 武汉 430070;²武汉理工大学光纤传感技术国家工程实验室, 湖北 武汉 430070

摘要 研究了弯曲损耗对分布式光纤拉曼测温解调的影响, 从理论上分析了单路解调算法和双路解调算法的解调原理, 并通过实验验证了两种解调算法对存在多处弯曲损耗光纤的温度解调可行性。实验结果表明, 两种解调算法均可适用于已发生弯曲损耗光纤的温度解调, 但对于发生弯曲损耗位置附近的光纤, 单路解调算法的准确度和波动性优于双路解调算法。

关键词 光纤光学; 分布式光纤测温系统; 温度解调算法; 光纤损耗

中图分类号 O434.12 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220460

Influence of Bending Loss to Demodulation on Distributed Fiber Raman Temperature Measurement

Shen Wenbo¹, Zhang Dongsheng^{2*}¹School of Mechanical Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China;²National Engineering Laboratory for Fiber Optic Sensing Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China

Abstract The influence of bending loss on distributed fiber Raman temperature measurement demodulation is studied, the demodulation concept of the single-channel and dual-channel demodulation algorithms is theoretically investigated, and tests are used to confirm the viability of the two demodulation algorithms for temperature demodulation of multibend loss fibers. The experimental results suggest that the temperature demodulation of the fiber with bending loss may be achieved using the two demodulation algorithms. However, the single-channel demodulation algorithm's accuracy and volatility are superior to the two-channel demodulation algorithm for the fiber close to the point of bending loss.

Key words fiber optics; distributed temperature sensor; temperature demodulation algorithm; fiber loss

1 引言

分布式光纤拉曼测温系统(RDTS)是一种以光信号为载体, 利用光在光纤中传输时的背向拉曼散射实现测温的传感技术。相比传统测温方法, 该技术不仅能够实现长距离温度监测, 还具有抗电磁干扰、结构紧凑、易于铺设等优点。目前, RDTS在电力、石油、土木、航空等领域有着广泛应用。

拉曼散射光包含反斯托克斯光和斯托克斯光: 反斯托克斯光波长小于入射光, 光强对温度敏感; 斯托克斯光波长大于入射光, 光强对温度不敏感^[1]。传统的单通道解调算法通过光时域反射技术采集传感光纤不同位置的反斯托克斯光强度解调温度, 而双通道解调

算法则通过反斯托克斯光强和斯托克斯光强的比值解调温度。这两种算法对温度的解调都依赖于拉曼散射光的强度, 影响光强大小的因素除了温度还有光纤损耗, 因此, 消除光纤损耗对温度解调的影响至关重要。理想状态下, 拉曼散射光在光纤中的损耗是均匀的, 但当光纤发生弯曲损耗时, 在该位置将产生阶跃状损耗^[2]。实际工程中, 铺设光纤时不可避免地会发生弯曲损耗, 且发生弯曲损耗的位置具有随机性, 忽略弯曲损耗的影响时解调的温度存在较大误差^[3]。近年来, 众多学者就弯曲损耗对温度解调的影响进行了大量研究。如: Wang等^[4]基于双路解调算法利用“折叠”光纤将不同位置的光纤放置在相同的温度环境, 消除了弯曲损耗对测温的影响, 理论分析和实验结果表明, 该解

收稿日期: 2022-01-06; 修回日期: 2022-03-02; 录用日期: 2022-03-17; 网络首发日期: 2022-03-27

通信作者: *zhangdsem@qq.com

调算法能消除弯曲损耗的影响,但会使传感距离减半;Hwang等^[5]基于单路解调算法提出了在光纤远端放置反射镜的方法,通过反射回的反斯托克斯光消除了弯曲损耗对测温的影响,该系统结构简单,但由于反射的信号不仅只包含反斯托克斯光,信号处理过程还较繁琐;Fernandez等^[6-7]提出了一种双光源回路系统,通过在光纤的两端同时采集反斯托克斯光并取算术平均值克服弯曲损耗的影响,该方法在核领域等恶劣环境得到了较好应用,但系统结构复杂,一定程度上限制了其应用范围;Hausner等^[8]基于双路解调算法提出了一种通过对数据的比较识别弯曲损耗的方法,当发生弯曲损耗处前后两段光纤温度相同且损耗系数不变时,可通过移动损耗后端温度曲线来实现温度校正;Saxena等^[9]基于双路解调算法提出了一种利用经验模态的算法,可实现对弯曲损耗的实时定位,并通过在弯曲损耗后的光纤处设置新的参考光纤修正了测温误差。

本文对已发生弯曲损耗的光纤温度解调进行研究。实验表明,在损耗可测的情况下,单路解调算法和双路解调算法均可对已发生弯曲损耗的光纤的温度正确解调。该结论可为实际工程中解调已发生弯曲损耗光纤温度做理论依据。

2 温度解调原理

2.1 单路解调算法

脉冲光在光纤中传播时,产生的斯托克斯光与反斯托克斯光功率^[3]可分别表示为

$$P_s(T) = P_0 K_s S_b \nu_s^4 \left[1 + \frac{1}{\exp(h\Delta\nu/kT) - 1} \right] \cdot \exp[-(\alpha_0 + \alpha_s)L], \quad (1)$$

$$P_a(T) = P_0 K_a S_b \nu_a^4 \frac{1}{\exp(h\Delta\nu/kT) - 1} \cdot \exp[-(\alpha_0 + \alpha_a)L], \quad (2)$$

式中: $P_s(T)$ 和 $P_a(T)$ 为斯托克斯和反斯托克斯光功率; P_0 为入射光功率; K_s 和 K_a 分别为斯托克斯光散射截面与反斯托克斯光散射相关系数; S_b 为光纤背向散射系数; α_0 、 α_s 、 α_a 分别为入射光斯托克斯散射光、反斯托克斯散射光在光纤中传播时的损耗系数; L 为光纤长度; $h = 1.32 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ 为普朗克常数; $\Delta\nu = 1.32 \times 10^{13} \text{ Hz}$ 为光纤分子的拉曼声子频率; $k = 1.380 \times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$ 为玻尔兹曼常数; T 为热力学温度。

单路解调算法将整段光纤置于温度 T_0 ,则 $P_a(T_0)$ 可表示为

$$P_a(T_0) = P_0 K_a S_b \nu_a^4 \frac{1}{\exp(h\Delta\nu/kT_0) - 1} \cdot \exp[-(\alpha_0 + \alpha_a)L], \quad (3)$$

式(2)与式(3)的比值可表示为

$$\frac{P_a(T)}{P_a(T_0)} = \frac{\exp(h\Delta\nu/kT_0) - 1}{\exp(h\Delta\nu/kT) - 1}, \quad (4)$$

化简式(4)后得到的温度解调公式,表示为

$$T = \left\{ \frac{k}{h\Delta\nu} \ln \left[\frac{P_a(T_0)}{P_a(T)} [\exp(h\Delta\nu/kT_0) - 1] + 1 \right] \right\}^{-1}. \quad (5)$$

从式(5)可以发现,光纤的损耗项通过对全段光纤在参考温度的标定的方式被消除,损耗并不会影响温度的解调。对于已发生弯曲损耗的光纤,损耗发生了突变,这导致式(2)、式(3)中的损耗项无法描述该情况,但只要损耗稳定,理论上依然能通过比值的方式将损耗项的影响消除,因此理论上式(5)适用于已发生弯曲损耗的光纤解调。

2.2 双路解调算法

定义 $F(T)$ 为反斯托克斯与斯托克斯光功率的比值,由式(1)、式(2)得到

$$F(T) = \frac{P_a(T)}{P_s(T)} = (K_a \nu_a^4 / K_s \nu_s^4) \cdot \exp(-h\Delta\nu/kT) \exp[-(\alpha_a - \alpha_s)L], \quad (6)$$

双路解调算法将整段光纤置于温度 T_0 ,则 $F(T_0)$ 可表示为

$$F(T_0) = \frac{P_a(T_0)}{P_s(T_0)} = (K_a \nu_a^4 / K_s \nu_s^4) \cdot \exp(-h\Delta\nu/kT_0) \exp[-(\alpha_a - \alpha_s)L], \quad (7)$$

式(6)和式(7)的比值可表示为

$$\frac{F(T)}{F(T_0)} = \frac{\exp(-h\Delta\nu/kT)}{\exp(-h\Delta\nu/kT_0)}, \quad (8)$$

化简式(8)得到温度解调公式,表示为

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} - \frac{k}{h\Delta\nu} \left[\ln \frac{F(T)}{F(T_0)} \right]. \quad (9)$$

从式(9)可以发现,与单路解调算法类似,损耗并不会影响温度的解调。对于已发生了弯曲损耗的光纤,该方法在理论上依然能够适用。

3 实验验证与分析

为了验证两种算法对已发生弯曲损耗光纤进行温度解调的可行性,实验原理结构如图1所示。其中,RDTS硬件系统由脉冲激光器、波分复用器(WDM)、光电探测器(APD)、数据采集卡(DAC)、计算机、传感光纤组成。其中:脉冲激光器输出峰值功率为100 W;中心波长为1550 nm;脉宽范围为5~1000 ns;波分复用器工作波长为1450、1550、1650 nm;光电探测器带宽为50 MHz;数据采集卡为四通道同步采集,累加次数达4096次。系统的具体工作流程如下:计算机通过驱动软件控制脉冲激光器以一定的频率发出脉冲光,同时脉冲激光器向采集卡发送触发信号,使采集卡能够同步进行数据采集。脉冲光通过波分复用器中的耦合器进入光中传播,产生的背向散射光通过双向耦合

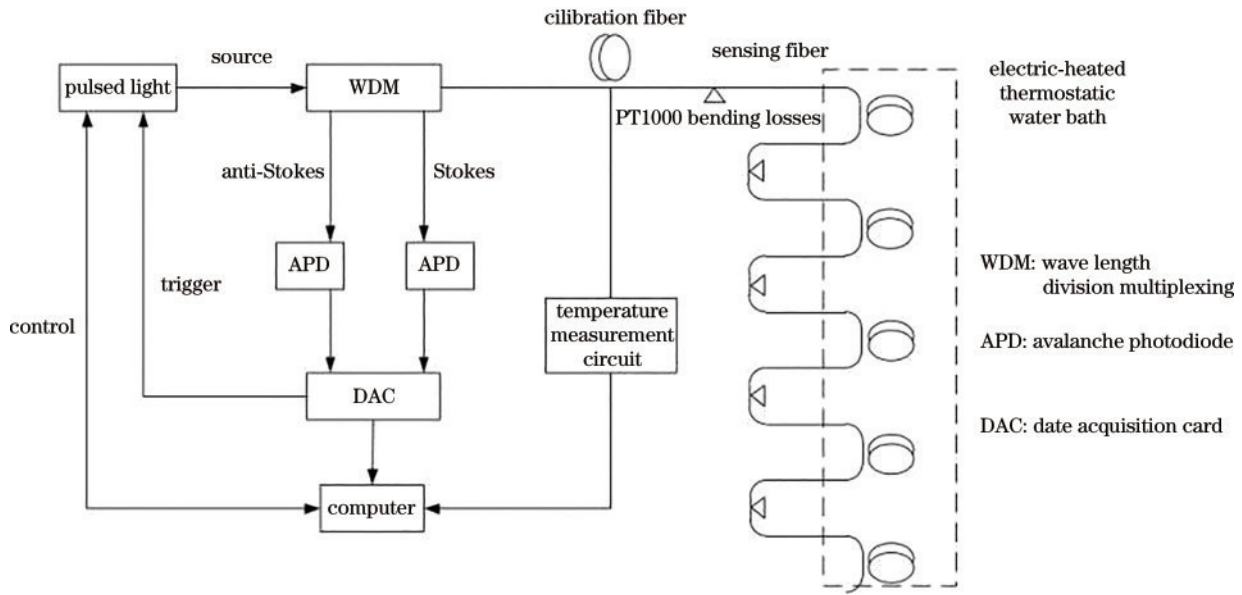


图 1 RDTS 的实验原理

Fig. 1 Experimental principle of the RDTS

器进入波分复用器。背向散射光由多种不同波长的光组成,波分复用器只允许通过斯托克斯光、反斯托克斯光分两路输出给双通道光电转换器,将拉曼散射光信号转换为电信号并将信号放大,数据采集卡将采集到的信号传送给计算机进行数据处理,进而通过解调算法可还原出整段光纤的温度分布情况。其中该实验设定的泵浦激光功率为 120 mA,数据采集空间分辨率为 0.5 m。

实验采用的传感光纤由五段不同长度和品牌的单模光纤熔接而成,总长度约 580 m。同时在每段熔接光纤之间设置稳定的弯曲损耗,弯曲半径约为 2 cm。图 2 为在室温 24 °C 时传感光纤反斯托克斯信号、斯托克斯信号电压分布。可以发现,由于熔接、弯曲损耗等因素光纤损耗呈阶跃状,从损耗差异较大的五段中分别挑选 5 m 长的光纤,缠绕成直径约 10 cm 的光纤环放入水浴控温装置。在每个光纤环中选择一个适当位置作为测温研究点,记为测温点 A(337 m)、B(392 m)、C(422 m)、D(442 m)、E(550 m)点,由 A 点至 E 点位置

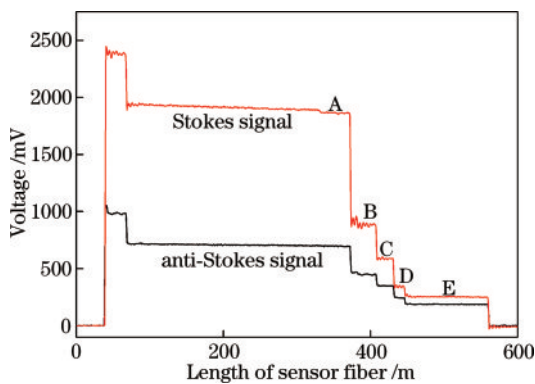


图 2 传感光纤斯托克斯、反斯托克斯信号的电压分布

Fig. 2 Voltage distribution of Stokes and anti-Stokes signals of sensing fiber

反斯托克斯波长段传输损耗分别为 1.51 dB、3.38 dB、4.51 dB、5.86 dB、7.18 dB。将水浴控温装置分别设置为 40、50、60、70、80 °C,在每个温度稳定的状态实时记录五个测温点反斯托克斯和斯托克斯信号电压值数据约 8 min,采样时间间隔为 0.5 s。

将不同温度下采集的斯托克斯、反斯托克斯信号数据分别代入式(5)和式(9)中,得到单通道温度解调结果如图 3 所示,双通道解调结果如图 4 所示。可以发现,两种算法均能解调已发生弯曲损耗光纤上的五个研究点在每个温度梯度下解调的温度随时间的变化。

为了进一步研究两种算法解调温度的准确度和波动性,计算采集时间间隔内的解调平均误差和标准差。实验采用水浴控温装置提供的温度环境实际上也存在误差,但依然可将其作为计算的标准。表 1 为两种算法的温度解调误差。可以发现,40 °C 时两种解调算法的解调误差较小,80 °C 时的误差较大。原因是定标温度为 40 °C,理论上温度与定标温度的温差越大,测温误差越大,但两种解调算法都可以通过进一步校正定标数据和校核解调公式提高测温准确度。对比两种解调算法解调结果发现,单路解调算法的测量误差小于双路解调算法。原因是双路解调算法利用反斯托克斯信号和斯托克斯信号在光纤相同位置的损耗一致性,对于有弯曲损耗的光纤,两种光波长会导致弯曲损耗处两种信号的损耗不一致,且点 B 到 E 距离弯曲损耗位置较近,光纤损耗的差异也较大。此外,实验环境相对稳定,单路解调受到外界扰动的影响较小,这表明单路解调算法的准确度高于双路解调算法。

表 2 为两种算法的温度解调标准差。标准差可衡量解调算法的温度解调波动性,标准差越小,表明波动性越小。可以发现,两种算法的温度解调的波动性受

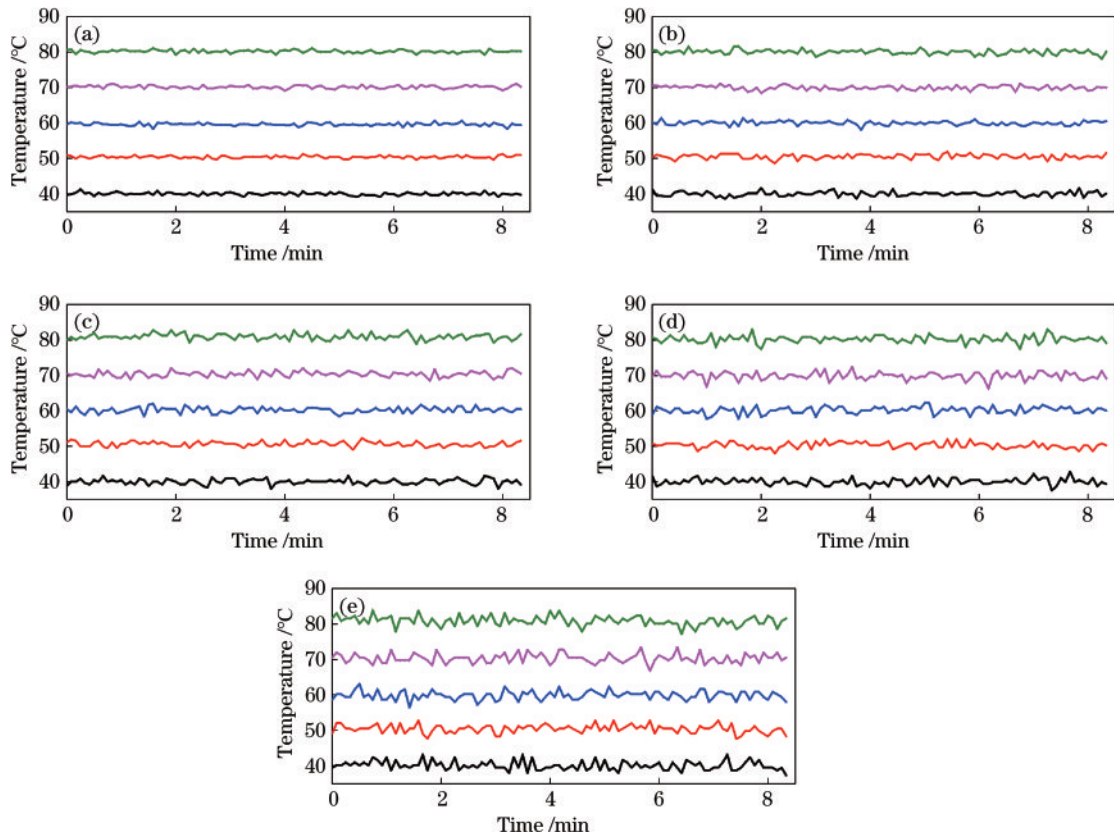


图 3 单通道算法的温度解调结果。(a)A点;(b)B点;(c)C点;(d)D点;(e)E点

Fig. 3 Temperature demodulation results of the single-channel algorithm. (a) Point A; (b) point B; (c) point C; (d) point D; (e) point E

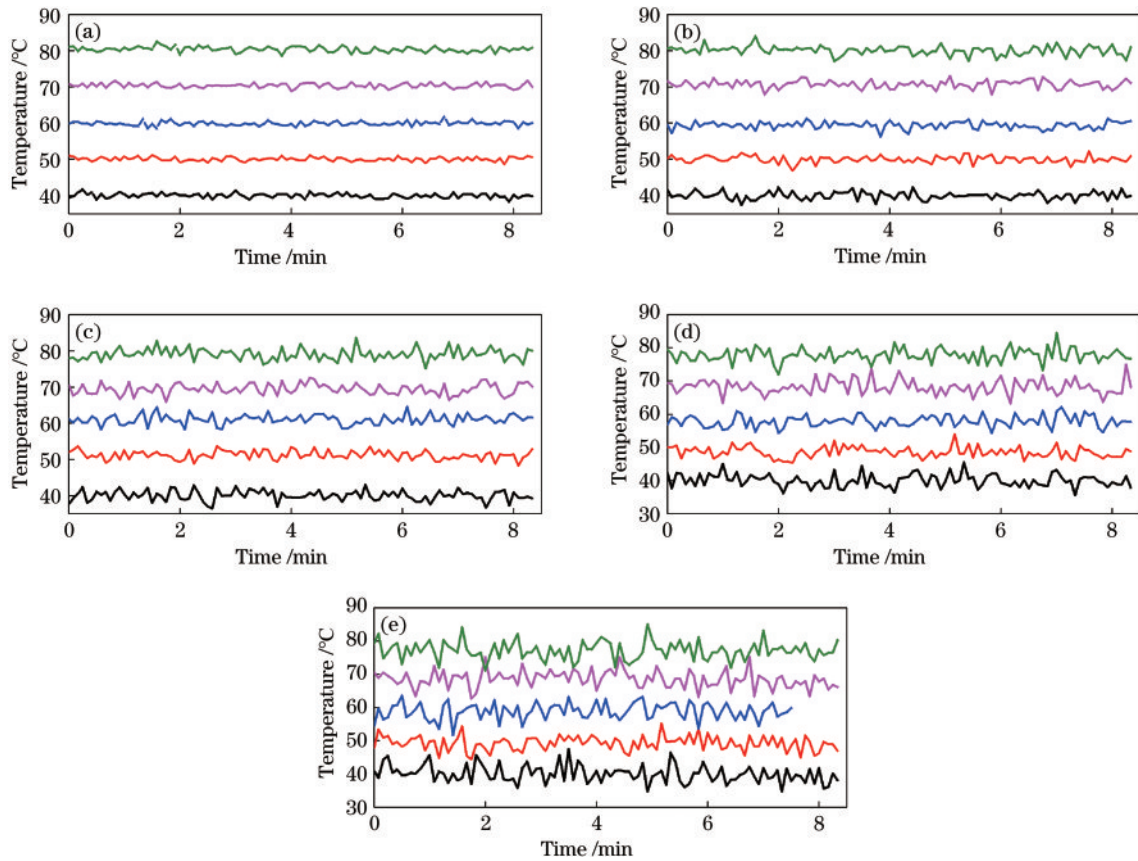


图 4 双通道算法的温度解调结果。(a)A点;(b)B点;(c)C点;(d)D点;(e)E点

Fig. 4 Temperature demodulation results of the dual-channel algorithm. (a) Point A; (b) point B; (c) point C; (d) point D; (e) point E

表 1 两种算法的温度解调误差

Table 1 Temperature demodulation error of two algorithms

Temperature / $^{\circ}\text{C}$	Single channel					Dual channel				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	0.01	0.02	0.03
50	0.39	0.52	0.65	0.33	0.42	0.08	0.00	1.23	1.42	0.78
60	0.41	0.04	0.24	0.17	0.14	0.11	0.61	1.06	2.15	1.16
70	0.14	0.05	0.35	0.17	0.29	0.36	0.73	0.59	1.77	1.52
80	0.16	0.00	0.89	0.19	0.85	0.37	0.05	0.97	2.19	2.87

表 2 两种算法的温度解调标准差

Table 2 Temperature demodulation standard deviation of the two algorithms

Temperature / $^{\circ}\text{C}$	Single channel					Dual channel				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
40	0.42	0.65	0.75	0.92	1.31	0.64	1.05	1.42	1.96	2.67
50	0.37	0.64	0.68	0.85	1.16	0.55	0.93	1.19	1.62	2.15
60	0.41	0.56	0.78	0.96	1.22	0.60	0.97	1.32	1.71	2.49
70	0.42	0.59	0.79	1.06	1.30	0.62	1.05	1.46	2.16	2.56
80	0.41	0.65	0.84	0.99	1.34	0.73	1.21	1.57	2.01	2.72

温度影响的作用较小。点 A 至点 E 的测温波动逐渐增大,原因是光纤的损耗由点 A 至点 E 越来越大,损耗的增大降低了信噪比。此外,单路解调算法优于双路解调算法。原因是对于双路解调算法,弯曲损耗附近位置两种信号的光损耗不一致,导致解调参量比值的信噪比降低。

4 结 论

本文研究了弯曲损耗对分布式拉曼测温解调的影响,通过分析 RDTS 单路解调算法和双路解调算法的原理和实验探究得出以下结论:两种解调算法均能适用于已发生弯曲损耗的光纤;对于发生弯曲损耗附近位置的温度解调,单路解调算法准确度和测温波动性优于双路解调算法,实验探究可得弯曲损耗为 7.18 dB 处,当环境温度为 80 $^{\circ}\text{C}$ 时,单路解调误差为 0.85 $^{\circ}\text{C}$ 、波动为 1.34 $^{\circ}\text{C}$,双路解调误差为 2.87 $^{\circ}\text{C}$ 、波动为 2.72 $^{\circ}\text{C}$ 。该研究对 RDTS 实际工程应用具有指导意义。对于已嵌入结构且发生弯曲损耗的传感光纤,当满足标定条件时,可用单路解调算法或双路解调算法重新标定测温。此外,在光纤发生弯曲损耗的附近位置的温度解调,单路解调算法的精度和测温波动性要小于双路解调算法。

参 考 文 献

[1] Saxena, Kumar M, Arya, et al. Raman optical fiber distributed temperature sensor using wavelet transform based simplified signal processing of Raman backscattered

signals[J]. Optics & Laser Technology, 2015, 65: 14-24.

- [2] Krohn D, Macdougall T, Mendez A. Fiber optic sensors: fundamentals and applications[J]. Instrument Society of American, 2015.
- [3] Luo S, Chang J, Zhang S S, et al. Reliability analysis and comparison of demodulation methods for Raman distributed temperature sensor[J]. Optical and Quantum Electronics, 2014, 46(12): 1595-1608.
- [4] Wang Z, Sun X H, Xue Q, et al. An optical fiber-folded distributed temperature sensor based on Raman backscattering [J]. Optics & Laser Technology, 2017, 93: 224-227.
- [5] Hwang D, Yoon D J, Kwon I B, et al. Novel auto-correction method in a fiber-optic distributed-temperature sensor using reflected anti-Stokes Raman scattering[J]. Optics Express, 2010, 18(10): 9747-9754.
- [6] Fernandez A F, Rodeghiero P, Brichard B, et al. Radiation-tolerant Raman distributed temperature monitoring system for large nuclear infrastructures[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2006, 52(6): 2689-2694.
- [7] Chelliah P, Murgesan K, Samvel S, et al. Looped back fiber mode for reduction of false alarm in leak detection using distributed optical fiber sensor[J]. Applied Optics, 2010, 49(20): 3869-3874.
- [8] Hausner M B, Scott K. Identifying and correcting step losses in single-ended fiber-optic distributed temperature sensing data[J]. Journal of Sensors, 2016, (2016): 1-10.
- [9] Saxena M K, Raju S D V S J, Arya R, et al. Empirical mode decomposition-based detection of bend-induced error and its correction in a Raman optical fiber distributed temperature sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(5): 1243-1252.