

光纤中拉曼散射回波超高灵敏度探测技术研究

张悦, 张记龙, 李晓, 王志斌, 王鹏

中北大学教育部仪器科学与动态测试重点实验室,
山西省光电信息与仪器工程技术研究中心, 山西太原 030051

摘要 与布里渊散射不同, 石英光纤中斯托克斯拉曼散射与光纤所受应力无关, 只是绝对温度的函数, 而且其拉曼频移为 1.395×10^{13} Hz, 比布里渊散射易于提取, 作为分布式光纤温度传感器的传感信号有一定的优势, 但斯托克斯拉曼散射信号比布里渊弱, 其峰值功率在 APD 中产生的光电流在 nA 级, 低于 APD 的噪声电流, 经光电转换后信号的信噪比小于 1, 傅里叶变换以及小波变换都无法有效地处理这类信号。通过对斯托克斯拉曼散射信号进行特征分析后, 采用累加与小波降噪的综合方法提取该信号, 实现在 APD 噪声电流以下的超灵敏度探测, 达到每度 0.104 nA 的温度灵敏度, 低于本系统所有 APD 噪声电流 2.3 nA 的 1 个数量级。

关键词 拉曼散射; 光纤; 噪声电流; 小波变换

中图分类号: O433.1 **文献标识码**: A **DOI**: 10.3964/j.issn.1000-0593(2009)05-1300-04

引言

不同结构的物质具有不同的拉曼散射^[1, 2], 由于拉曼散射的强度与绝对温度有关^[3, 4], 沿光纤长度上纤芯中各点 SiO₂ 曼散射强度也就与光纤纵向的温度分布情况有关^[4, 5], 从而可以实现大纵深空间的温度分布情况^[6-9]。然而光纤中的拉曼回波信号非常微弱, 峰值通常在 nW 以下, 其注入雪崩二极管产生的光电流通常低于该管子的暗电流, 并且由于受带宽的限制, 转阻放大器的反馈电阻一般被限制在 10 kΩ 以下^[10], 光电转换后的信噪比通常小于 1, 为提高系统信噪比, 通常采用多次累加平均的方法^[11], 以提高信噪比的效果与累加次数的平方根成正比, 但累加次数增大到一定点数值时, 这种改善将不再明显, 相反系统的处理时间将变得难以忍受^[12]。

1 光纤中 SiO₂ 的拉曼散射与温度的关系

光在光纤中传播时, 部分光与传输介质发生碰撞产生散射, 分为雷利散射、布里渊散射和拉曼散。雷利散射是由于光子与 SiO₂ 分子发生弹性碰撞, 使光的传输方向发生了改变, 而光子能量不变, 其强度只与发生碰撞的 SiO₂ 分子数有关; 布里渊散射是光子与 SiO₂ 发生非弹性碰撞, 吸收/释放

声子, 产生频移, 其大小取决于 SiO₂ 的密度, 而 SiO₂ 的密度同时与温度和所受应力有关, 因此单凭布里渊散射的大小难以区分是由该处的温度引起还是应力引起^[13, 14]; 拉曼散射也是光子与 SiO₂ 发生非弹性碰撞, 但其在碰撞过程中吸收/释放的是高能光声子, 使得入射光的频率发生频移, 而且频移的大小是固定的, 完全取决于 SiO₂ 的结构, 对晶体态的 SiO₂ 最强拉曼散射的频移为 1.395×10^{13} Hz, 由于熔融 SiO₂ 分子结构复杂, 拉曼频移略有不同; 强度与发生碰撞 SiO₂ 分子数及温度有关。释放光声子, 入射光的频率降低, 称为斯托克斯散射, 吸收光声子, 频率增加, 称为反斯托克斯散射, 二者的强度表达式为

$$P_S = P_0 \exp[-(\alpha_0 + \alpha_S)L] K_S \Psi_S(t) \quad (1)$$

$$P_A = P_0 \exp[-(\alpha_0 + \alpha_A)L] K_A \Psi_A(t) \quad (2)$$

$$\Psi_S(t) = [1 - \exp(-h\Delta\nu/kt)]^{-1} \quad (3)$$

$$\Psi_A(t) = [\exp(h\Delta\nu/kt) - 1]^{-1} \quad (4)$$

P_S 和 P_A 分别是在光纤初始端测得的斯托克斯散射和反斯托克斯散射的光子数, P_0 为光纤初始端注入的光子数, K_S 和 K_A 是与特定光纤有关的斯托克斯和反斯托克斯系数, α_0 , α_S , α_A 分别是光纤初始注入的光、斯托克斯拉曼散射光及反斯托克斯拉曼散射光的衰减系数, ψ_S 和 ψ_A 分别是 SiO₂ 分子处于低能级和高能级上的布居数, h 为普朗克常数, $\Delta\nu$ 为拉曼频移, k 为波尔茨曼常数, t 是发生散射时的绝对温度。将(1)式与(2)相除即可消除光功率波动的影响。

收稿日期: 2008-05-10, 修订日期: 2008-08-20

基金项目: 科技部国际合作项目(2006DFB72510), 山西省国际合作项目(2006081015)和太原市科技兴市专项项目(07010709)资助

作者简介: 张悦, 1964年生, 中北大学高级工程师 e-mail: cntyzy200@yahoo.com.cn

2 基于拉曼散射的分布式温度传感器系统结构

激光器在控制器的作用下发出一个光脉冲(图 1), 通过 1×3 分支器注入到光纤中, 沿光纤向前传播, 并沿途与 SiO_2 发生碰撞产生散射, 其后向散射部分沿光纤原路返回至 1×3 耦合器后, 进入滤波器, 提取出斯托克斯拉曼散射信号与反斯托克斯拉曼散射信号, 经光电转换后进入数据采集和信号处理单元进行处理。为对系统进行标定, 通常在将光纤尾部一段光纤置于已知温度值的恒温箱中。本研究在室温 28.5°C 的环境下, 探测光纤长 1.1 km , 将 $10\text{ m} \sim 1\text{ 029 m}$ 的光纤置于 50°C 的恒温水箱中, 以便在该处产生一个 22.5°C 的温度包, 采集到的斯托克斯及反斯托克斯拉曼散射回波信号如图 2 所示。

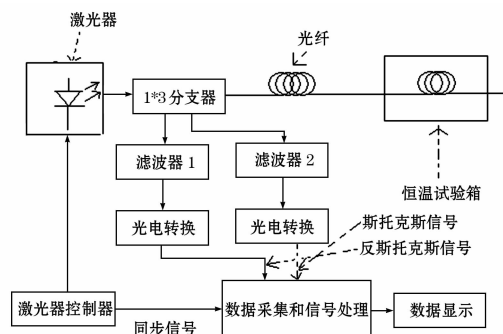


Fig. 1 Block diagram of the system

3 信号处理

尽管从(1)和(2)式可以求出明确的温度随光纤长度变化的表达式, 但由于拉曼散射非常微弱, 常用 APD 进行光电转换, 转换后的信号淹没在大量噪声中, 我们从图 2 中完全识别不出在 1 023 m 处有一个温度包的存在, 这类信噪比极差的信号, 无论是采用傅里叶变换去噪还是采用小波去噪都无法获得令人满意的结果。然而由于温度是缓变的信号, 可以认为在数十 ms 内维持不变。为此, 首先对信号进行 100 次的累加平均, 得到如图 3 所示的信号, 从图 3 中已经可以识别处在 1 023 m 处的一个温度包的存在, 但信噪比依然较差。

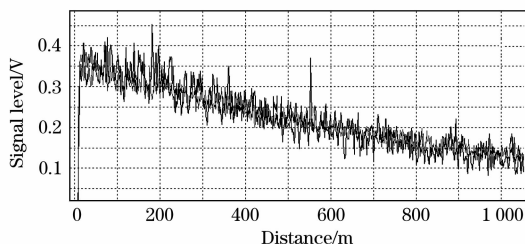


Fig. 2 Signals of the Stokes & anti-Stokes

为进一步提高信噪比, 首先对(1)和(2)进行数学分析, 通过观察, 可以发现二者在数学形式上基本一致, 我们以反

斯托克斯信号为例进行数学抽象。对于给定的系统, $P_0, K_A, \alpha_0, \alpha_A$ 均为常数, 以 P 表示 $P_0 * K_A, \alpha$ 表示 $\alpha_0 + \alpha_A$, 上式可简化为

$$P_A = P \exp[-\alpha l] [\exp(h\Delta\nu/kt) - 1]^{-1} \quad (5)$$

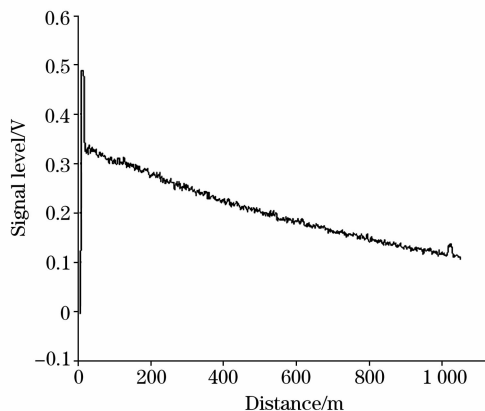


Fig. 3 Signal after being accumulated 100 times and averaged

在实际应用中, 为了对系统进行标定, 通常将光纤上某一段 l_1 和 l_2 光纤置于恒温中, 而将其他段置于环境温度下, 因而(5)式中的 $[\exp(h\Delta\nu/kt) - 1]^{-1}$ 只是两个不同的常数, 为简化起见, 令其在环境温度下的常数为 1, 恒温中的为常数 T , 也就是(5)式可表示为

$$P_A = P \exp[-\alpha l] T \quad (6)$$

当 $l_1 \leq l$ 及 $l \geq l_2$ 时 $T = 1$, 其他位置时, T 为常数, 则(6)式即反斯托克斯信号是一个的 e 指数衰减信号乘以一个脉冲的宽度、高度及位置都不确定的需要实际测量的一个信号, 其理想化图形如图 4 所示。

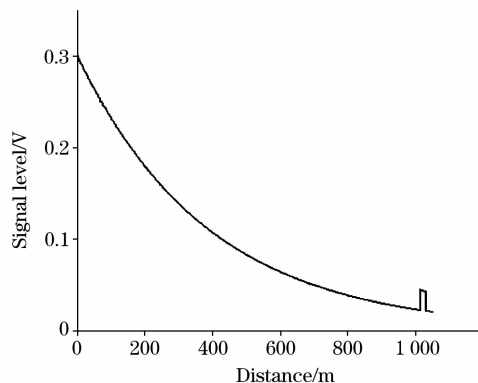


Fig. 4 Ideal shape of anti-Stokes

由于脉冲信号是频谱丰富的信号, 无论采用高通、低通或是带通滤波器, 都有可能滤掉有用信息。相反, 小波变换是用已知形状的一系列波形与被测对象逐段比较, 以观察其相似性, 较适合处理这类信号。根据上述分析, 显然这类信号用 Haar 更为合适, 但由于实际转换电路总是存在一些积分效应, 实际的脉冲没有理想化的那么陡峭, 通过用 MATLAB 软件通过实验发现, 用 db2 去噪后的波形更为接近实际情况。图 5 是采用小波去噪的方法对图 3 的信号处理的结果, 图 6 是温度包的局部图。

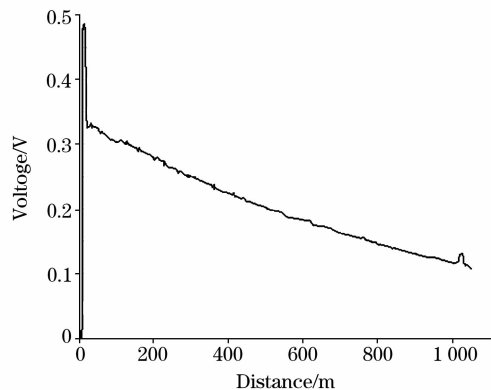


Fig. 5 De-noised signal

对比图 5 和图 3 可以看出, 经过小波降噪后, 信号的信噪比有了明显改善。

经过小波降噪后 $22.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温包使系统信号电压变化 23.6 mV , 转阻放大器的反馈电阻为 $10\text{ k}\Omega$, 光电转换后再放大 1 000 倍, 可以反算出 APD 输出的电流为 $23.6\text{ mV}/10\text{ k}\Omega/1\text{ 000}=2.36\text{ nA}$, 而本系统采用的 APD 的暗电流为 15 nA , 噪声电流为 $2.3\times 10^{-13}\text{ A/Hz}^{1/2}$, 本系统具有 100 MHz 的带宽, 总的噪声电流为 2.3 nA , 系统具有 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的分辨率,

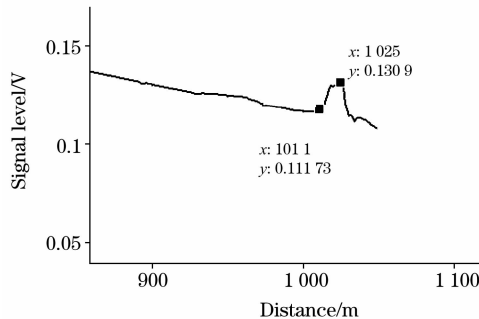


Fig. 6 Local figure of the temperature cell

即温度每变化一度, 可系统具有 $2.3\text{ nA}/22.5\text{ K}=0.105\text{ nA}\cdot\text{K}^{-1}$ 的响应, 低于该噪声电流两个数量级。

4 结 论

通过理论分析与实验说明, 尽管光纤中 SiO_2 的背向拉曼散光的强度低于所用光电转换器件 APD 的暗电流和噪声电流, 但采用恰当的小波降噪方法可以实现较少次数的累加平均条件下实现低于 APD 的噪声电流两个数量级以下的超灵敏度探测。

参 考 文 献

- [1] LIU Wen-han, YANG Wei, ZHANG Da(刘文涵, 杨 未, 张 丹). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2008, 28(2): 343.
- [2] LI Nai-sheng, YANG Yi-min, HE-Nu, et al(李乃胜, 杨益民, 何 弩, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2008, 28(4): 946.
- [3] SUN Xiu-ping, FENG Ke-cheng, ZHANG Xi-he, G et al(孙秀平, 冯克成, 张喜和, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2007, 27(10): 2049.
- [4] Sanjay Kher, Srikant G, Smita Chaube, et al. Current Science, 2002, 83(11): 1363.
- [5] John S Selker, Luc Thevenaz, Hendrik Huwald, et al. Water Resources Research, 2006, 42(12): w12202.
- [6] Kher S, Gurram S, Saxena M K, et al. Current Science, 2004, 86(9): 1201.
- [7] ZHEN Xiao-jun(郑晓军). Electronics Quality(电子质量), 2007, 4: 14.
- [8] GENG Jun-ping, XU Jia-dong, LI Yan, et al(耿军平, 许家栋, 李 焱, 等). Acta Photonica Sinica(光子学报), 2002, 31(10): 1261.
- [9] ZHU Jie(朱 洁). Journal of Zaozhuang University(枣庄学院学报), 2005, 22(5): 9.
- [10] Jurna M, Korterik J P, Otto C, et al. Optics Express, 2007, 15(23): 15207.
- [11] OUYANG Fang-ping, ZHOU Sheng-jun, KANG Hong-xiang(欧阳芳平, 周胜军, 康宏向). Laser Journal(激光杂志), 2002, 23(6): 59.
- [12] GENG Jun-ping, XU Jia-dong, GUO Chen-jiang, et al(耿军平, 许家栋, 郭陈江, 等). Journal of Transducer Technology(传感器技术), 2001, 20(2): 4.
- [13] GENG Jun-ping, XU Jia-dong, WEI Gao, et al(耿军平, 许家栋, 韦 高, 等). Journal of Test and Measurement Technology(测试技术学报), 2002, 16(2): 87.
- [14] HU Xiao-dong, HU Xiao-tang, LIU Wen-hui(胡晓东, 胡小唐, 刘文晖). Journal of Tianjin University(天津大学学报), 1999, 32(6): 678.

Research on the Supersensitive Detecting Technology of Backward Raman Scattering Signal in Optic Fiber

ZHANG Yue, ZHANG Ji-long, LI Xiao, WANG Zhi-bin, WANG Peng

Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement, Engineering Technology Research Center of Shanxi Province for Photoelectric Information and Instrument, North University of China, Taiyuan 030051, China

Abstract Unlike the Brillouin scattering, the anti-Stokes Raman scattering in optic fiber is unrelated with the strain, but is only the function of the absolute temperature. The frequency shift caused by Raman scattering is about 13.95 THz. So the Raman scattering is easier to be picked up than Brillouin scattering. It has certain advantage while being used as the signal of the distributed optic-fiber temperature sensor. But it is weaker than the Brillouin scattering, the peak photocurrent produced in APD is of the order of nA, near or even lower than the noise current of the APD. The N/S after being photo-electric transformed is usually lower than 1. The means of Fourier transform and wavelet transform is not effective in dealing with such kind of signal. Through analyzing the feature of the anti-Stokes Raman scattering signal and using the wavelet, the anti-Stokes Raman scattering signal after being cumulated & averaged was picked up. The supersensitive detecting below the “noise current” of the APD was carried out with the sensitivity: $0.104 \text{ nA} \cdot \text{K}^{-1}$, lower than the “noise current” of the APD 2 classes.

Keywords Raman scattering; Optic-fiber; Noise current; Wavelet

(Received May 10, 2008; accepted Aug. 20, 2008)