

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*

张在宣¹ Insoo S. Kim² 王剑锋¹ 刘红林¹ 余向东¹ 郭 宁¹

(¹ 中国计量学院光电子技术研究所, 杭州 310034
² 韩国电气技术研究院光技术研究中心, 汉城 韩国 437-808)

摘要: 在单模光纤中, 输入的激光功率大于阈值时, 出现放大的反斯托克斯拉曼背向自发散射现象。实验发现: 放大的反斯托克斯拉曼背向自发散射具有温度效应, 与反斯托克斯拉曼背向自发散射一样, 放大的拉曼散射光的光子通量受到光纤温度的调制。反斯托克斯拉曼背向自发散射的放大效应抑制了单模光纤中的相干噪声, 改善了系统的信噪比。实验还发现, 放大的反斯托克斯拉曼背向自发散射空域曲线上放大的端点位置随激发功率的增高前移并具有一定的规律性。放大的反斯托克斯拉曼背向自发散射的温度效应作为一种新的测温原理, 已应用于远程 30 km 分布光纤温度传感器系统。

关键词: 拉曼背向自发散射; 光时域反射技术; 反斯托克斯拉曼背向自发散射温度效应; 远程分布温度传感器
中图分类号: O561.1; O437.3 文献标识码: A

Temperature Effect of Amplified Anti-Stokes Raman Spontaneous Backscattering in the Single Mode Fiber

Zhang Zaixuan¹ Insoo S. Kim² Wang Jianfeng¹ Liu Honglin¹ Yu Xiandong¹ Guo Ning¹

(¹ Institute of Optoelectronics Technology, China Institute of Metrology, Hangzhou 310034
² Optical Technology Research Group, Korea Electrotechnology Research Institute, Seoul, 437-808, Korea)

(Received 17 February 2003; revised 6 June 2003)

Abstract: Amplified anti-Stokes Raman spontaneous backscattering phenomena has been observed in single mode fiber, during input laser power is large than threshold power. In experiment it is discovered, the temperature effect of the amplified anti-Stokes Raman spontaneous backscattering is excised as some as anti-Stokes Raman spontaneous backscattering. The photon flux of amplified anti-Stokes Raman spontaneous backscattering is modulated by optical fiber temperature. The coherent noise of single mode fiber is restrained by the amplification effect of anti Stokes Raman backscattering, and the signal noise ratio of sensor system is improved. Experimental discover, the extremity point position on the amplified anti-Stokes Raman spontaneous backscattering space domain reflection curve is forward shifted with laser power raised, and obeys certain rule. The temperature effect of the amplified anti-Stokes Raman spontaneous backscattering has been applied to long range 30 km distributed optical fiber Raman temperature sensor system as a new principle of temperature measurement.

Key words: Raman spontaneous backscattering; optical time domain reflection technology; anti-Stokes Raman spontaneous backscattering; long range distribution temperature sensor

1 引 言

光纤拉曼散射效应在测温学中一个重要的应用是利用光纤的拉曼散射温度效应和光时域反射原理研制一种分布式光纤温度传感器系统^[1~3]。近年来

* 浙江省重点科研项目(011101981)与韩国科学技术部韩中光技术研究中心基金资助课题。

E-mail: zhangzx@mail.hz.zj.cn

收稿日期: 2003-02-17; 收到修改稿日期: 2003-06-06

由于应用的需要,分布式光纤温度传感器系统由短程、中程向远程发展^[4,5]。由于光纤的长度不断增加,一个严重的问题是光纤损耗的增加,例如30 km分布式光纤温度传感器系统的光纤尾端的传输损耗约为15 dB(若抽运的激光波长为1550 nm,前向30 km光纤传输损耗约为6 dB,背向反斯托克斯拉曼波长为1450 nm,背向30 km光纤传输损耗约为9 dB);另一方面,单模光纤背向拉曼散射的强度比抽运的激光的强度小45 dB,而光纤的拉曼散射温度效应又比较弱,因为是一个微弱信号的检测问题。为了提高系统的信噪比,需要提高抽运的激光强度。国外采用的方法是采用1550 nm的激光二极管,用1550 nm的掺铒光纤放大器(EDFA)进行功率放大。本文采用了与国外不同的方法,直接采用脉冲掺铒光纤激光器,它的峰值功率高,光谱宽度窄,光谱功率密度高,它带来的问题是,在单模光纤中产生非线性光学效应和相干噪声。放大的光纤反斯托克斯拉曼背向散射既使信号获得增益,又抑制了单模光纤背向拉曼散射的相干噪声,提高了系统的信噪比,但是,放大的光纤反斯托克斯拉曼背向散射是否还存在温度效应呢?实验证明,光纤放大的反斯托克斯拉曼背向散射存在温度效应,而且可以作为一种分布光纤温度传感器的新的测温原理^[5]。

2 单模光纤放大的背向反斯托克斯拉曼自发散射的温度效应

2.1 单模光纤放大的背向反斯托克斯拉曼自发散射^[6]

从实验中发现,当进入光纤的激光功率超过一个阈值时,在一定的激光功率范围内,光纤的反斯托克斯拉曼背向自发散射时域曲线出现放大的反斯托克斯拉曼自发散射现象。实验中采用的光源是脉冲掺铒光纤激光器,激光器的中心波长为1547.4 nm,线宽为0.075 nm,脉冲重复率为2 kHz,脉冲宽度为10 ns,单模光纤的型号为G652,光纤长度为25.2 km,激光出纤功率从0~100 W连续可调。光纤激光光源通过一个光纤波分复用器进入单模光纤,光纤波分复用器由1×2双向耦合器和一块干涉型光学滤波器组成,背向散射的回波光再通过光纤波分复用器,光学滤波器只允许1450 nm波段背向的反斯托克斯拉曼散射光通过。背向的反斯托克斯拉曼散射光是十分微弱的,通过低噪音的光电接收、放大、采集、累加、模数转换、信号处理,得到的反斯

托克斯拉曼背向自发散射(Anti-Stokes Raman spontaneous backscattering,简称ASR)空域或时域反射光时域反射技术(OTDR)曲线(在光纤中,空域与时域是相对应的,在空域中,光纤长度 $L = (C/2n) \cdot \Delta t$,式中 C 为光速, n 为对应波长光纤的折射率, Δt 为光波在长度为 L 的光纤中回波的时间间隔)。当激光功率较小时,如 $P < 1$ W时,反斯托克斯拉曼背向自发散射空域反射曲线处于正常状态,信号的对数值随距离的变化为一直线,如图1所示。

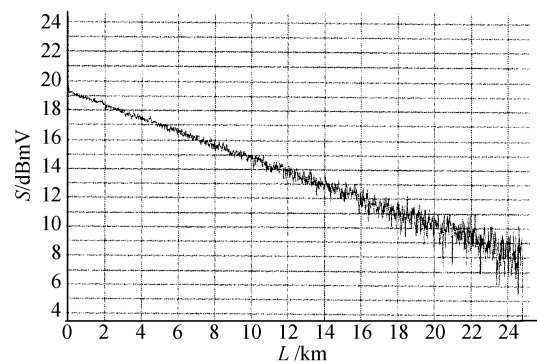


Fig. 1 ASR OTDR curve without amplification

当激光功率 $P > 1$ W阈值时,光纤反斯托克斯拉曼背向自发散射信号的对数随距离的变化偏离直线,如 $P = 2.36$ W时的反斯托克斯拉曼背向自发散射信号对数空域反射曲线发生变化,从光纤的一定的位置(端点位置),反斯托克斯拉曼背向自发散射强度出现放大现象。这种现象的物理本质是:在单模光纤中,反斯托克斯拉曼背向自发散射被同一激光光源抽运的反斯托克斯拉曼散射放大,也就是放大的反斯托克斯拉曼背向自发散射,在这种情况下,单模光纤既是自发反斯托克斯拉曼散射介质又是自生的放大的介质,如图2所示。

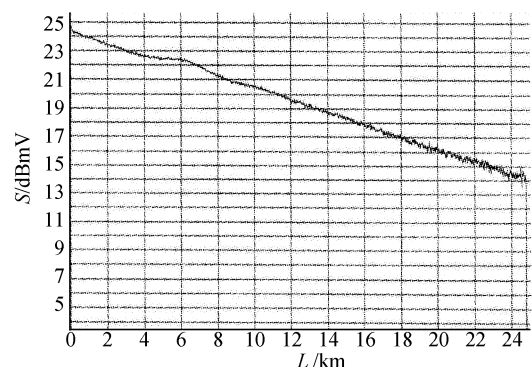


Fig. 2 ASR OTDR curve with amplification

在反斯托克斯拉曼背向自发散射光时域反射技术曲线上放大的端点位置,随激发功率的增高,端点位置向光纤的起始点移动,从实验中测量了不同激

发功率时,放大端点位置的变化规律,入射激光功率增大,端点位置移向光纤的前端,放大的反斯托克斯拉曼背向自发散射的光纤区域增长,如图 3 所示。通过拟合,发现符合如下的规律: $Y=17.39X^{-1.1483}$ 符合程度: $R^2=0.9956$ 。式中 Y 为端点位置, X 为激光功率。图中的黑点是实测的值,曲线为拟合曲线,符合程度很高,关于实验规律的解释尚待进一步理论分析。

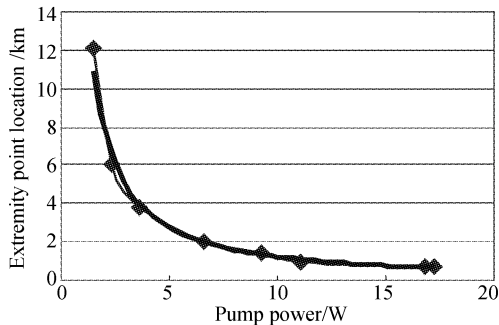


Fig. 3 The extremity point vs pump power

当激光功率 $P=17.2\text{ W}$ 时,光纤为 G652 单模光纤,光纤总长度为 25.2 km 时,所得到的反斯托克斯拉曼背向自发散射空域曲线如图 4 所示。在光纤前端,光纤的增益为 0 dB ,即没有观察到反斯托克斯拉曼背向自发散射的放大现象,而且存在相干噪声;当 L 处于端点位置附近时,开始观察到反斯托克斯拉曼背向自发散射的放大现象,前端有反斯托克斯拉曼背向自发散射信号的衰减振荡现象。当激光功率 $P>18\text{ W}$ 时,由于光纤中各种光波非线性相互作用,反斯托克斯拉曼背向自发散射光时域反射技术曲线出现非线性畸变。

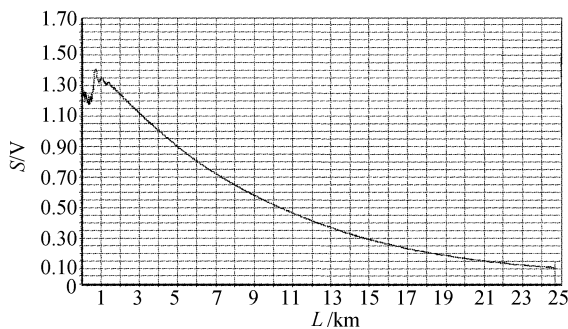


Fig. 4 Amplified ASR backscattering OTDR curve

2.2 单模光纤放大的背向反斯托克斯拉曼自发散射的温度效应

实验证明光纤放大的反斯托克斯拉曼背向自发散射同样存在温度效应。光纤中放大的反斯托克斯拉曼背向自发散射的温度效应被观察到^[5]。作为一

种分布式光纤温度传感器的新的测温原理已经被实验证实。

在光纤中放大的反斯托克斯拉曼散射光子通量 ϕ_a 为

$$\phi_a(T) = K_a G S \nu_a^4 \phi_e \exp[-(\alpha_0 + \alpha_a)L] R_a(T), \quad (1)$$

式中 K_a 为与光纤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; ν_a 为反斯托克斯拉曼散射光子频率; α_0 、 α_a 分别为入射光、反斯托克斯拉曼散射光的光纤传输损耗; L 为光纤的长度;理论和实验上均证明, $R_a(T)$ 是光纤反斯托克斯拉曼散射强度的温度调制函数,与光纤分子低能级和高能级上的布居数有关,是光纤的温度函数:

$$R_a(T) = \left[\exp\left(\frac{h\Delta\nu}{kT}\right) - 1 \right]^{-1}, \quad (2)$$

式中 h 为普朗克常量; k 为波耳兹曼常量, $\Delta\nu$ 为拉曼声子频率。与光纤背向反斯托克斯自发散射温度效应^[7]不同的是,光纤背向反斯托克斯自发散射光子通量被放大了,在(1)式中多了一个 G 增益因子。

当 $T = T_0$ 时,由(1)式得

$$\phi_a(T_0) = K_a G S \nu_a^4 \phi_e \exp[-(\alpha_0 + \alpha_a)L] R_a(T_0), \quad (3)$$

(3)式除(1)式得到放大的反斯托克斯拉曼自发散射的光子通量比:

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

由(4)式,由实验上测定 $\phi_a(T)/\phi_a(T_0)$,则可测定光纤的温度。

图 5 为 $T=T_0$ 时,光纤没加温的反斯托克斯拉曼背向自发散射的空域反射曲线(称为基线),图 6 为光纤前端和后端加温后的反斯托克斯拉曼背向自发散射的空域反射曲线图。图 7 为用反斯托克斯拉曼背向自发散射的时域曲线基线解调后的传感光纤的温度分布曲线。图 8 为温度定标拟合曲线和线性度,线性度达到 0.9996 。

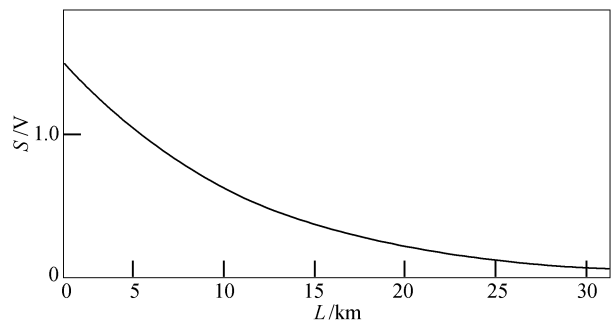


Fig. 5 ASR OTDR curve ($T=26\text{ }^\circ\text{C}$)

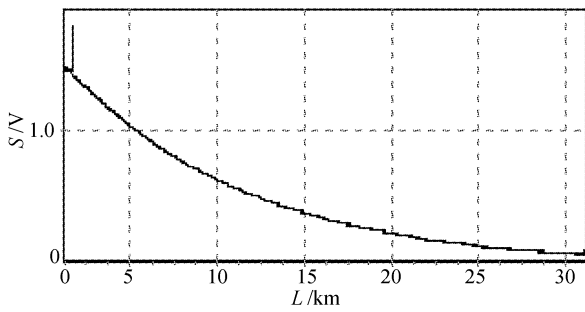
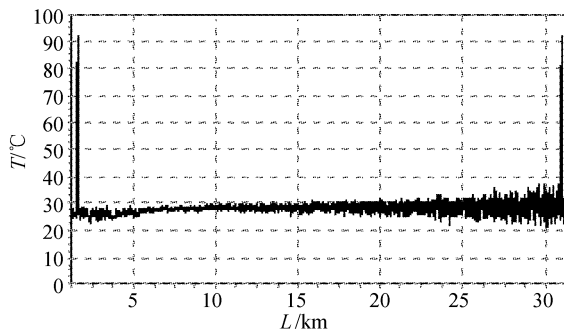
Fig. 6 ASR OTDR curve ($T=93\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Fig. 7 Temperature distribution curve

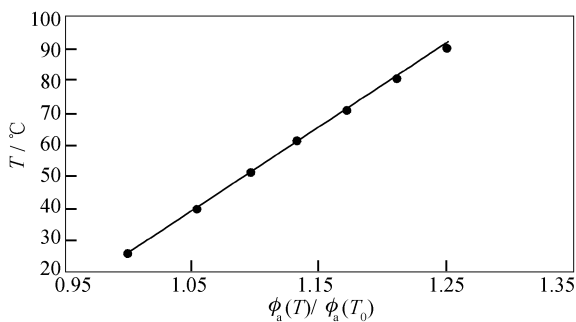


Fig. 8 Temperature calibration curve

3 远程 30 km 分布光纤拉曼温度传感器系统

3.1 系统的结构设计

系统分为主机、传感光纤和信号采集处理部分。

3.1.1 主机

由光源、光纤波分复用系统以及光电接收和放大模块构成。

1) 光源模块。采用脉冲掺铒光纤激光器,激光中心波长 1547.4 nm,光谱带宽 0.075 nm,脉冲重复率 2 kHz,脉冲宽度 10 ns,激光输出功率 0~100 W 可调。

2) 光纤波分复用器(OWDM)模块。1×2 双向耦合器和光纤光学干涉滤光器(FWDM)组成。双向耦合器一端与光纤激光器相连,另一端与传感光纤相连,背向散射回波光与光纤干涉滤光器相连,FWDM 只允许反斯托克斯拉曼背向散射光通过。

3) 光电接收、放大模块。由带尾纤和前置放大器的光雪崩二极管(APD)以及高增益、宽带、低噪声的放大器组成。

为了确保稳定性,主机部分放置在专门设计制造的智能化超级恒温槽内,温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

3.1.2 光纤传感探头

光纤的长度为 31 km,由线型光纤温度传感探头和光纤绕组温度传感探头组成。根据不同的应用场合采用不同包装的光缆。根据不同应用的需要可采取接触测温方式,也可采用非接触测温方式(例如:对流传热,辐射传热方式)。

3.1.3 信号采集和处理部分

可以分为硬件和软件两部分,其中硬件由数据采集累加卡和计算机构成,软件由数据采集累加卡控制和数据采集程序,保存和管理数据的数据库管理系统,数据处理和显示软件等三部分构成。

3.2 系统的实验结果及比较

远程 30 km 分布光纤拉曼温度传感器系统已经研制成功,并经浙江省技术监督研究院检测和专家委员会技术鉴定,它的主要技术指标如下:光纤长度:31 km,测温范围:0~100 °C(可扩展),温度定标拟合曲线见图 8,温度不确定度小于 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$;温度分辨率:0.1 °C,测量时间为 432 s,空间分辨率为 4 m。鉴定的主要结论是:“本系统在传感长度、测量时间和空间分辨率等主要技术指标处于国内领先,达到当前的国际先进水平。”

远程分布光纤拉曼温度传感器系统的实验结果与英国 SENSE 公司和 BICC 公司的相关产品,对比如表 1 所示。

Table 1 The Performance of long range distributed optical fiber temperature sensor system

	Fiber length /km	Wavelength /nm	Temperature uncertainty /°C	Temperature resolution /°C	Spatial resolution /m	Measuring time /s	Main unit operation temperature range /°C
FTR300(BICC)	30	1550(LD+EDFA)	± 1	0.1	5	600	0~30
DTS800(SENSA)	30	1550(LD+EDFA)	± 2	2.0	8	600	
FGC-W30(CIM)	31	1550(Fiber laser)	± 2	0.1	4	432	0~40

结论 实验发现,放大的反斯托克斯拉曼背向自发散射空域曲线上放大的端点位置随激发功率的增高前移并具有一定规律性。实验进一步发现,放大的反斯托克斯拉曼背向自发散射具有温度效应,与反斯托克斯拉曼背向自发散射一样,放大的拉曼散射光的光子通量受到光纤温度的调制。反斯托克斯拉曼背向自发散射的放大效应抑制了单模光纤中的相干噪声,改善了系统的信噪比。放大的反斯托克斯拉曼背向自发散射的温度效应作为一种新的测温原理,已应用于远程分布光纤温度传感器系统。

参 考 文 献

- 1 Dakin J P, Pratt D J, Bibby G W. Distributed anti-Stokes ratio thermometry. Proc. of OFC3, San Diego, Post deadline paper PDS-3, 1985
- 2 Zhang Zaixuan, Liu Tianfu, Zhang Buxin *et al.*. Laser Raman type distributed optical fiber temperature sensor system. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1995, **15**(11): 1586~1589 (in Chinese)
- 3 Zhang Zaixuan, Liu Tianfu, Chen Xiaozhu *et al.*. Laser Raman spectrum of optical fiber and the measurement of temperature field in space. *Proc. SPIE*, 1994, **2321**: 185~188
- 4 Zhang Zaixuan, Kim I S, Liu Honglin *et al.*. 30-km distributed optical fiber Raman photon temperature lidar. *Proc. SPIE*, 2002, **4893**:78~82
- 5 Zhang Zaixuan, Kim I S, Liu Honglin *et al.*. Optimum designs of 30 km distributed optical fiber Raman photon temperature sensors and measurement network. *Proc. SPIE*, 2002, **4920**:268~273
- 6 Zhang Zaixuan, Jin Shangzhong, Wang Jianfeng. Study of 1410 nm wavelength region distributed fiber Raman Gain amplifier. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(6): 766~768 (in Chinese)
- 7 Zhang Zaixuan. The temperature effect of optical fiber back-scattering and the applied research for distributed optical fiber temperature sensor network. *Chin. J. Atomic and Molecular Physics*(原子与分子物理学报), 2000, **17**(3):559~565 (in Chinese)