

# 基于取样环的 APD 增益调节与温度校正拉曼 光纤传感系统

余超群 陈福昌\* 张华林 周锦荣

闽南师范大学物理与信息工程学院, 福建 漳州 363000

**摘要** 提出并实验验证了一种基于取样环的雪崩光电二极管(APD)增益调节与温度校正拉曼光纤温度传感系统,通过比较取样环在测温线与基线上的信号偏差对 APD 进行偏压调节,维持 APD 增益基本恒定,保证系统信噪比和稳定性;并在此基础上针对环境变化等不确定因素造成的不可避免的 APD 增益波动,以该取样环信号为参考信号对测温曲线进行校正解调,进一步提升系统测温精度。实验证明,较之传统的拉曼光纤温度传感系统,这种基于取样环的 APD 增益调节和温度校正方案能有效消除 APD 增益变化对传感系统的影响,显著提升系统在信噪比、稳定性和测温精确性等方面的性能,具有实用价值。

**关键词** 测量;拉曼散射;光纤传感;取样环

**中图分类号** TN247; TP212.1

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP52.090603

## Sample-Ring Based APD Gain Adjusting and Temperature Calibrating Raman Fiber Sensing System

Yu Chaoqun Chen Fuchang Zhang Hualin Zhou Jinrong

College of Physics and Information Engineering, Minnan Normal University, Zhangzhou, Fujian 363000, China

**Abstract** A Raman fiber temperature sensing system based on sample-ring avalanche photo diode (APD) gain adjusting and temperature calibrating method is proposed and experimentally demonstrated. The proposed system controls the APD bias by comparing the deviation of signal line and baseline obtained from the sample-ring, maintaining a substantially constant APD gain, thus ensuring temperature measurement accuracy and signal to noise ratio. Signal line obtained from the sample-ring is also used as reference signal for temperature calibration, further eliminating measured errors caused by inevitable APD gain fluctuation due to uncertain factors. Experimental results show that the proposed method significantly improves system performs in signal to noise ratio, stability and temperature measurement accuracy with respect to conventional Raman fiber temperature sensing system, it has practical value.

**Key words** measurement; Raman scattering; optical fiber sensing; sample-ring

**OCIS codes** 060.2370; 290.5860; 120.5820

## 1 引言

拉曼分布式光纤温度传感器于 1985 年由 Hartog 等<sup>[1]</sup>首次成功实现,因其具有损耗低、耐腐蚀、易埋入、测距长、成本低等优越性能<sup>[2]</sup>,迅速取代传统点式传感器(如光纤光栅传感器、电传感器等),成为目前能源、电力、建筑、交通、安防等诸多领域理想的无损监测技术<sup>[3-6]</sup>。

拉曼分布式光纤温度传感器利用光纤拉曼散射效应测温<sup>[7]</sup>。由于拉曼散射信号极其微弱,系统一般采用具有高增益、高带宽、低噪声的雪崩光电二极管(APD)探测器采集拉曼散射光信号<sup>[8]</sup>。APD 作为测量信号的主探测器,其增益的稳定性直接影响系统的信噪比和稳定性<sup>[9]</sup>。对于确定的测温传感系统,存在使系统获得最高信噪比的最优增益<sup>[10]</sup>。目前分布式拉曼光纤传感系统一般采用恒温控制<sup>[11]</sup>或测温反馈偏压调节的方

收稿日期: 2015-01-25; 收到修改稿日期: 2015-02-26; 网络出版日期: 2015-08-13

基金项目: 国家自然科学基金(61405086)、福建省教育厅 A 类(JA14207)、漳州市自然科学基金(ZZ2013J02)、闽南师范大学新世纪人才(MX13003)、闽南师范大学杰出青年计划(SJ12001)

作者简介: 余超群(1985—),女,硕士,助教,主要从事分布式光纤传感方面的研究。E-mail: yucq411@163.com

\*通信联系人。E-mail: Chenfc27@163.com

法<sup>[12]</sup>来维持APD增益的稳定性。对于前者,由于一般恒温装置很难获得0.1℃的恒温精度,而实验发现APD增益对温度变化十分敏感,因此这种方法使用范围有限;后者则由于获取精确的APD工作温度难度较大,且受APD光电探测电路内部工作电流的影响,测温系统本身就容易对APD工作产生干扰,所以这种方法操作复杂,可靠性差。

APD增益调节法能在一定范围维持APD增益的稳定性,但在实际应用中,系统中存在的一些不确定的环境因素仍然会使APD增益产生不可避免的波动,导致传感系统解调出来的温度曲线发生缓慢的、不易察觉的测量误差<sup>[13]</sup>。为保证系统测温精度和稳定可靠性,需要进一步消除APD增益波动对测温精度的影响。

针对上述问题,本文提出一种拉曼光纤温度传感系统,采用基于标准取样环的APD增益调节和自校准解调方法,通过比较取样环在测温线与基线上的信号偏差来决定反馈控制偏压的大小,使APD增益维持基本恒定,保证了系统的信噪比和稳定性;系统同时利用取样环信号作为参考值进行自校准解调,在信号解调过程中进一步消除由不确定因素引起的APD增益波动和对温度曲线造成的测量误差,有效提高了传感系统的测温精度。

## 2 工作原理

### 2.1 光纤自发拉曼散射的测温原理

拉曼分布式光纤传感系统中拉曼散射光包括斯托克斯分量和反斯托克斯分量,两者的光功率可表示为<sup>[14]</sup>

$$V_s(T) = K_s S \nu_s^4 P_e \exp[-(\alpha_0 + \alpha_s)L] R_s(T), \quad (1)$$

$$V_a(T) = K_{as} S \nu_{as}^4 P_e \exp[-(\alpha_0 + \alpha_{as})L] R_{as}(T), \quad (2)$$

式中  $P_e$  为入射光功率,  $K_s$ 、 $K_{as}$  分别为与光纤斯托克斯和反斯托克斯拉曼散射截面有关的系数,  $S$  为光纤的背向散射因子,  $\nu_s$ 、 $\nu_{as}$  分别为斯托克斯和反斯托克斯拉曼光子频率,  $\alpha_0$ 、 $\alpha_s$ 、 $\alpha_{as}$  分别为光纤中入射光、斯托克斯和反斯托克斯光的传输损耗系数,  $L$  为光纤长度,  $R_s(T)$  和  $R_{as}(T)$  分别为与光纤分子高能级和低能级上的布居数有关的系数,表示为

$$R_s(T) = [1 - \exp(-h\Delta\nu/kT)]^{-1}, \quad (3)$$

$$R_{as}(T) = [\exp(h\Delta\nu/kT) - 1]^{-1}, \quad (4)$$

式中  $\Delta\nu$  为拉曼声子频率,  $h$  为普朗克常数,  $k$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为光纤沿线的温度。

分析(3)、(4)式不难发现,反斯托克斯光强温度灵敏度高,而斯托克斯光对温度基本不敏感。利用斯托克斯光作为参考光,反斯托克斯光作为信号光进行双路解调,可以测得传感光纤沿线温度。具体过程如下:

1) 测出整段光纤在  $T = T_0$  时的反斯托克斯和斯托克斯拉曼散射光功率信号:

$$\begin{cases} V_a(T_0) = K_{as} S \nu_{as}^4 P_e \exp[-(\alpha_0 + \alpha_{as})L] R_{as}(T_0) \\ V_s(T_0) = K_s S \nu_s^4 P_e \exp[-(\alpha_0 + \alpha_s)L] R_s(T_0) \end{cases} \quad (5)$$

2) 将两路信号进行比较可得  $T = T_0$  时的测量基线:

$$\frac{V_a(T_0)}{V_s(T_0)} = \frac{K_{as} \nu_{as}^4}{K_s \nu_s^4} \exp[-(\alpha_{as} - \alpha_s)L] \exp(-h\Delta\nu/kT_0). \quad (6)$$

同理,可以得到在任意温度  $T$  时两路信号的测温曲线:

$$\frac{V_a(T)}{V_s(T)} = \frac{K_{as} \nu_{as}^4}{K_s \nu_s^4} \exp[-(\alpha_{as} - \alpha_s)L] \exp(-h\Delta\nu/kT). \quad (7)$$

3) 比较上述两条曲线得:

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

由(8)式可计算得到光纤沿线的温度分布曲线:

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

(9)式即代表传感光纤沿线温度信息。

## 2.2 采用取样环进行 APD 增益调节

(1)、(2)式中的反斯托克斯和斯托克斯光功率实际上由 APD 光电探测电路得到的电信号表示,考虑 APD 增益对系统信噪比的影响,测温系统在待测光纤上设置标准取样环,通过比较取样环在测温线与基线上的信号偏差来决定反馈控制偏压的大小,从而保证电路最优 APD 增益的基本恒定,方案详述如下。

在传感光纤前端设置一个约 20 m 的光纤标准取样环并将其置于均匀温度环境。假设温度  $T_0$  时取样环中心位置拉曼散射信号分别为  $V_{sa}(T_0)$ 、 $V_{ss}(T_0)$ ,此为基线信号,温度  $T$  时取样环中心位置得到拉曼散射信号为  $V_{sa}(T)$ 、 $V_{ss}(T)$ ,此为测温线信号。

因为取样环处于恒温状态,即取样环上基线和测温线上  $T = T_0$ ,所以取样环中心位置的拉曼信号值应该保持不变,即

$$V_{ss}(T) = V_{ss}(T_0), V_{sa}(T) = V_{sa}(T_0). \quad (10)$$

假设温度是引起 APD 增益变化的唯一因素,实际测量时若(10)式成立,说明基线和测温线获取时刻 APD 增益恒定不变,反之则说明 APD 增益发生了变化。计算机可根据基线与测温线的偏差大小和方向发出指令,对 APD 进行偏压调节控制,维持电路最优 APD 增益的基本恒定,使系统获得良好的信噪比和稳定性。

由于系统光源的不稳定性也会给取样环基线与测温线信号带来偏差,为保证 APD 增益调节的准确性,系统还在光源处设置了监测模块,将光源功率的 1%送入光功率计进行检测,以排除系统光源功率不稳定对取样环基线和测温线的影响。

## 2.3 采用取样环进行温度校正解调

在实际测温时,往往存在一些不确定的环境因素引起不可避免的 APD 增益波动,引起测温误差。前述取样环可用作温度校正解调所需的参考信号来源,消除增益波动引起的误差,提高系统的测温精度。

校准原理如下:假设温度为  $T$  时测温线信号值为  $V_a(T)$  和  $V_s(T)$ ,经取样校正后的值为  $V'_a(T)$  和  $V'_s(T)$ 。

当 APD 增益波动时,  $V_a(T)$  和  $V_s(T)$  不但包含了对应各点的温度信息,还含有 APD 增益波动干扰成分。由于取样环得到的测温线和基线信号同样受到了该增益波动干扰,在变化幅度不太大的情况下,  $V_a(T)$  和  $V_s(T)$  能按照取样环所得的信号比例进行校正,得到只包含温度信息的  $V'_a(T)$  和  $V'_s(T)$ ,即:

$$\frac{V'_s(T)}{V'_a(T)} = \frac{V_{ss}(T)}{V_{sa}(T_0)}, \frac{V'_a(T)}{V'_s(T)} = \frac{V_{sa}(T)}{V_{sa}(T_0)}. \quad (11)$$

由(11)式可得:

$$\frac{V'_a(T)}{V'_s(T)} = \frac{V_a(T)/V_s(T)}{[V_{sa}(T)/V_{ss}(T)]/[V_{sa}(T_0)/V_{ss}(T_0)]}. \quad (12)$$

经过取样校正后,解调(9)式中的  $\frac{V_a(T)/V_s(T)}{V_{sa}(T_0)/V_{ss}(T_0)}$  修正为

$$\frac{V'_a(T)/V'_s(T)}{V_{sa}(T_0)/V_{ss}(T_0)} = \frac{[V_a(T)/V_s(T)]/[V_{sa}(T_0)/V_{ss}(T_0)]}{[V_{sa}(T)/V_{ss}(T)]/[V_{sa}(T_0)/V_{ss}(T_0)]}. \quad (13)$$

将(13)式代入解调(9)式,即可求得校正后的温度解调公式为

$$T = \frac{1}{\frac{1}{T_0} - \left(\frac{k}{h\Delta\nu}\right) \left\{ \ln \left\{ \frac{[V_a(T)/V_s(T)]/[V_{sa}(T_0)/V_{ss}(T_0)]}{[V_{sa}(T)/V_{ss}(T)]/[V_{sa}(T_0)/V_{ss}(T_0)]} \right\} \right\}}. \quad (14)$$

取样环信号  $V_{sa}(T)$ 、 $V_{ss}(T)$  与测温信号  $V_a(T)$ 、 $V_s(T)$  是同时采集的,因此该校正法具有实时性。实验验证,取样环温度校正法能够很好地消除 APD 增益波动引起的测温误差,提高系统的测温精度<sup>[15]</sup>。

## 3 实验和结果分析

提出的基于取样环的 APD 增益调节与温度校正拉曼光纤温度传感系统结构如图 1 所示。测温系统主要包括光源(LD)、波分复用器(WDM)、APD 光电探测电路、数据采集卡(DAC)、计算机(PC)和传感光纤,图中的虚线框 A 为温控(TC)状态下的 20 m 光纤取样环,虚线框 B 为光源功率稳定性监测模块。

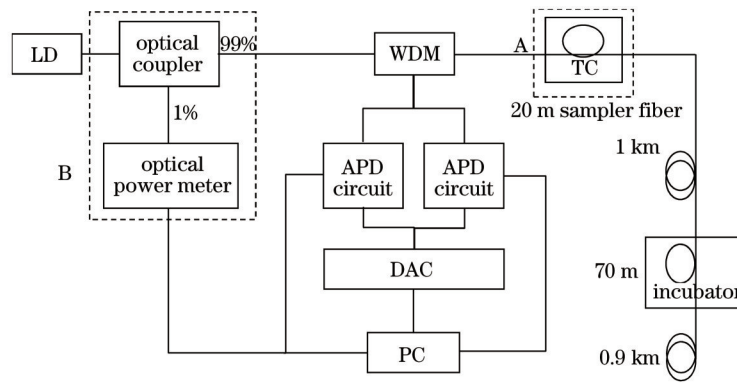


图1 基于取样环的APD增益调节与温度校正拉曼光纤传感系统结构图

Fig.1 Schematic of sample-ring based APD gain adjusting and temperature calibration Raman fiber sensing system

光源产生脉冲光通过波分复用器进入传感光纤,在传感光纤中产生后向拉曼散射光。拉曼散射光经波分复用器进行滤波、分离,得到携带温度信息的反斯托克斯光和作为参考信号的斯托克斯光,两种光信号分别进入APD光电探测器进行光电转换和放大,数据采集卡对放大输出的电信号进行采样和模数转换,最后由计算机对数字信号进行处理和分析计算,得到整条传感光纤沿线的温度信息。计算机分析从取样环测得的基线和测温线信号,对APD偏压进行反馈调节的控制信号,取样环基线和测温线信号同时用作温度校正解调的参考信号。实验过程如下:

在室温(15.0 °C)下,斯托克斯和反斯托克斯信号经采集卡32768次累加平均后作为基线信号,如图2所示。2 km光纤尾端处的信号是端面反射造成的,实际解调时需要去除。

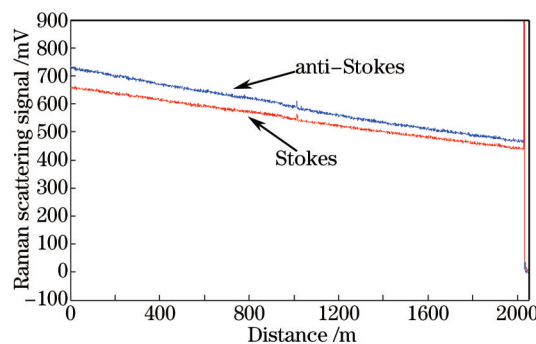


图2 斯托克斯和反斯托克斯拉曼散射信号基线

Fig.2 Baseline of Stokes and anti-Stokes Raman scattering signal

APD增益变化一般由温度变化引起,APD增益随工作温度降低而增大,随工作温度升高而减小。调节恒温箱温度使箱中的70 m传感光纤处于23.0 °C,为验证APD增益变化带来的测量误差,在利用取样环进行APD增益调节、同时减小两路APD增益、同时增大两路APD增益三种情况下,采集的拉曼散射曲线以及(9)式解调得到的测温曲线如图3所示。

由图3可知,利用未经取样环校正的解调(9)式,进行增益调节解调得到的平均温度为25.2 °C,与光纤实际温度相差2.2 °C,测温基线为17.6 °C,与室温偏移2.6 °C;而当APD增益变大或减小时,解调的温度基线均发生了约9.0 °C的偏移,测量得到的平均温度与光纤实际温度相去甚远。这是两路APD增益同时增加或降低的测温偏移情况,若只改变其中一路APD增益,测温曲线将会发生大于100 °C的偏移<sup>[16]</sup>。

对比图3(a)与(b)、(c)可知,进行取样环APD增益调节可提高系统测温的准确性。值得注意的是,图3中的各温度解调曲线的均方根值分别为1.2 °C,2.1 °C和0.9 °C,三条测温曲线的信噪比有明显差别,证明APD增益变化同时影响系统测温准确性和信噪比。文献[16]介绍的方法很好地消除了APD光电探测电路增益变化引起的解调误差,但却会出现图3(b)、(c)中系统信噪比波动的问题<sup>[16]</sup>。

在前述实验情况下,采用带有取样环校正的解调(14)式对图3中的三种情况进行解调,可得温度解调曲线如图4所示,解调得到的测温均值分别为23.0 °C,23.2 °C和23.5 °C,且测温基线均在室温附近。分别对比图3和图4的(a)~(c)可知,基于取样环的温度解调方法进一步提高了系统的测温精度。

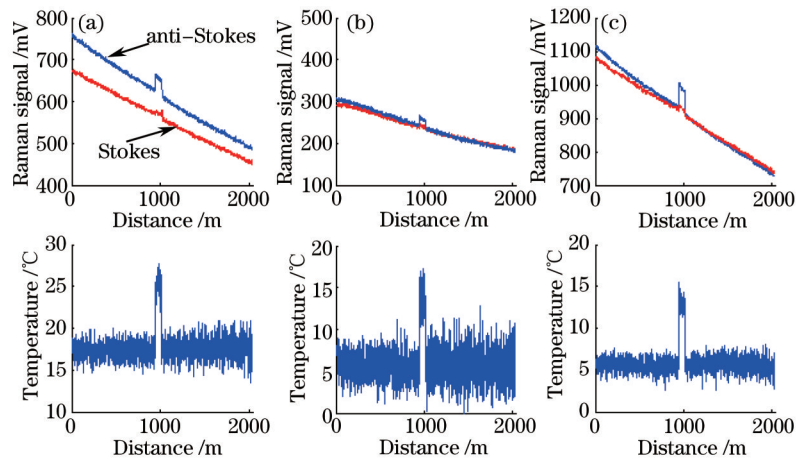


图3 不同APD增益下的拉曼散射信号和未经取样环校正的温度解调曲线。(a) 取样环APD增益调节; (b) APD增益较小; (c) APD增益增大

Fig.3 Raman scattering signal with different APD gains and temperature demodulation curve without sample-ring based calibration. (a) Sample-ring based APD gain adjustment; (b) reduced APD gain; (c) increased APD gain

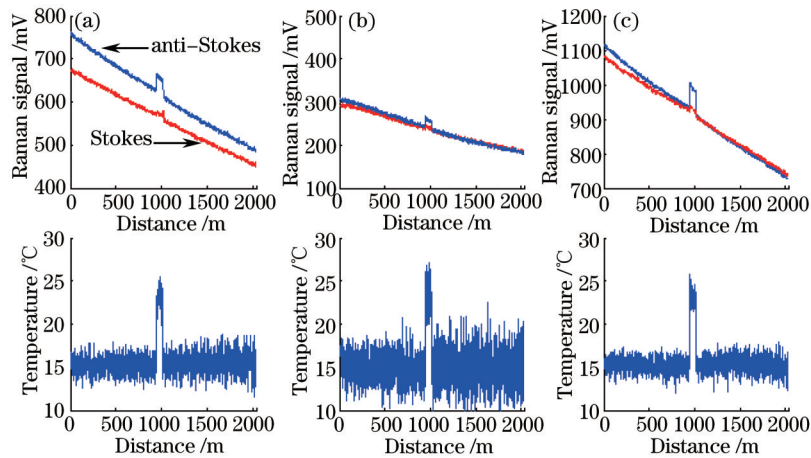


图4 不同APD增益下的拉曼散射信号和经取样环校正的温度解调曲线。(a) 取样环APD增益调节; (b) APD增益较小; (c) APD增益增大

Fig.4 Raman scattering signal with different APD gains and temperature demodulation curve with sample-ring based calibration. (a) Sample-ring based APD gain adjustment; (b) reduced APD gain; (c) increased APD gain

为进一步验证该方案的可行性,调节恒温箱温度,使箱中传感光纤处于75℃的恒温状态。

采用取样环增益调节保证两路APD增益基本恒定,在APD增益波动的情况下,采集三组拉曼散射信号如图5(a)所示,斯托克斯信号在600~700 mV之间波动,反斯托克斯信号在700~800 mV之间波动。图5(b)为对应的温度解调曲线,平均温度分别为75.7℃、75.5℃和75.0℃,与光纤实际温度最大偏差为0.7℃,三组温度曲线的均方根值分别为1.1℃、1.2℃、1.2℃,有效保证了系统信噪比和稳定性,测温精度也满足应用要求。

由图5可知,采用基于取样环的APD增益调节和温度校正解调相结合的方法,可使拉曼光纤温度传感系统在准确测温的基础上保证良好的信噪比和系统稳定性。

## 4 结 论

提出一种拉曼光纤温度传感系统,在传感光纤前端取20 m光纤置于温控系统中,利用取样环所得的拉曼散射信号对系统APD增益进行调节,保持APD增益的基本恒定,有效保证系统的信噪比;系统同时利用取样环信号对传感光纤测温线进行自校准解调,进一步消除了由不确定因素引起的测量误差,两种方案同时提高了传感系统的稳定性和测温精度,具有重要的实用价值。

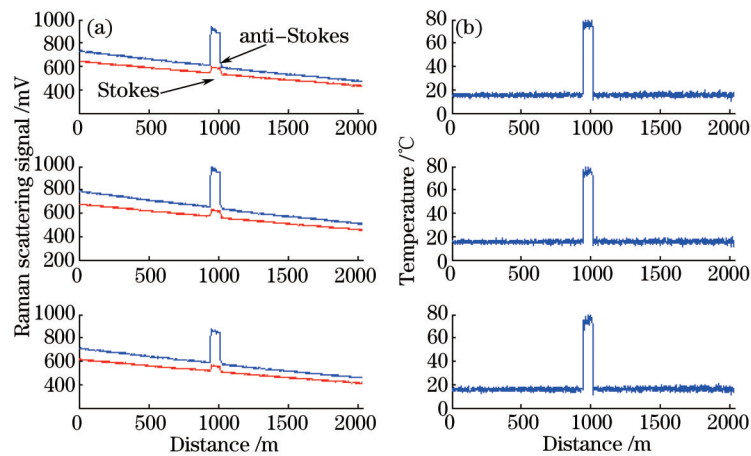


图5 基于取样环的APD增益调节与温度校正的拉曼散射信号和温度解调曲线。(a) APD增益波动下的拉曼散射信号曲线；(b) 对应的温度解调曲线

Fig.5 Raman scattering signal and temperature demodulation curves with sample-ring based APD gain adjustment and calibration. (a) Raman scattering signals with fluctuant APD gain; (b) corresponding temperature demodulation curves

### 参考文献

- 1 A H Hartog, A P Leach. Distributed temperature sensing in solid-core fibres[J]. Electronics Letters, 1985, 21(23): 1061-1062.
- 2 T D Vo, J He, E Magi, *et al.*. Chalcogenide fiber-based distributed temperature sensor with sub-centimeter spatial resolution and enhanced accuracy[J]. Opt Express, 2014, 22(2): 1560-1568.
- 3 Yu Xiangdong, Jin Shangzhong, Zhang Zaixuan, *et al.*. A distributed optical fiber Raman temperature sensor with cyclic simplex coding[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(7): 0706005.  
余向东, 金尚忠, 张在宣, 等. 采用单工循环编码解码的分布式光纤喇曼温度传感器[J]. 光子学报, 2014, 43(7): 0706005.
- 4 Liu Lei, Yu Miao, Yang Ruijuan, *et al.*. Wavelet denoising applied in optical fiber Raman temperature sensor system [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0605005.  
刘磊, 于淼, 杨瑞娟, 等. 小波去噪用于光纤拉曼温度传感系统[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0605005.
- 5 Wang Jianfeng, Liu Honglin, Zhang Shuqin, *et al.*. New type distributed optical fiber temperature sensor (DTS) based on Raman scattering and its' application[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(4): 865-871.  
王剑锋, 刘红林, 张淑琴, 等. 基于拉曼光谱散射的新型分布式光纤温度传感器及应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(4): 865-871.
- 6 F Tanimola, D Hill. Distributed fibre optic sensors for pipeline protection[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2009, 1(4-5): 134-143.
- 7 M A Soto, A Signorini, T Nannipieri, *et al.*. High-performance Raman-based distributed fiber-optic sensing under a loop scheme using anti-stokes light only[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(9): 534-536.
- 8 Zou Jian, Fu Xin. Experiment research on the APD's thermo-behaviour[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 1999, 21(2): 158-160.  
邹建, 扶新. 雪崩光电二极管温漂特性的实验研究[J]. 压电与声光, 1999, 21(2): 158-160.
- 9 Yu Xiangdong, Zhang Zaixuan, Zhu Haizhong, *et al.*. A temperature compensating circuit for distributed optical fiber Raman temperature sensor[J]. Chinese J 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.
- 10 Zhao Dazhi, Li Naiji, Zhao Dazun. Analysis of the optimum gain of APD in distributed fiber temperature sensors[J]. Chinese Journal of Structural Chemistry, 1996, 25(11): 1028-1031.  
赵达志, 李乃吉, 赵达尊. 基于背向拉曼散射的分布式光纤温度传感器APD最佳雪崩增益的分析[J]. 传感技术学报, 1996, 25(11): 1028-1031.
- 11 Chang Sheng, Li Weiliang. Distributed optical fiber temperature sensing technique and its applications[J]. Guangdong Electric Power, 2002, 15(4): 36-38.  
常胜, 李伟良. 分布式光纤温度传感检测技术及其应用[J]. 广东电力, 2002, 15(4): 36-38.

- 12 Li Shuibing, Wang Yu, Zhao Jiankang, *et al.*. Research on stability of the gain of APD in fiber Raman temperature sensor [J]. *Optoelectronics Technology*, 2009, 29(3): 168–170.  
李水冰, 王 宇, 赵健康, 等. 光纤拉曼测温系统中 APD 增益稳定的研究[J]. *光电子技术*, 2009, 29(3): 168–170.
- 13 A F Fernandez, P Rodeghiero, B Brichard, *et al.*. Radiation-tolerant Raman distributed temperature monitoring system for large nuclear infrastructures[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2005, 52(6): 2689–2694.
- 14 Zhang Zaixuan. The temperature effects 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.
- 15 Huang Song. Raman Distributed Fiber Temperature Sensor and Research on its Spatial Resolution[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2004: 49–52.  
黄 松. 拉曼分布式光纤温度传感器及其空间分辨率研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2004: 49–52.
- 16 Lan Tian, Wang Wei, Li Xiaoyan, *et al.*. Auto-calibration for Raman fiber optic distributed temperature sensor[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(11): 3079–3082.  
蓝 天, 王 巍, 李小彦, 等. 拉曼型分布式光纤温度传感器的自校准解调[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(11): 3079–3082.

栏目编辑: 苏 岑