

文章编号:1004-4213(2010)11-1988-5

基于相干光时域反射计的光纤温度传感测量*

李荣伟,李永倩,杨志,李保罡

(华北电力大学 电子与通信工程系,河北 保定 071003)

摘要:研究了基于相干光时域反射计的光纤传感技术,分析了基于相干光时域反射计的分布式温度传感机理.根据传感系统的组成和原理,建立了仿真模型,利用 MATLAB 对传感系统的性能进行了仿真与分析,结果表明基于相干光时域反射计的传感系统可以达到温度测量分辨率为 0.01 °C,空间分辨率为 1 m 的性能指标.

关键词:分布式光纤传感;温度;光时域反射;瑞利散射

中图分类号:TN915

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103911.1988

0 引言

分布式光纤传感器以其高准确度、长距离、宽动态范围,可以准确地测量在传感光纤区域内的温度分布^[1]等优点得到了飞速发展.由于布里渊频移与温度存在线性关系,因此,大量的研究者将注意力集中在基于布里渊散射原理的分布式光纤传感技术的研究上^[2].由于布里渊频谱测量的频率分辨率与空间分辨率之间相互制约,传统的布里渊光时域反射计(Brillouin Optical Time Domain Reflectometry, BOTDR)系统可达到的最高指标为温度测量准确度 1 °C,空间分辨率 1 m^[3].然而,在海水温度剖面测量、高压绝缘子故障定位等场合,温度测量准确度要求达到 0.02 °C^[4].现有的测量准确度远远不能满足实际应用的要求.因此,在分布式光纤温度测量领域,迫切需要研究高测量准确度和高空间分辨率的传感方法.

本文研究了目前已报道的一种基于相干光时域反射计(Coherent Optical Time Domain Reflectometry, COTDR)的光纤温度测量方法,可以达到温度分辨率为 0.01 °C,空间分辨率为 1 m 的性能指标^[5].COTDR 是利用单模传感光纤中瑞利散射光的强相干性引起的后向散射曲线的起伏特性来实现温度的高测量分辨率和空间分辨率传感的一项技术.

1 COTDR 温度传感机理

光脉冲从光纤的一端注入,当入射光为强相干光时,用光探测器探测的散射信号是在脉冲宽度区域内

各点返回到入射端的瑞利散射光干涉的结果^[6-7].当光纤上某区域的温度发生变化时,由于弹光效应,该区域光纤的折射率及散射单元长度将会发生变化,因此导致该区域瑞利散射光相位的变化.因为传感光纤上温度变化区域内的散射光传输到探测器的相位差发生变化,因此,最终干涉的结果将会引起后向瑞利散射光强的变化.通过探测后向瑞利散射光强的变化,以及注入脉冲与接收到的信号之间的时间延迟可以准确地定位温度发生变化的区域.

根据波动光学理论,当光纤中 A 处和 B 处产生的后向瑞利散射光同时到达 C 处时将产生相干干涉^[8].假设 A 处和 B 处的后向瑞利散射光振动方程分别为

$$e_A = K \cos(\omega_A t + \varphi_A) \quad (1)$$

$$e_B = K \cos(\omega_B t + \varphi_B) \quad (2)$$

式中, K 和 φ 分别为后向散射光幅度和相位.到达光电检测器时产生的干涉方程可以表示为

$$e(t) = e_A(t) + e_B(t) = K \cos(\omega_A t + \varphi_A) + K \cos(\omega_B t + \varphi_B) = 2K \cos \left[\left(\frac{\omega_A + \omega_B}{2} \right) t + \varphi_1 \right] \cdot \cos \left[\left(\frac{\omega_A - \omega_B}{2} \right) t + \varphi_2 \right] \quad (3)$$

$$\varphi_1 = (\varphi_A + \varphi_B) / 2 \quad \varphi_2 = (\varphi_A - \varphi_B) / 2 \quad (4)$$

在理想情况下,任意 $\omega_A = \omega_B$, 则有

$$e(t) = 2K \cos(\omega_A t + \varphi_1) \cos \varphi_2 = 2K' \cos(\omega_A t + \varphi_1) \quad (5)$$

$$K' = K \cos \varphi_2 \quad (6)$$

检测到的功率可以表示为

$$P = \int e^2 dt = 2K'^2 \quad (7)$$

在实际应用中,激光器的频率漂移是不能忽视的.如果激光器频率为线性漂移,漂移速度由 α 表示,则有

* 国家高技术发展计划(2006AA09Z141)资助

Tel:0312-7523084

Email:lrwcom@163.com

收稿日期:2010-04-20

修回日期:2010-08-10

$$\begin{aligned} f_A &= f_B + \alpha\tau \\ \omega_A &= 2\pi f_A \\ \omega_B &= 2\pi f_B \end{aligned} \quad (8)$$

代入式(3),在满足 $\alpha\tau \ll f_B$ 的情况下,可以得到

$$\begin{aligned} e(t) &= 2K\cos[\pi(2f_B + \alpha\tau)t + \varphi_1]\cos(\pi\alpha\tau \cdot t + \varphi_2) \approx \\ & 2K\cos[2\pi f_B t + \varphi_1]\cos(\pi\alpha\tau \cdot t + \varphi_2) \end{aligned} \quad (9)$$

如果 $\alpha\tau$ 尽可能的小,式(9)和式(5)相同.然而当激光器漂移速度相对较快时,光功率也将发生较快变化,就不能准确反应光相位的变化.所以传感系统必须采用线宽窄、频率稳定度高的激光器.

2 COTDR 温度传感系统

基于 COTDR 技术的分布式光纤温度传感系统如图 1. 采用高频率稳定度的分布反馈激光器(Distributed Feedback Laser Diode, DFB-LD)作探测光源,通过调节驱动单边带调制器(Single Side Band, SSB)的微波频率综合器的频率实现对激光频率的控制.由 SSB 输出的连续光经耦合器分成两路,一路作为本振光,另一路经电光调制器(Electro-Optic Modulator, EOM)调制成脉冲光,经掺铒光纤放大器(Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA)放大后发送到传感光纤.脉冲光在传播过程中产生的后向瑞利散射光与本振光通过耦合器一起加到光电探测器(Photoelectric Detector, PD)上进行相干检测,光电探测器输出的信号经 A/D 转换器后进入计算机进行数据处理.为保证 EOM 的输入光偏振方向与其透光轴重合,在其输入端加入偏振控制器(Polarization Controllers, PC)PC₁;为了消除偏振衰落,在本振光路加入 PC₂ 以减小由偏振不匹配带来的信号起伏.

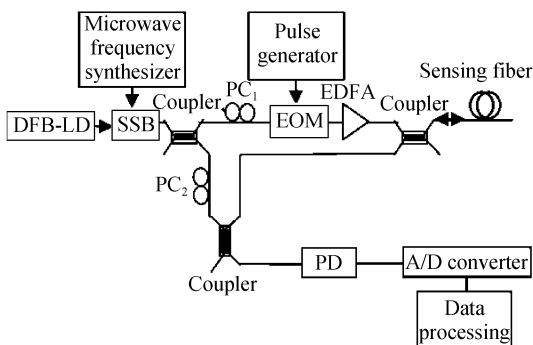


图 1 COTDR 分布式温度传感系统

Fig. 1 Distributed temperature sensing system based on COTDR

通过微波频率综合器以特定步进改变探测光频率,依次获得一组经滤波、消噪的时域波形,将多组波形在计算机软件中按距离-频率-强度拟合为三维图形,获得沿整个传感光纤的瑞利散射功率谱.在数据处理部分,对不同时刻测得的瑞利散射功率谱进

行相关处理,从探测光频率变化量与温度的关系获取传感光纤的外部信息.

3 MATLAB 仿真与分析

基于 COTDR 的分布式光纤传感技术是以后向瑞利散射曲线的两个主要特性^[9]为基础的,即可再现性与可恢复性.当传感光纤上的温度没有发生变化时,不同时刻测得的后向瑞利散射曲线是相同的;当传感光纤上的温度发生变化时,通过调节微波本地振荡器的频率,可以恢复温度变化前的后向瑞利散射曲线.

3.1 光脉冲传输的仿真模型

当光纤一端注入宽度为 W 的光脉冲时,在光纤输入端接收到的后向散射光场^[5]为

$$\begin{aligned} e(t) &= \sum_{i=1}^N a_i \exp\left(-\alpha \frac{c\tau_i}{n_f}\right) \exp\{j2\pi\nu(t-\tau_i)\} \cdot \\ & \text{rect}\left(\frac{t-\tau_i}{W}\right) \end{aligned} \quad (10)$$

式中, a_i 和 τ_i 分别为第 i 个后向散射光波的幅度和延迟; N 为散射光总数; α 为光纤衰减常量; c 为真空中的光速; n_f 为光纤的折射率.当 $0 \leq (t-\tau_i)/W \leq 1$ 时, $\text{rect}[(t-\tau_i)/W] = 1$, 其它时刻取值为 0. 后向散射场的光功率表达式为

$$p(t) = |e(t)|^2 = p_1(t) + p_2(t) \quad (11)$$

式中, $p_1(t)$ 和 $p_2(t)$ 的表达式分别为

$$p_1(t) = \sum_{i=1}^N a_i^2 \exp\left(-2\alpha \frac{c\tau_i}{n_f}\right) \text{rect}\left(\frac{t-\tau_i}{W}\right) \quad (12)$$

$$\begin{aligned} p_2(t) &= 2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N a_i a_j \cos \varphi_{ij} \exp\left\{-\alpha \frac{c(\tau_i + \tau_j)}{n_f}\right\} \times \\ & \text{rect}\left(\frac{t-\tau_i}{W}\right) \text{rect}\left(\frac{t-\tau_j}{W}\right) \end{aligned} \quad (13)$$

式中, φ_{ij} 为第 i 个和第 j 个后向散射光的相位差. $p_1(t)$ 为每个后向散射光各个单独的光功率之和,它不随着激光器频率及传感光纤上温度变化而变化; $p_2(t)$ 为不同后向散射光相干导致的瑞利散射光功率之和,它与激光器频率 ν 、光纤折射率 n_f 和散射单元 s_{ij} 有关. φ_{ij} 可以表示为

$$\varphi_{ij} = 4\pi\nu n_f s_{ij} / c \quad (14)$$

式中, 光纤折射率 n_f 和散射单元长度 s_{ij} 的变化依赖于传感光纤温度的变化. 因此, 利用传感光纤的后向散射光相干产生的瑞利散射光的起伏特性, 通过检测后向散射光功率可以得到传感光纤上温度信息的分布.

相关峰谱的带宽与脉冲宽度有关. 脉冲宽度越大, 谱线越窄, 相干性越强, 微小频移将会在脉冲宽度范围内引起大的相位变化, 相应的相关峰谱的带宽就会增大. 当脉冲宽度极小时, 谱线变宽, 相干性

减弱,微小频移在脉冲宽度范围内产生的相干近似为噪音作用,相关峰谱的带宽变得极窄.宽度分别为 20 ns 和 10 ns 的脉冲在传感光纤长度为 70 m 处的相关峰的频谱如图 2.

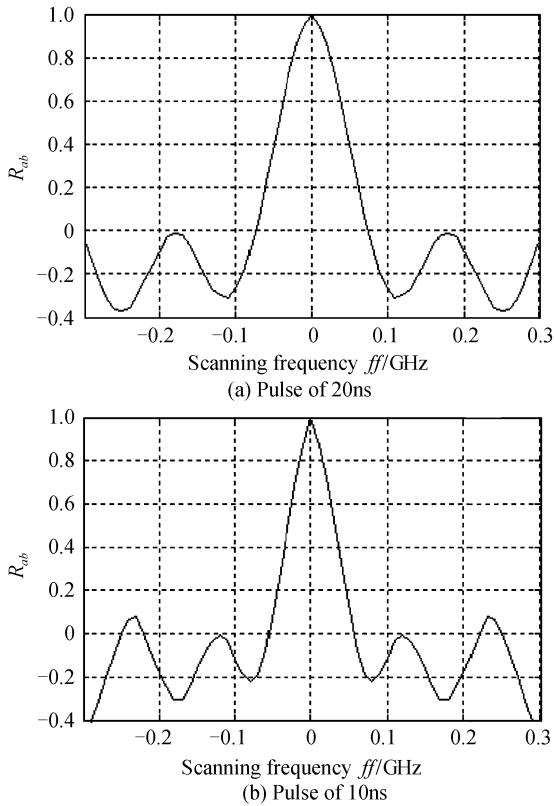


图 2 后向瑞利散射功率相关函数
Fig.2 Cross correlation of Rayleigh backscattering power

3.2 仿真结果与分析

根据传感原理,在 MATLAB 中编写基于 COTDR 技术的分布式光纤温度传感方法的仿真程序,仿真程序流程图如图 3.

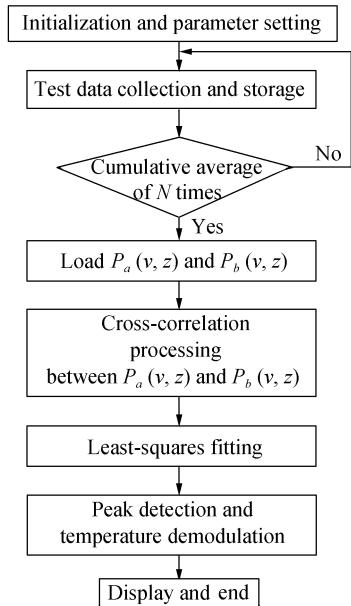


图 3 仿真程序流程
Fig.3 Flowchart of simulation program

在仿真模型中,系统光源采用中心波长为 1 550 nm 的激光器,微波频率综合器在 1 GHz 带宽范围内可调,步进间隔为 10 MHz.入射到传感光纤的光脉冲宽度为 10 ns,数据采样周期为 5 ns.假设 100 m 的传感光纤上的初始时刻 a 的温度为 20 °C,在时刻 b 时传感光纤上长度分别为 1 m、3 m、5 m 的部分温度变化 0.1 °C,其它温度与时刻 a 温度保持不变.对 COTDR 温度传感系统仿真结果如图 4~6.

图 4 中的后向瑞利散射功率谱是加入高斯白噪音(信噪比为 10 dB)时,叠加平均 10 次后的结果.

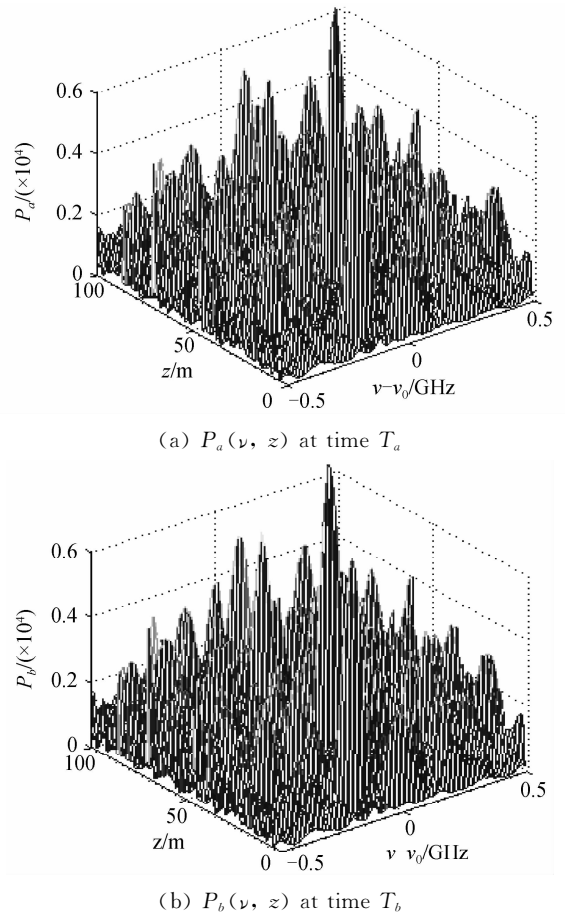
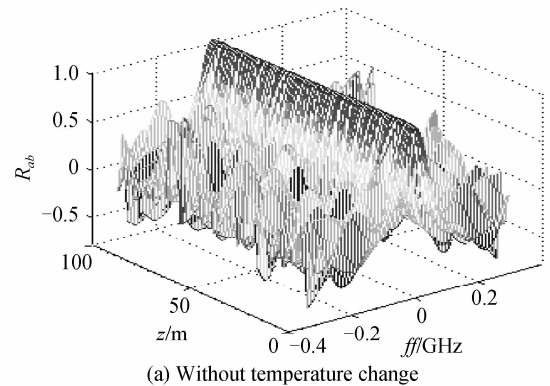


图 4 a 时刻与 b 时刻的后向瑞利散射功率谱
Fig.4 Backscatter Rayleigh power spectra of $P_a(v, z)$ at time T_a and $P_b(v, z)$ at time T_b



(a) Without temperature change

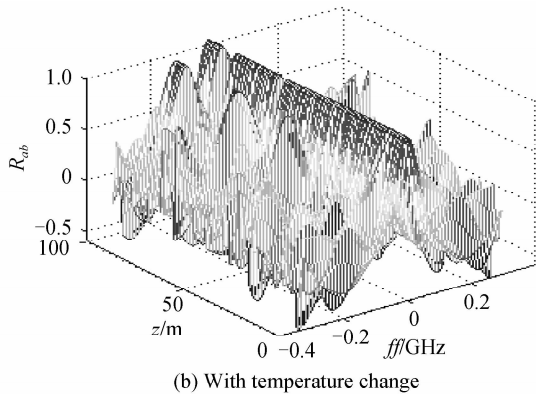


图 5 a 时刻与 b 时刻的后向瑞利散射功率相关函数
Fig. 5 Cross correlation $R_{ab}(f, z)$ between $P_a(\nu, z)$ and $P_b(\nu, z)$

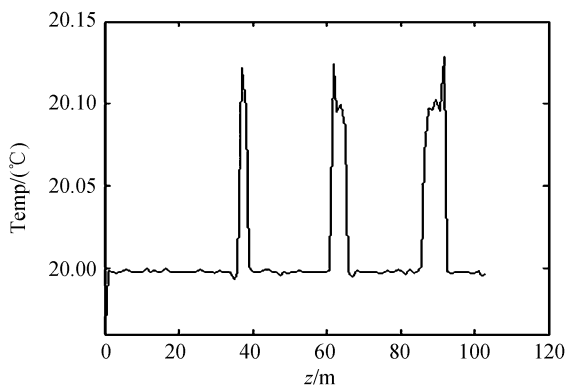


图 6 温度解调分布

Fig. 6 Demodulated temperature distributions

两时刻功率谱的相关函数的分布如图 5. 图 5(a) 和 (b) 分别为没有温度变化和有温度变化时的分布情况, 由图可见, 温度变化引起了功率谱的相关函数在频域内出现峰值分裂现象.

图 6 是传感光纤上解调后的温度信息分布图. 从图 6 可以看出在光纤上位置为 36.0 m、61.0~63.0 m、87.0~92.0 m 处温度变化了 0.1 °C. 由高斯白噪音引起的温度误差在 0.01 °C 之间, 它与仿真程序中叠加平均的次数有关, 叠加平均次数越大, 温度误差越小. 光纤上位置为 0 处的温度衰减是由于程序中采样初始值设置所造成的, 随着程序逐渐完善, 该问题也会被解决. 通过对基于 COTDR 的分布式光纤温度传感系统的模拟仿真, 达到了温度测量分辨率为 0.01 °C、空间分辨率为 1 m 的性能指标.

4 结论

本文为探索高温分辨率测量方法, 通过 MATLAB 仿真实现了高温分辨率和空间分辨率测量. 利用 COTDR 技术, 可以实现温度分辨率为 0.01 °C、空间分辨率为 1 m 的性能指标. 该技术对海洋监测、制药、化工等工程温度测量具有深远的影响, 在科研、国防等领域具有广泛的应用前景.

参考文献

- [1] 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): 1-4.
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): 1-4.
- [2] WANG Qi-fu, QIAO Xue-guang, JIA Zhen-an, *et al.* Development of research on Brillouin scattering distributed optic fiber sensing technology [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2007, **26**(7): 7-9.
王其富, 乔学光, 贾振安, 等. 布里渊散射分布式光纤传感技术的研究进展[J]. *传感器与微系统*, 2007, **26**(7): 7-9.
- [3] KOYAMADA Y, SAKAIRI Y, TAKEUCHI N, *et al.* Novel type Brillouin optical time-domain reflectometry for measuring distributed strain and temperature with sub-meter spatial resolution in km-long fiber. SICE, 2007 Annual Conference, Takamatsu, Japan, September 17-20, 2007 [C]. *IEEE*, 2007: 2455-2458.
- [4] ZAPPA C J, JESSUP A T. High-resolution airborne infrared measurements of ocean skin temperature[J]. *J Geoscience and Remote Sensing Lett*, 2005, **2**(2): 146-150.
- [5] KOYAMADA Y, KUBOTA K, HOGARI K. Fiber-optic distributed strain and temperature sensing with very high measurand resolution over long range using coherent OTDR [J]. *J Lightwave Technol*, 2009, **27**(9): 1142-1146.
- [6] 谢孔利. 基于 φ -OTDR 的分布式光纤传感系统[D]. 成都: 电子科技大学, 2008.
- [7] LI Jian-zhong, RAO Yun-jiang, RAN Zeng-ling, *et al.* A distributed optical fiber perturbation sensor system based on combination of φ -OTDR and POTDR [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(5): 1108-1113.
李建中, 饶云江, 冉曾令, 等. 基于 φ -OTDR 和 POTDR 结合的分布式光纤微扰传感系统[J]. *光子学报*, 2009, **38**(5): 1108-1113.
- [8] 岳剑峰. 分布式光纤 φ -OTDR 安防系统实用化研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
- [9] IMAHAMA M, KOYAMADA Y, HOGARI K. Restorability of Rayleigh backscatter traces measured by coherent OTDR with precisely frequency-controlled light source [J]. *IEICE Trans Commun*, 2008, **E91-B**(4): 1243-1246.

Measurement of Optical Fiber Temperature Sensing Based on Coherent Optical Time Domain Reflectometry

LI Rong-wei, LI Yong-qian, YANG Zhi, LI Bao-gang

(*Department of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding, Hebei 071003, China*)

Abstract: The distributed optical fiber sensing technology based on coherent optical time-domain reflectometer (COTDR) is researched. The measurement mechanism of distributed temperature sensing techniques based on COTDR is analyzed. Simulation model is established and sensing system performance is analyzed in simulation according to the composition and principles of sensing system. Finally, a temperature resolution of 0.01 °C and a spatial resolution of 1 m are achieved by the MATLAB simulation.

Key words: Distributed optical fiber sensing; Temperature; Coherent Optical Time Domain Reflectometry (OTDR); Rayleigh scattering



LI Rong-wei was born in 1983. She is currently a graduate student at Department of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University. Her research interests focus on the optical fiber sensing.



LI Yong-qian Li Yong-qian was born in 1958. He is a Doctoral Supervisor at Department of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University, and his research interests focus on the optical fiber sensing and signal processing.