

doi: 10.3788/gzxb20144307.0706005

# 采用单工循环编码解码的分布式光纤喇曼 温度传感器

余向东<sup>1</sup>, 金尚忠<sup>1</sup>, 张在宣<sup>1</sup>, 王剑锋<sup>1</sup>, 张文平<sup>2</sup>

(1 中国计量学院 光电子技术研究所, 杭州 310018)

(2 杭州欧忆光电科技有限公司, 杭州 310018)

**摘 要:**针对连续脉冲编码解码技术在分布式光纤喇曼温度传感器应用中出现被测光纤非线性峰值阈值光功率变低、编码过程较复杂等问题,提出了一种将光脉冲码均匀分布在整条被测光纤的单工循环编码解码技术和应用方案,并在 27 km 单模系统中与传统单脉冲技术系统做了对比实验.结果表明:相比连续编码解码技术,单工循环编码解码技术不仅保持了编码解码技术相对于传统单脉冲技术的信噪比改善能力,而且有效地提高了光纤的非线性峰值阈值光功率.在编码时只需循环发送一组码,就可使系统的信噪比和测量距离获得极大的提高.采用 211 位循环编码解码技术的多模系统经 16 万次重复测量后,可在 25 km 处获得 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ 的温度不确定度,空间分辨率为 3 m.

**关键词:**光纤; 传感器; 喇曼散射; 编码; 非线性; 温度传感

**中图分类号:** TN253; O437.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2014)07-0706005-5

## A Distributed Optical Fiber Raman Temperature Sensor with Cyclic Simplex Coding

YU Xiang-dong<sup>1</sup>, JING Shang-zhong<sup>1</sup>, ZHANG Zai-xuan<sup>1</sup>,

WANG Jian-feng<sup>1</sup>, ZHANG Wen-ping<sup>2</sup>

(1 Institute of Optoelectronics, China Jiliang University, Hangzhou, 310018, China)

(2 Hangzhou OE Optoelectronics Technology Co., Ltd, Hangzhou, 310018, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of lower nonlinear threshold optical peak power in fiber and more complicated coding algorithm caused by continuous pulse coding technique, a cyclic simplex coding technology and its application system in which the coding optical pulses were evenly distributed along the whole fiber were proposed. The comparative experiment adopting 27 km multimode optical fiber between traditional single pulse system and cyclic simplex coding system were made for validating the correctness of theory. The results show that compared to the continuous pulse coding, the cyclic simplex coding not only keeps same signal-to-noise improvements to traditional single pulse technique, but also increases nonlinear threshold optical peak power in fiber, and has more simple coding process in which it just transmits one row codes circularly, so the system can improve signal-to-noise ratio and sensing range greatly in the same amount of measurement time. With this coding technology, the system attains  $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$  temperature measuring uncertainty and achieves 3 m spatial resolution on 25 km of multimode optical fiber after 160 000 measurement times.

**Key words:** Fiber optic; Sensor; Raman scattering; Coding; Nonlinear; Temperature sensing

**OCIS Codes:** 060.0060; 060.2370; 060.4370; 290.0290; 290.5860

基金项目: 国家 973 项目 (Nos. 2010CB327804) 资助

第一作者: 余向东 (1968-), 男, 教授级高工, 学士, 主要研究方向为光纤分布传感技术. Email: yuxd@cjl. edu. cn

收稿日期: 2013-09-17; 录用日期: 2014-01-08

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

分布式光纤喇曼温度传感器系统 (Distributed Optical Fiber Temperature Sensor based on Raman scattering, RDTS) 是一种用于实时测量空间温度场分布的光纤传感器系统. 具有本征无源、抗电磁干扰、连续线性测温、耐腐蚀、安装集成方便等特点, 已大量应用于电力电缆、隧道、煤矿、油井等领域的在线实时温度监测及火灾、气体液体泄漏预警报警<sup>[1-4]</sup>.

典型的 RDTS<sup>[5-8]</sup> 一般采用激光单脉冲作为光纤泵浦信号, 用反斯托克斯喇曼散射光作为测量温度信号通道, 斯托克斯喇曼或瑞利散射光作为测量温度参考通道. 由于喇曼散射光强度很弱, 经光电转换后的信号淹没在各种噪音中, 信噪比很差, 而信噪比是决定系统测温准确度或测量距离的重更因素. 为了在不降低空间分辨率下提高信噪比, 一种办法是在保持脉宽不变下尽量提高泵浦脉冲激光的峰值功率, 但泵浦脉冲激光的峰值功率超过光纤的非线性阈值时喇曼散射光会产生非线性效应而无法进行有效的温度解调. 另一种办法是对信号进行多次取样平均, 但对于长距离系统需要花费大量的时间, 从而降低了测温的实时反应能力. 连续脉冲编码解码技术, 如: simplex coding, golay coding 等<sup>[9-12]</sup>, 虽然在相同泵浦激光峰值功率和测量时间下, 能比单脉冲技术获得更好的信噪比, 但由于连续编码脉冲单元的连续性, 使得光纤非线性峰值功率较单脉冲大大降低. 例如, 对于标准单模光纤而言, 连续编码脉冲的脉冲群持续时间长度超过 100 ns 时, 光纤非线性峰值功率一般不会超过 1 W. 而 10 ns 单脉冲系统光纤非线性峰值功率可达约 5 W. 因此, 如果泵浦激光峰值功率都处于光纤非线性阈值, 采用连续编码解码技术的系统比采用单脉冲技术的系统在信噪比上实际并没有获得多大的改善.

本文介绍了一种采用单工循环编码解码 (cyclic simplex coding) 的多模 RDTS. 该系统采用稳定频率的脉冲光纤激光器作为发射源, 利用声光调制器对光源脉冲进行编码, 并将编码光脉冲均匀分布在整条被测光纤上. 由于相邻激光码元间不连续, 具有足够的时间间隔, 使得该系统的光纤非线性峰值功率和单脉冲系统非常接近, 相对于连续脉冲编码解码技术可大大提高编码激光脉冲的峰值功率. 单工循环编码解码技术和连续脉冲编码解码技术一样, 在相同光纤泵浦激光峰值功率和测量时间下, 可使系统在不降低空间分辨率下获得了相对于单脉冲系统  $(N+1)/2 \sqrt{N}$  倍 ( $N$  为码长) 的信噪比改善. 基于以上两种原因, 使得该系统可大大提高测温准确度或测量距离.

## 1 系统工作原理

单工循环编码解码的基本原理<sup>[13-14]</sup> 是循环向测温光纤发送一行  $N$  位的二进制编码光脉冲信号, 相邻码位的光脉冲保持固定的间隔时间,  $N$  位编码光脉冲信号的循环周期等于或大于 (会增加测量时间) 光信号在测温光纤来回所需的时间, 这样使整个测温光纤充满了间隔的光脉冲信号, 系统测到的背向散射信号时域曲线是各个码位光脉冲背向散射时域曲线的叠加. 由于  $N$  位编码光脉冲信号间隔分布在循环周期内, 相邻码位的光脉冲有足够大的时间间隔, 有效提高了测温光纤的非线性峰值阈值光功率, 使系统可采用大峰值功率激光器, 获得更好的信噪比.

图 1 为 7 位单工循环编码工作原理, 其发送的二进制码为  $P = \{0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0\}$ . 假设一个  $N$  位的二进制编码模式  $P = \{P_0 \ \dots \ P_{N-1}\}$ ,  $P_j = 0, 1, j = 0, \dots, N-1$ , 将采集到的背向散射时域曲线分割成  $N$  个区间, 以对应  $N$  位的编码模式, 每个区间的

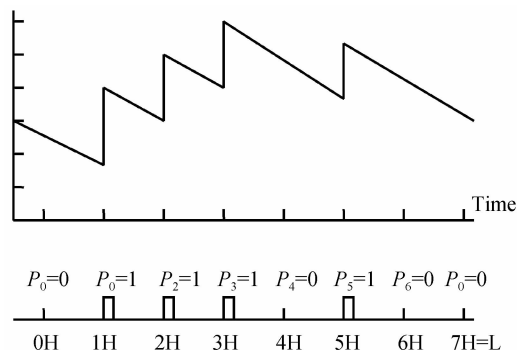


图 1 7 位单工循环编码工作原理

Fig. 1 Principle scheme of cyclic simplex code with 7bit 起始时刻位置 and 对应码位的光脉冲发射时刻相一至, 并且  $N$  位编码光脉冲循环发射. 设背向散射信号的采样点数为  $L$ ,  $H$  为每个区间对应的采样点数, 则  $L = H \times N$ . 设  $i = 0, \dots, H-1$ ,  $\mathbf{Y}_i, \mathbf{X}_i$  为两个  $N$  行 1 列的矩阵, 并且

$$\mathbf{Y}_i = \begin{bmatrix} y[i+0H] \\ \dots \\ y[i+jH] \\ \dots \\ y[i+(N-1)H] \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{X}_i = \begin{bmatrix} x[i+0H] \\ \dots \\ x[i+jH] \\ \dots \\ x[i+(N-1)H] \end{bmatrix}$$

式中  $y[i+jH]$  表示背向散射信号第  $jH$  区间第  $i$  个采样值, 其中  $x[i+jH]$  表示需恢复的单脉冲对应背向散射信号第  $jH$  区间第  $i$  个采样值, 结合图 1 可以得出如下规律

$$\mathbf{Y}_i = \begin{bmatrix} P_0 & P_{N-1} & \cdots & P_2 & P_1 \\ P_1 & P_0 & \cdots & P_3 & P_2 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ P_{N-1} & P_{N-2} & \cdots & P_1 & P_0 \end{bmatrix} \mathbf{X}_i \quad (1)$$

设式(1)的  $N$  行  $N$  列二进制矩阵为  $\mathbf{S}$ , 该矩阵为以  $P_0 \ P_{N-1} \ \cdots \ P_2 \ P_1$  为首行的循环右移矩阵. 从式(1)可见, 单工循环编码背向散射信号第  $jH$  区间第  $i$  个采样值为单脉冲对应背向散射信号  $N$  个区间第  $i$  个采样值不同程度的叠加结果.

设  $\mathbf{S}$  矩阵可逆且逆矩阵为  $\mathbf{S}^{-1}$ , 则对单工循环编码背向散射信号的解码过程为

$$\mathbf{X}_i = \mathbf{S}^{-1} \mathbf{Y}_i \quad (2)$$

单工循环编码解码的过程相对连续脉冲编码解码(如: simplex coding, golay coding 等)在实现上更简单, 编码时只需循环地向测温光纤发送  $P_0 \ P_1 \ \cdots \ P_{N-2} \ P_{N-1}$  码即可, 解码的过程也更简单易行.

单工循环编码解码技术利用信号具有相关性而噪声不具有相关性这一原理, 通过编码过程将背向散射信号有机的叠加, 并通过解码技术将单个光脉冲对应的背向散射曲线恢复出来, 从而达到抑制噪声的目的. 由于最终恢复的是单个光脉冲对应的背向散射曲线, 因此, 采用该技术系统的空间分辨率和传统单脉冲系统的空间分辨率是一样的, 最高空间分辨率均取决于单个光脉冲的宽度.

和 simplex coding 相同, 在相同的输入泵浦峰值光功率和相同的重复测量次数下, 单工循环编码解码技术相对于单脉冲技术的信噪比改善为

$$\text{SNR}_N = \frac{N+1}{2\sqrt{N}} \quad (3)$$

系统原理框图如图 2. 1 550 nm 脉冲光纤激光器发出的固定重复频率激光脉冲经声光调制器 (Acousto-Optical Modulator, AOM) 编码并通过光纤双向耦合器射入本征型测温光纤. 光波分复用器 (Optical Wavelength Division Multiplexing, OWDM) 接收从光纤双向耦合器返回的背向散射光将其分解为斯托克斯和反斯托克斯喇曼背向散射<sup>[15]</sup> 光分别送给两

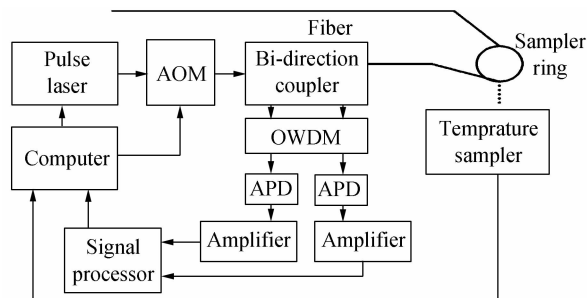


图 2 系统原理框图

Fig. 2 Configuration of RDTs system

路雪崩光电二极管光电接收器 (Avalanche Photodiode Detector, APD). APD 将光信号转换成电信号并分别送给两路放大器放大. 信号处理器对两路放大器送出的模拟电信号进行逐点采集, 将模拟信号转换为数字信号送给计算机进行解码、温度解调<sup>[16-17]</sup>, 并根据从温度取样环上获取的实时温度值进行行温度定标<sup>[18]</sup>, 最终恢复出测温光纤上的分布温度信息. 在温度解调处理过程中, 反斯托克斯喇曼散射光作为测量温度信号通道, 斯托克斯喇曼散射光作为测量温度参考通道. 系统的测温表达式为

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} - \frac{K}{H\Delta\nu} \left[ \ln \frac{X_{al}(T)X_{sl}(T_0)}{X_{al}(T_0)X_{sl}(T)} + (\alpha_a - \alpha_s)(L - L_0) \right] \quad (4)$$

式中  $H$  为普朗克常量,  $K$  为波耳兹曼常量,  $\Delta\nu$  为光纤声子的振动频率,  $\alpha_s, \alpha_a$  分别为斯托克斯、反斯托克斯喇曼散射光的光纤传输损耗,  $L$  为被测处的光纤长度,  $L_0$  为光纤取样环处的光纤长度,  $T$  为光纤  $L$  处的被测温度,  $T_0$  为光纤  $L_0$  处光纤取样环的温度,  $X_{al}, X_{sl}$  分别为解码后反斯托克斯和斯托克斯信号在  $L$  处幅值,  $X_{al_0}, X_{sl_0}$  分别为解码后反斯托克斯和斯托克斯信号在光纤取样环  $L_0$  处的幅值.

## 2 实验结果

将波长 1 550 nm 频谱宽度 0.1 nm 的脉冲光纤激光器的光脉冲半宽度设为 13 ns, 峰值功率取 10 W, 重复频率取 400 KHz, 单工循环编码的码长取 211 位, 此码长和重复频率对应的最长光纤测量长度为 52.75 km. 取 27.3 km、芯径为 62.5/125 的多模光纤作为测温光纤. 数据采集卡采样频率为 100 MS/s, 此采样频率对应的最高距离采样分辨率为 1 m. 图 3 为示波器经 512 次平均测到的放大器输出 211 位单工循环编码的反斯托克斯和斯托克斯喇曼散射时域信号. 图 4 为经计算机解码恢复的单脉冲反斯托克斯和斯托克斯喇曼散射时域信号曲线. 图 5 为室温环境下经温度解调、定标后的温度随光纤长度分布曲线. 在大约

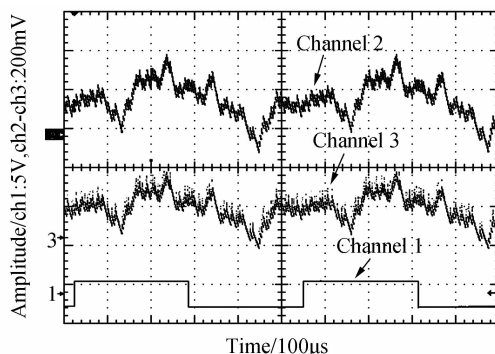


图 3 211 bit 单工循环编码反斯托克斯和斯托克斯信号曲线  
Fig. 3 211 bit cyclic simplex coded anti-Stokes and Stokes traces

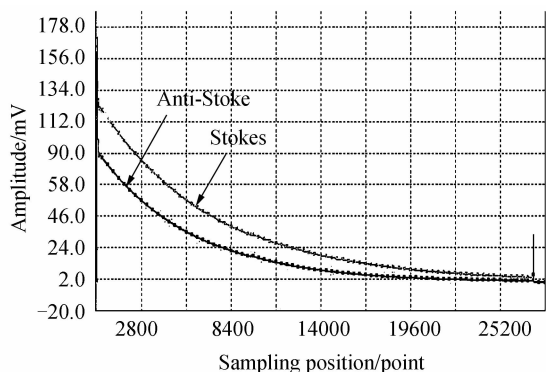


图4 解码后反斯托克斯和斯托克斯信号曲线  
Fig. 4 Decoded anti-Stokes and Stokes traces

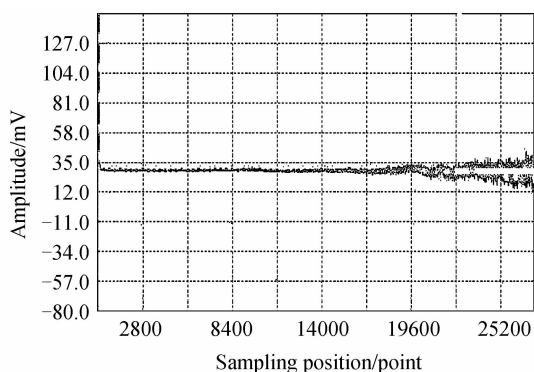


图5 211 bit 单工循环编码温度随光纤长度分布曲线  
Fig. 5 211 bit cyclic simplex coded temperature profile versus fiber length

25 km 光纤长度处,其温度不确定度约为  $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ 。图4、图5的数据均为经16万次重复测量后平均的结果。

该方案之所以采用400 KHz的光源重复频率(对应52.75 km光纤测程)主要是受限于所用光源的最大重复频率。对应27.3 km的光纤长度,光源重复频率的最高上限约为773 KHz。光源重复频率越接近上限频率,系统所需的测量时间越短。

将图2系统改为传统单脉冲模式,声光调制器设为常开,脉冲光纤激光器的光脉冲半宽度同样设为13 ns,峰值功率和211 bit单工循环编码模式保持相同,重复频率设为1.9 KHz,以保证相同的约53 km光

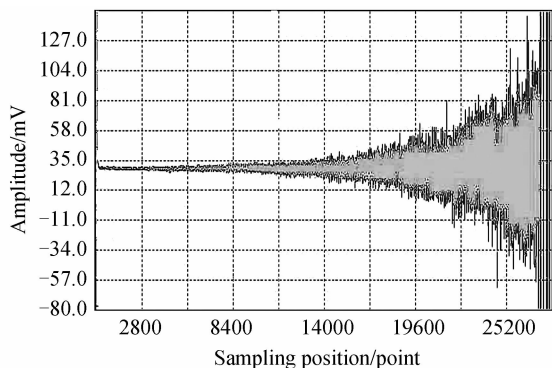


图6 传统单脉冲模式温度随光纤长度分布曲线  
Fig. 6 Conventional single pulse mode temperature profile versus fiber length

纤长度测程。图6为同样经16万次重复测量并平均后温度随光长纤长度分布曲线。图5和图6在光纤相同位置上的温度不确定度之比在7.10至7.31之间,非常接近式(3)211位码信噪比改善7.3的理论结果。

将211 bit单工循环编码系统光纤长度25 km处近10 m长的光纤放入60℃摄氏度的恒温水槽中。图7为系统测得的25 km附近温度随光纤长度分布图。根据空间分辨率为温度包上升沿10%至90%的光纤长度的定义,从图7可知,系统在25 km处的空间分辨率为3 m,这一结果和对应传统单脉冲系统基本一致。图7温度包在60℃附近的不确定值约为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ,而对应传统单脉冲系统的不确定值约为 $\pm 7.2^{\circ}\text{C}$ 。单工循环编码系统的空间分辨率大小和系统光源光脉冲的脉宽大小、光电系统的响应速度、采集卡的采样率以及测温光纤的色散有关,本系统的空间分辨率主要受限于测温光纤的色散和100 MS/s的采集卡采样率。

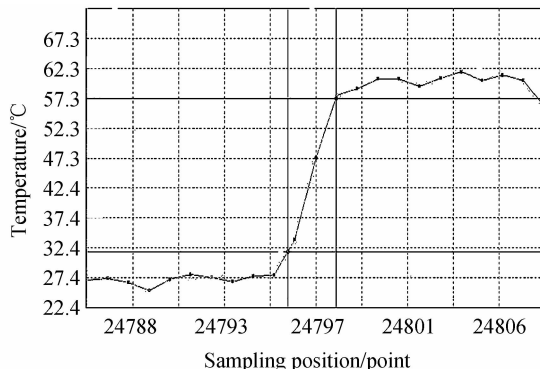


图7 211 bit 单工循环编码系统25 km处温度随光纤长度分布曲线

Fig. 7 Temperature profile versus fiber length near 25 km fiber length with 211 bit cyclic simplex coded

相对于单模光纤,多模光纤具有光纤芯径粗,散射信号强,非线性阈值高,不易产生相干噪音,光纤弯曲损耗小的特点,但多模光纤的传输损耗比单模光纤高,随着光纤长度的增加,多模光纤的散射信号衰减更快,信噪比迅速减小,从而使得传统单脉冲多模系统的测温光纤长度一般受限于大约15 km之内的中短距离。从图5、图6的对比结果可知,单工循环编码解码技术可在相同重复测量次数下(在相同的测程下测量时间也大致相同)大大提高系统的信噪比,在获得同样温度不确定的情况下,将测量距离增加了约10 km。

### 3 结论

在相同光纤泵浦激光峰值功率和相同重复测量次数前提下,采用单工循环编码解码技术的RDTs相比采用传统单脉冲技术的RDTs,可大大提高信噪比,从而有效地增加了系统测量距离。采用211 bit单工循环编码解码技术的多模系统经16万次重复测量可在25 km光纤长度处获得 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ 的测温不确定度以及

3 m的空间分辨率.

#### 参考文献

- [1] ZHANG Zai-xuan, JIN Shang-zhong, WANG Jian-feng, *et al.* Distributed optical fiber Raman photon sensor research review [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(11): 2749-2761.  
张在宣, 金尚忠, 王剑锋, 等. 分布式光纤拉曼光子温度传感器的研究进展[J]. 中国激光, 2010, **37**(11): 2749-2761.
- [2] JIA Zhen-an, ZHOU Xiao-bo, QIAO Xue-guang, *et al.* Current status and developing trend of distributed optical fiber temperature sensor[J]. *Optical Communication Technology*, 2008, (11): 36-39.  
贾振安, 周晓波, 乔学光, 等. 分布式光纤温度传感器发展状况及趋势[J]. 光通信技术, 2008, (11): 36-39.
- [3] ZHANG Ying, ZHANG Juan, GUO Yu-jing, *et al.* Current status and developing trend of distributed optical fiber temperature sensor[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2007, (8): 1-3,9.  
张颖, 张娟, 郭玉静, 等. 分布式光纤温度传感器的研究现状及趋势[J]. 仪表技术与传感器, 2007, (8): 1-3,9.
- [4] CHEN Ji-xuan, GONG Hua-ping, ZHANG Zai-xuan, *et al.* Development and engineering applications of optical fiber sensor[J]. *Optical Communication Technology*, 2008, (10): 38-40.  
陈继宣, 龚华平, 张在宣, 等. 光纤传感器的工程应用及发展趋势[J]. 光通信技术, 2009, (10): 38-40.
- [5] ZHANG Zai-xuan, WANG Jian-feng, LIU Hong-lin, *et al.* Experimental research of 30 km long distance optical fiber Raman temperature sensor system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, **31**(5): 613-616.  
张在宣, 王剑锋, 刘红林, 等. 30Km 远程分布式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.
- [6] WANG Wei, ZHOU Bang-guan, ZHANG Zai-xuan, *et al.* Temperature measurement accuracy of the distributed optical fiber Raman photons temperature sensor system [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **1**(19): 100-105.  
王玮, 周邦全, 张在宣, 等. 分布型光纤拉曼光子温度传感器系统的测温准确度[J]. 光学学报, 1999, **1**(19): 100-105.
- [7] ZHANG Lei, FENG Xue, ZHANG Wei, *et al.* Fiber Raman distributed demperature sensor based on the light source with adjustable pulsewidth[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **34**(10): 2584-2587.  
张磊, 冯雪, 张巍, 等. 基于变脉宽光源的分布式光纤拉曼温度传感器研究[J]. 光子学报, 2009, **34**(10): 2584-2587.
- [8] ZHANG Lei, FENG Xue, ZHANG Wei, *et al.* Numerical comparison on the measurement time of long range fiber Raman distributed temperature sensors operating at 1.66  $\mu\text{m}$  and 1.55  $\mu\text{m}$ [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(11): 2806-2809.  
张磊, 冯雪, 张巍, 等. 1.66 $\mu\text{m}$  和 1.55 $\mu\text{m}$  光源对长距离光纤拉曼温度传感器测量时间影响的理论对比[J]. 光子学报, 2009, **38**(11): 2806-2809.
- [9] BOLOGNINI G, PARK J, SOTOL M A, *et al.* Analysis of distributed temperature sensing based on Raman scattering using OTDR coding and discrete Raman amplification [J]. *Measurement Science And Technology*, 2007, (18): 3211-3218.
- [10] SOTO M A, SAHU P K, FARALLI S, *et al.* Distributed temperature sensor system based on Raman scattering using correlation-codes[J]. *Electronic Letters*, 2007, **43**(13): 2nd.
- [11] PARK J, BOLOGNINI G, LEE D, *et al.* Raman-based distributed temperature sensor with simplex coding and link optimization[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, **18**(17): 1879-1881.
- [12] SONG Mu-ping, BAO Chong, YE Xian-feng. 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.
- [13] BARONTI F, LAZZERI A, RONCELLA R, *et al.* SNR enhancement of Raman-based long-range distributed temperature sensors using cyclic Simplex codes[J]. *Electronic Letters*, 2010, **46**(17): 1221-1222.
- [14] SOTO M A, NANNIPIERI T, SIGNORINI A, *et al.* Raman-based distributed temperature sensor with 1m spatial resolution over 26 km SMF using low-repetition-rate cyclic pulse coding[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(13): 2557-2559.
- [15] ZHANG Zai-xuan, KIM I S, WANG Jian-feng, *et al.* Temperature effect of amplified anti-Stokes Raman spontaneous sckscattering in the single mode fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 609-613.  
张在宣, KIM I S, 王剑锋, 等. 在单模光纤中放大的反斯托克斯拉曼背向自发散射的温度效应[J]. 光学学报, 2004, **24**(5): 609-613.
- [16] ZHANG Li-xun, LIAO Yun, LIU Yong-zhi, *et al.* Circulation demodulation method for 1.55 $\mu\text{m}$  Raman temperature sensors[J]. *Laser Technology*, 2006, **30**(2): 165-167.  
张利勋, 廖云, 刘永智, 等. 1.55 $\mu\text{m}$  喇曼温度传感器的强循环解调方法[J]. 激光技术, 2006, **30**(2): 165-167.
- [17] ZHANG Li-xun, OU Zhong-hua, LIU Yong-zhi, *et al.* A circulated demodulated method of distributed fiber Raman temperature sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(8): 1176-1178.  
张利勋, 欧中华, 刘永智, 等. 分布式光纤喇曼温度传感器的循环解调法[J]. 光子学报, 2005, **34**(8): 1176-1178.
- [18] YU Xiang-dong, ZHANG Zai-xuan, ZHU Hai-zhong, *et al.* A temperature compensating circuit for distributed optical fiber Raman temprature sensor [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(6): 1440-1444.  
余向东, 张在宣, 祝海忠, 等. 一种应用于分布式光纤拉曼温度传感器的温度补偿电路[J]. 中国激光, 2010, **37**(6): 1440-1444.