

文章编号: 1001-3806(2012)04-0544-04

## 基于 EDFA 的分布式光纤喇曼温度解调技术

薛野<sup>1,2</sup> 江山<sup>1,2\*</sup> 印新达<sup>2</sup> 宋珂<sup>2</sup> 董雷<sup>2</sup>

(1. 武汉邮电科学研究院, 武汉 430074; 2. 武汉理工光科股份有限公司, 武汉 430074)

**摘要:** 为了消除掺铒光纤放大器的放大自发辐射噪声对分布式光纤温度传感器测温精度的影响,采用精确的修正公式进行温度解调是一种有效手段。通过分析掺铒光纤放大器的放大自发辐射噪声对系统产生的影响,并将计算的中间结果代入理论公式获得了修正后的温度解调公式。实验中分别采用理论公式和修正公式对温度进行分布式测量并获得了实验数据。结果表明,修正后的温度解调公式有效补偿了掺铒光纤放大器噪声引起的误差,并显著提高了系统的信噪比和测温精度;修正公式可将系统的整体测温精度提高到 $1^{\circ}\text{C} \sim 2^{\circ}\text{C}$ ;此外,实验中观察到多模光纤中喇曼背向自发散射同样会出现放大现象,这与单模光纤中的情形类似,且放大喇曼自发散射依然具有理想的温度效应。

**关键词:** 传感器技术; 温度解调公式; 放大喇曼自发散射; 放大自发辐射噪声

中图分类号: TP212.1<sup>+</sup>1; TN247

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.04.028

## Temperature demodulation technology of distributed optical fiber temperature sensors based on EDFA

XUE Ye<sup>1,2</sup>, JIANG Shan<sup>1,2</sup>, YIN Xin-da<sup>2</sup>, SONG Ke<sup>2</sup>, DONG Lei<sup>2</sup>

(1. Wuhan Research Institute of Post and Telecommunication, Wuhan 430074, China; 2. WUTOS Technology Co. Ltd., Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In order to eliminate the effect of amplified spontaneous emission (ASE) noise of Er-doped fiber amplifiers (EDFA) on the temperature measuring precision of distributed optical fiber temperature sensors, a precise modified formula is an effective means. Firstly, the influence of ASE noise in EDFA was analyzed, and then the temperature demodulation formula was modified with intermediate calculation results. Secondly, based on the theoretical and modified formula, the temperature was tested, and the results were compared. Analysis results indicate that the modified temperature demodulation formula can efficiently compensate errors due to ASE noise and improve the signal-to-noise ratio of the system and measurement precision of the temperature obviously. The experimental results show that the temperature precision is raised to  $1^{\circ}\text{C} \sim 2^{\circ}\text{C}$  by using the modified formula. Moreover, amplified Raman spontaneous scattering is also observed in multimode fibers as the same as in single mode fibers and causes amplified Raman spontaneous scattering curve distortion. However, amplified Raman spontaneous scattering exhibits ideal temperature effect.

**Key words:** sensor technique; temperature demodulation formula; amplified Raman spontaneous scattering; amplified spontaneous emission noise

### 引言

分布式光纤温度传感器(distributed optical fiber temperature sensor, DTS)是20世纪80年代出现的传感器技术,近年来获得了广泛应用<sup>[1]</sup>。DTS测温的基本原理是基于反斯托克斯喇曼背向散射光的温度效应和光时域反射技术(optical time domain reflection, OTDR)<sup>[2]</sup>。在多模光纤中,喇曼散射光强度比入射光强度小50dB以上。为了提高DTS系统的信噪比,通过掺铒光纤放大

器(erbium doped fiber amplifier, EDFA)来对入射光脉冲进行功率放大是一种行之有效的方法<sup>[3-4]</sup>。但是EDFA的放大自发辐射(amplifier spontaneous emission, ASE)噪声会导致光纤始端探测到的喇曼信号产生非线性畸变,最终导致理论上的温度解调公式不再适用。此时,就需要对多模光纤中的ASE噪声特性进行分析,进而得到温度解调的修正公式。

### 1 理论分析

在基于OTDR的DTS系统中,入射光脉冲在光纤中产生的背向喇曼散射强度不仅和入射光强有关,而且会受到温度、散射截面系数、光子频率等因素的影响。忽略脉冲宽度的影响,在光纤距离入射端 $L$ 处的

作者简介:薛野(1985-),男,硕士研究生,主要研究方向为分布式光纤传感。

\* 通讯联系人。E-mail: jshan@wri.com.cn

收稿日期:2011-11-23;收到修改稿日期:2011-12-23

反斯托克斯和斯托克斯散射光子数分别为<sup>[5-6]</sup>:

$$N_a = K_a S \nu_a^4 N_e R_a(T) \exp[-(\alpha_e + \alpha_a)L] \quad (1)$$

$$N_s = K_s S \nu_s^4 N_e R_s(T) \exp[-(\alpha_e + \alpha_s)L] \quad (2)$$

式中  $N_a$  和  $N_s$  分别为反斯托克斯和斯托克斯喇曼散射光子数;  $N_e$  为单个激光脉冲包含的光子数;  $K_s$ 、 $K_a$  分别为斯托克斯和反斯托克斯喇曼散射截面系数;  $S$  为光纤的背向散射因子;  $\nu_s$  和  $\nu_a$  分别为斯托克斯和反斯托克斯喇曼散射光子频率;  $\alpha_e$ 、 $\alpha_s$  和  $\alpha_a$  分别为入射光、斯托克斯和反斯托克斯喇曼散射光频率的光纤传输损耗系数;  $R_s(T)$ 、 $R_a(T)$  分别代表与光纤分子喇曼散射上、下能级布局数有关的系数, 其为温度  $T$  的函数, 并有<sup>[7-8]</sup>:

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

$$R_a(T) = \left[ \exp\left(\frac{h\Delta\nu}{kT}\right) - 1 \right]^{-1} \quad (4)$$

式中  $h$  为普朗克常数,  $k$  为玻尔兹曼常数,  $\Delta\nu$  为喇曼频移。

若采用相对温度测量, 假定参考温度为  $T_0$ , 参考点与光纤入射端的距离为  $L_0$ , 则有<sup>[9]</sup>:

$$\frac{\frac{N_a(T)}{N_s(T)}}{\frac{N_a(T_0)}{N_s(T_0)}} = \frac{\exp\left(-\frac{h\Delta\nu}{kT}\right) \exp[(\alpha_s - \alpha_a)L]}{\exp\left(-\frac{h\Delta\nu}{kT_0}\right) \exp[(\alpha_s - \alpha_a)L_0]} \quad (5)$$

从 (5) 式可以看出, 式子左边的比值仅仅取决于当前温度值和已知的参考温度值。在实际应用中, 光子数  $N$  都是用光电变换后电平的比值来替代光子数的比值<sup>[10-11]</sup>。若反斯托克斯和斯托克斯喇曼散射光子数  $N_a(T)$  与  $N_s(T)$  经光电转换后的电平值分别为  $V_a(T)$  与  $V_s(T)$ , 在光纤取样环处获得的电平值分别为  $V_a(T_0)$  与  $V_s(T_0)$ , 假设雪崩光电二极管 (avalanche photo diode, APD) 增益在某一次测量周期内保持不变, 则可根据 (5) 式求出温度的表达式:

$$T = \frac{\frac{h\Delta\nu}{k}}{\frac{h\Delta\nu}{kT_0} - (\alpha_s - \alpha_a)(L - L_0) + \ln\left[\frac{V_a(T_0)}{V_s(T_0)}\right] - \ln\left[\frac{V_a(T)}{V_s(T)}\right]} \quad (6)$$

(6) 式即为温度  $T$  的理论解调公式。

## 2 喇曼背向自发散射的放大现象

实验中 DTS 系统平台主要有脉冲半导体激光二极管 (laser diode, LD)、EDFA、双向耦合器 (bi-directional coupler, BDC)、波分复用器 (optical wavelength division multiplexer, OWDM)、光电转换及放大电路、高速采集卡及 CPU 等, 系统框图如图 1 所示。

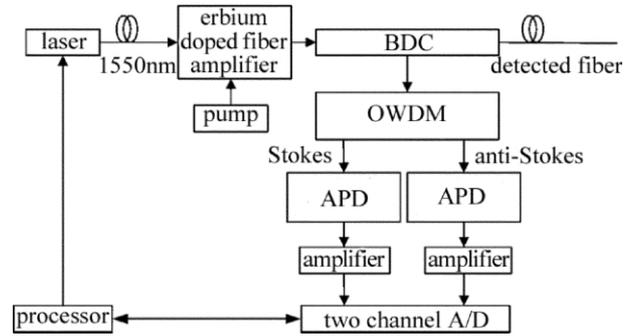


Fig. 1 Block diagram of a DTS system

实验中 LD 的中心波长为 1550nm, 峰值功率约为 100mW。光源脉冲宽度为 10ns, 重复频率为 10kHz。探测光纤采用上海光胜的 62.5 $\mu$ m/125 $\mu$ m 渐变折射率多模感温光纤, 型号为 GS-GWGL-1A1B。EDFA 采用同向抽运方式, 增益系数在 15dB ~ 30dB 范围内可调, 实验中采用的增益值为 20dB 左右。OWDM 仅允许斯托克斯和反斯托克斯喇曼散射光通过。模拟电路部分, APD 和放大电路的带宽均在 200MHz 以上。信号采集部分采用 115Mbit, 12bit 双路高速 A/D。为了保持信号同步, 实验中由 CPU 同步触发 LD 和 A/D。

相关研究资料表明, 在单模光纤中, 当入射光脉冲功率超过一定阈值时, 会出现喇曼背向自发散射光放大的现象<sup>[12]</sup>。实验中采用多模光纤, 同样观察到了类似现象, 如图 2 所示。图 2 中的曲线为 1356m 光纤的背向喇曼散射信号, 其中 1272m ~ 1276m 光纤段处于 65 $^{\circ}$ C 水浴槽内, 即曲线末端的尖峰位置。图中明显可以看到喇曼背向散射信号因放大而产生的非线性畸变。出现这种现象的原因是喇曼背向散射被同一光源抽运的喇曼散射放大, 即出现了放大的反斯托克斯喇曼背向自发散射<sup>[12-13]</sup>。此时, 光纤既是产生喇曼自发散射的介质, 同时也是自身的放大介质。由于放大的是喇曼背向自发散射, 因此放大后的喇曼散射信号仍然具有温度效应, 这一点已被实验结果所证实, 如图 3 所示。图 3 中的曲线为探测光纤 1275m 处, 在不同温度条件下测得的反斯

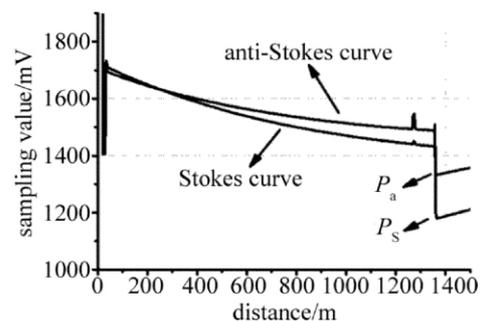


Fig. 2 Raman back scattering curve in 1356m optical fiber

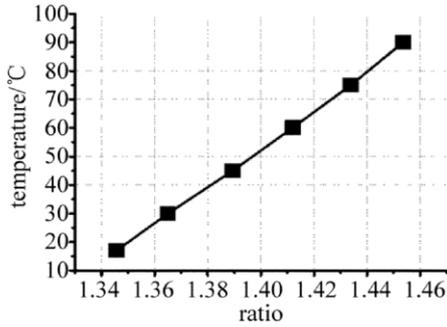


Fig. 3 Temperature effect of amplified Raman spontaneous scattering

托克斯和斯托克斯比值。其中纵坐标为实验时的环境温度 横坐标为该温度条件下测得的比值数据。从图中明显可以看出,放大后的反斯托克斯喇曼散射强度仍然与温度呈近似线性关系。

### 3 EDFA 的噪声分析

在实验中,如果直接采用(6)式进行温度解调,会得到图4所示的温度曲线。图中末端的两个峰值为65℃水浴槽内光纤卷解调出的温度值。图中的温度曲线出现了明显的类指数畸变,这是由于EDFA的ASE噪声产生的喇曼噪声信号对包含温度信息的有用信号造成了影响。也就是说,图2中的背向喇曼散射曲线实际上是脉冲光源产生的有用喇曼信号和ASE噪声产生的喇曼信号的叠加。为了消除ASE噪声对系统产生的影响,就必须定量地分析ASE噪声产生的喇曼信号。为了达到这一点,首先要分析ASE噪声本身。

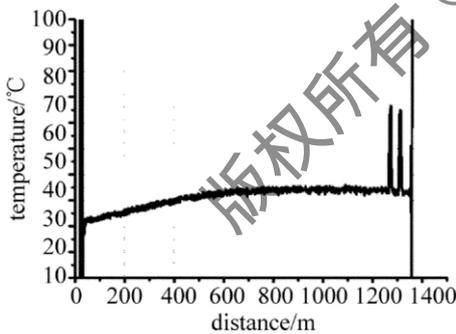


Fig. 4 Temperature curve demodulated by the theoretical formula

为了获得EDFA的ASE噪声特性,可以采用外接超短距离探测光纤的方式观察喇曼背向散射曲线。实验中采用的短距离光纤长度约为10m,如果不考虑其所处空间内的温度差别,根据(1)式和(2)式,即可认为探测到的喇曼背向散射强度与入射光的光强成正比。实验结果如图5所示,图中曲线左端的尖峰即是

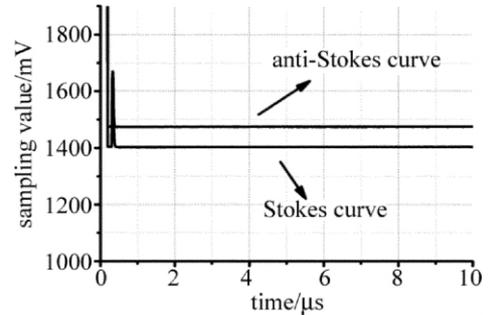


Fig. 5 Raman scattering induced by ASE noise of EDFA

脉冲光源产生的喇曼背向散射信号,后面的水平线实际上是由ASE噪声产生的喇曼背向散射信号。由于ASE为连续噪声,如果ASE噪声强度出现变化,其喇曼背向散射曲线也必然会发生变化。但是从图中可以看出,ASE噪声产生的喇曼背向散射曲线近似为一条水平线,这说明EDFA产生的ASE噪声为连续的恒定功率噪声。

由于ASE噪声为连续的光信号,因此可以把它看作由无数个窄脉冲在时域上的组合。假定EDFA的ASE噪声功率为恒定值 $P_n$ ,则其单个窄脉冲的能量为 $P_n dt$ ,代入(1)式即可得到每个窄脉冲产生的反斯托克斯喇曼背向散射信号,显然这个值与距离有关:

$$P_{n_a} dt = K_a S \nu_a^4 P_n R_a(T) \exp[-(\alpha_e + \alpha_a)L] dt \quad (7)$$

显而易见,对于整个ASE噪声而言,其产生的喇曼散射信号为 $P_n dt$ 在时域上的积分,在OTDR曲线上则表现为在空间距离上的积分。假定探测光纤的总长度为 $L_m$ ,则ASE产生的反斯托克斯喇曼背向散射噪声为:

$$E_{n_a} = \int_0^{L_m} K_a S \nu_a^4 P_n R_a(T) \exp[-(\alpha_e + \alpha_a)L] dL \quad (8)$$

通过同样的分析方法可获得ASE产生的斯托克斯喇曼背向散射噪声为:

$$E_{n_s} = \int_0^{L_m} K_s S \nu_s^4 P_n R_s(T) \exp[-(\alpha_e + \alpha_s)L] dL \quad (9)$$

由(8)式和(9)式可知, $E_{n_a}$ 和 $E_{n_s}$ 的值分别与 $R_a(T)$ 和 $R_s(T)$ 有关,即与整条光纤的温度场分布有关。因此,为了消除ASE噪声的影响,在测量中需要实时计算 $E_{n_a}$ 和 $E_{n_s}$ 的值。对于某一次测量周期而言,当探测光纤中光源产生的喇曼信号消失后,光纤始端探测到的喇曼散射信号即可视为ASE噪声产生的喇曼散射信号,即为 $E_{n_a}$ 和 $E_{n_s}$ 的值。为了软件上便于实现,试验中采用图2中 $P_a$ 和 $P_s$ 点的值作为 $E_{n_a}$ 和 $E_{n_s}$ 的值,并以此来解调温度。此时,(6)式可重写如下:

$$T = \frac{\frac{h\Delta\nu}{k}}{\frac{h\Delta\nu}{kT_0} - (\alpha_a - \alpha_s)(L - L_0) + \ln\left[\frac{V_a(T_0) - V_{n_a}}{V_s(T_0) - V_{n_s}}\right] - \ln\left[\frac{V_a(T) - V_{n_a}}{V_s(T) - V_{n_s}}\right]} \quad (10)$$

(10)式即为理论公式(6)式的修正公式,式中的 $V_{n_a}$ 和 $V_{n_s}$ 分别表示光纤始端在图2中 $P_a$ 和 $P_s$ 点处探测

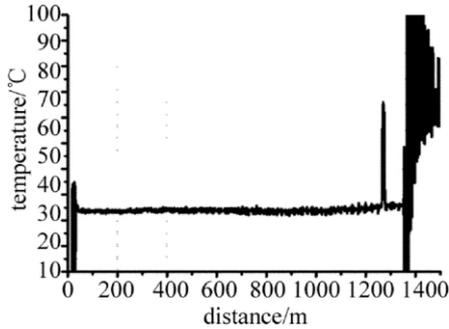


Fig. 6 Temperature curve demodulated by the modified formula

到的电平采样值。(10)式解调出的温度曲线如图6所示。对比图4可以看出,温度曲线产生的类指数畸变得到了很好的修正。

#### 4 结论

实验结果表明,在多模光纤中,同样会出现喇曼背向自发散射的放大现象,且其散射强度与温度具有近似线性关系。进一步实验发现,连续EDFA噪声产生的喇曼背向散射噪声会随着距离的增加而加强,且其强度与距离呈积分关系,这导致了探测到的喇曼信号与温度不再具有线性关系,而是会出现类指数畸变。通过寻找喇曼背向散射曲线上光纤末端的极小值用来修正温度解调公式,采用修正后的公式可有效消除EDFA噪声对温度曲线造成的影响,实验结果也证明了这一点。

#### 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 (in Chinese).
- [2] JIA Z A, ZHOU X B, QIAO X G, *et al.* Current status and developing trend of distributed optical fiber temperature sensor [J]. Optical

Device, 2008, 5(11): 36-39 (in Chinese).

- [3] MSOTAF A F, TORSTEN G. Spontaneous Raman scattering in optical fibers with modulated probe light for distributed temperature Raman remote sensing [J]. Journal of Lightwave Technology, 1999, 17(8): 1379-1391.
- [4] LU H B, CHU X C, HUANG R, *et al.* The present situation and developing trend of distributed fiber optic sensors [J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 1998, 18(2): 1-8 (in Chinese).
- [5] ZHANG L X, LIAO Y, LIU Y Z, *et al.* Circulation demodulation method for 1.55  $\mu\text{m}$  Raman temperature sensors [J]. Laser Technology, 2006, 30(2): 165-167 (in Chinese).
- [6] ZHANG Z X, FENG H Q, YU X D, *et al.* Distributed optical fiber Raman photonic sensor system [J]. Semiconductor Optoelectronics, 1999, 20(2): 83-85 (in Chinese).
- [7] GABRILELE B, JONGHAN P, MARCELO A S. Analysis of distributed temperature sensing based on Raman scattering using OTDR coding and discrete Raman amplification [J]. Measurement Science and Technology, 2007, 12(18): 3211-3218.
- [8] BRANARD C, MYSLINSKI P, CHROSTOWSKI J, *et al.* Analytical model for rare-earth-doped fiber amplifiers and lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1994, 30(8): 1817-1830.
- [9] DAKIN J P. Distributed optical fiber temperature sensor using a semiconductor light source and detector [J]. Electron Letters, 1985, 21(13): 569-570.
- [10] ZHANG Z X, ZHANG B X, CHEN Y, *et al.* Research of temperature effect on back-direction laser spontaneous Raman scattering in optical fiber [J]. Acta Optica Sinica, 1996, 24(3): 273-278 (in Chinese).
- [11] LIAO Y B, LI M, ZHANG M, *et al.* Optical fiber sensing techniques and applications [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009: 35-36 (in Chinese).
- [12] ZHANG Z X, KIM I S, WANG J F, *et al.* Temperature effect of amplified anti-Stokes Raman spontaneous backscattering in the single mode fiber [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(5): 609-613 (in Chinese).
- [13] CATHY C. Distributed temperature sensor interrogator based on polarization-sensitive reflectometry [J]. IEEE Sensors Journal, 2009, 9(9): 1125-1129.