

·信号与信息处理·

## 基于BOTDA传感技术的空间分辨率研究

贾振安, 徐成, 刘颖刚, 尉婷

(西安石油大学光电油气测井与检测教育部重点实验室, 陕西省油气资源光纤探测工程技术研究中心, 陕西 西安 710065)

**摘要:**空间分辨率是BOTDA传感系统的一个重要参数,其主要取决于泵浦脉冲光的宽度。为了提高BOTDA系统的空间分辨率,在不改变泵浦脉冲光宽度的情况下,采用螺旋式盘绕传感光纤的方法,分析了布里渊散射传感原理,理论上分析采用螺旋式盘绕光纤对提高实际测量空间分辨率的影响。实验中泵浦脉冲光宽度为10 ns, BOTDA系统采样间隔为0.4 m。采用1 m长螺旋式盘绕传感光纤监测0.5 m管线轴向温度分布,监测空间分辨率为0.5 m。分析结果表明,采用螺旋式盘绕光纤更有利于提高监测管线温度场的空间分辨率。

**关键词:** BOTDA; 空间分辨率; 采样间隔; 螺旋式盘绕光纤

**中图分类号:** TP212.9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-1255(2014)-06-0043-03

## Research on Spatial Resolution Based on BOTDA Sensing Technology

JIA Zhen-an, XU Cheng, LIU Ying-gang, WEI Ting

(Ministry of Education Key Laboratory of Photoelectric Oil and Gas Logging and Detection, Xi'an Petroleum University, Shanxi Province Oil and Gas Resource Optical Fiber Detection Engineering Technology Research Center, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** Spatial resolution is an important parameter of Brillouin optical time domain analysis (BOTDA) sensing system, which depends on the width of pump pulse light. To improve the spatial resolution of BOTDA system, spiral coiled optical fiber method is used without changing the width of pump pulse light. Brillouin scatter sensing principle is analyzed. The influence on improving spatial resolution in actual measurement process using coiled optical fiber is analyzed on theory. In the experiment, the width of pump pulse light is 10 ns, the sampling interval of BOTDA system is 0.4 m. The spiral coiled optical fiber with 1 m length is used to monitor the axial temperature distribution of 0.5 m pipeline and monitoring spatial resolution is 0.5 m. Analysis results show that spiral coiled optical fiber is more available to improve the spatial resolution in monitoring pipeline temperature field.

**Key words:** Brillouin optical time domain analysis (BOTDA); spatial resolution; sampling interval; spiral coiled optical fiber

分布式光纤传感技术是近年来发展起来的一项高新技术。相比于传统单点式光纤传感技术,它可以获得长距离连续监测场的温度或应变分布信息<sup>[1]</sup>。其中分布式拉曼光时域反射(ROTDR)技术专门用于测量光纤沿线的温度分布信息<sup>[2]</sup>,布里渊光时域反射(BOTDR)<sup>[3]</sup>与布里渊光时域分析(BOTDA)<sup>[4]</sup>可以监测光纤沿线的温度/应变分布信息<sup>[5]</sup>。其中空

间分辨率是分布式光纤传感技术的一个重要参数,在光纤布里渊散射传感技术中,当泵浦脉冲光的宽度不低于光纤中声子寿命时,空间分辨率越高,测量精度就越高<sup>[6-8]</sup>。由于一般的BOTDA解调系统都有一定的采样间隔,一定的空间分辨率下,采样间隔内的重要点的信息就可能无法采集到,因此文中提出的螺旋式盘绕光纤可以有效提高空间分辨率,实现

收稿日期: 2014-10-14

基金项目: 陕西省教育厅项目“基于布里渊光时域分析技术的管线温度应变检测系统研究”(13JS088)

作者简介: 贾振安(1959-),男,陕西咸阳人,教授,主要从事光纤测井技术、光纤传感技术的研究。

对光纤沿线重要点温度信息的监测。

## 1 基本原理

### 1.1 BOTDA 传感原理与空间分辨率

在如图 1 所示的 BOTDA 系统中,分别从光纤的两侧注入连续探测光和泵浦脉冲光,在泵浦脉冲光的作用下,由于电致伸缩作用产生与脉冲光方向相反的背向布里渊散射光。通过调节连续探测光的频率使其与布里渊散射光频率一致使两者发生干涉作用,连续光把一部分能量传递给背向布里渊散射光,布里渊散射光功率变大,变为光电探测器可以探测到的光信号。当光纤温度或者应变发生突变时,光纤固有的布里渊峰值频移会发生改变,所以通过测量受激布里渊散射信号即测量光纤布里渊峰值频移的变化就可以测量出待测光纤温度或应变的变化。

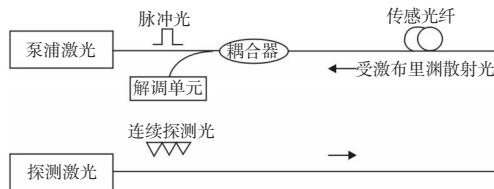


图 1 BOTDA 传感原理

布里渊散射光与温度和应变的对应关系如下

$$\nu_B - \nu_{B0} = C_{\nu\varepsilon} \Delta\varepsilon + C_{\nu T} \Delta T \quad (1)$$

当光纤处于自由状态时,即不发生应变,布里渊散射光的频移与温度成线性关系如下

$$\nu_B - \nu_{B0} = C_{\nu T} \Delta T \quad (2)$$

### 1.2 空间分辨率

BOTDA 系统采用光时域技术进行空间定位,激光器向被测光纤发射某一特定频率的脉冲光,在脉冲光行进的过程中产生背向散射光并返回到入射端。如果从光脉冲注入的瞬间开始计时,则在  $t$  时刻光纤始端可以接收到来自光纤距离  $S$  处的信号,  $S = V_g \times t/2$ , 其中,  $V_g$  为光波群速度。由于光脉冲具有一定的宽度,在  $t$  时刻光探测器接收到的散射信号实际上并非来自  $S$  处一点,而是其附近一段范围内的散射光,该范围是理论上可分辨的最小光纤长度,即空间分辨率  $SR$ 。空间分辨率与光脉冲宽度  $\omega$  的对应关系为

$$SR = V_g \times \omega/2 \quad (3)$$

一般光纤材料中,  $V_g \approx 2 \times 10^8 \text{ m/s}$ , 当  $\omega = 10 \text{ ns}$  时,则  $SR \approx 1 \text{ m}$ 。由此可知,空间分辨率越低,可分辨的光纤最小长度越小,测量的精准度就越高。通常只有当光纤的应变或温度发生均匀变化,并且发生变化的光纤长度大于空间分辨率时才可准确地测量光纤应变或温度的变化量<sup>[9]</sup>。对于温度、应力集中的突变要求,解调设备有与被检测对象相匹配的空间分辨率。因此,提高系统空间分辨率是光纤传感技术亟待解决的问题之一。

目前,提高空间分辨率最直接的方法是缩短脉冲光的宽度。但当脉冲光宽度过于小时,必然会减小脉冲光的强度,系统信噪比降低。当抽运脉冲光宽度小于或接近于声子寿命时,布里渊散射谱宽增大,进一步降低测量精度<sup>[10]</sup>。

实验中采用的 DiTeStSTA-R 布里渊分析仪测量温度的最佳空间分辨率设定在  $1 \text{ m}$ , 对应的光脉冲宽度为  $10 \text{ ns}$ 。当设定光脉冲宽度为  $5 \text{ ns}$  时,对应的空间分辨率为  $0.5 \text{ m}$ 。此时虽然空间分辨率提高了,但由于  $5 \text{ ns}$  时光脉冲宽度接近光纤中的声子寿命,布里渊散射谱线宽度增加,测量精度下降<sup>[11]</sup>。在某些情况下  $1 \text{ m}$  的空间分辨率不能满足空间变异性强的高温监测场。为解决这一问题,提出一种螺旋式盘绕光纤的方法。如图 2 所示。在水平长度为  $L$  的监测场中,将长度为  $S$  的光纤螺旋式均匀盘绕在圆柱管上,盘绕在管上的光纤长度为  $S$ 。这种铺设光纤的方式使测量光纤段的长度变为直线式布置的  $S/L$  倍,理论上空间分辨率也变为直线式布置的  $S/L$  倍,并且可以根据测量的需要改变  $S$ , 得到合适的空间分辨率。

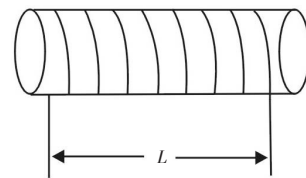


图 2 螺旋式盘绕传感光纤

## 2 实验研究

### 2.1 实验平台

图 3 为实验平台。实验中采用 DiTeStSTA-R 布

里渊分析仪。取两个规格相同的钢管作为模拟管线,长分别为1 m、0.5 m。将1 m长的光纤如图2的布线方式均匀盘绕在长0.5 m的管线上,并用高温双面胶将光纤的两端固定防止松动位移,并将简单封装好的螺旋式盘绕光纤分别接入光路作为2号光路。1号光路是将传感光纤按一维直线式布线直接穿越1 m的管线,1号光路作为补偿光路。

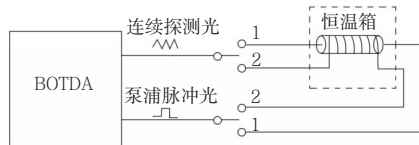


图3 实验系统平台

实验中泵浦脉冲光的宽度为10 ns,采样间隔为0.4 m。设定恒温箱的初始温度70 ℃,加热区间为70 ℃~120 ℃。加热梯度为10 ℃,逐级进行加热,每级温度分别测两次,1号光路与2号光路相互切换。每级热稳定时间为25 min,待光纤热稳定后,利用BOTDA系统测量传感光纤的频移变化。

### 2.2 实验数据分析

实验中当光路切换在1路时,测量传感光纤一维直线式分布在管线里面,由于管线受热长度为1 m,传感光纤受温度突变的长度为1 m。泵浦脉冲光的宽度为10 ns,采样间隔为0.4 m。系统空间分辨率为1 m。因此BOTDA系统正好可以完全探测到恒温箱里管线的温度突变信息。一维直线式分布传感光纤的布里渊频移与距离的对应关系如图4所示。

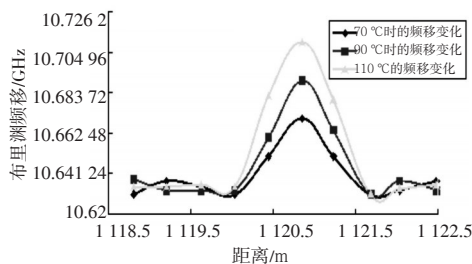


图4 一维直线式分布传感光纤的频移变化

由图4可得,恒温箱中一维直线式分布的传感光纤为1 m,未受热处光纤的布里渊频移约为10.63 GHz。图4中70 ℃时,布里渊频移峰值在1120.441~1121.232 m之间。当设置泵浦脉冲光宽度为10 ns时,

空间分辨率的理论值为1 m,系统采样间隔最佳设置为0.4 m,因此1 m范围内最多可以监测3点的布里渊频移值。在1 m空间分辨率内,布里渊频移峰值代表1 m管线轴向温度场变化引起的布里渊频移变化。

当切换在光路2时,模拟管线的长度只有0.5 m,当采用一维直线式布线方式,在系统1 m的空间分辨率内是无法准确得到0.5 m管线轴向的频移信息的。因此采用螺旋式盘绕光纤监测0.5 m管线的布里渊频移信息。实验结果如图5所示。

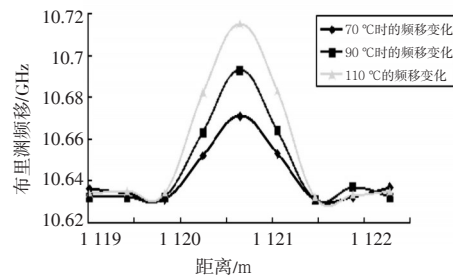


图5 螺旋式盘绕光纤的频移变化

图5中在1120~1121.5 m处存在布里渊频移的峰值,说明螺旋式盘绕在0.5 m管线上的1 m光纤的空间定位在1120~1121.5 m之间。虽然图5中的布里渊散射频移峰值在光纤中代表此位置处1 m宽度范围内的布里渊散射峰,由于光纤是盘绕在管线上的,光纤所携带的温度突变信息与管线轴向沿线的温度突变信息相同,所以此布里渊频移峰值所代表的温度突变信息就是0.5 m管线轴向沿线的温度信息。由上文中分析可知, $S=1\text{ m}, L=0.5\text{ m}$ ,所以这种情况下螺旋式盘绕光纤的实际监测空间分辨率是直线式分布光纤的2倍,即 $SR=0.5\text{ m}$ 。

根据实验数据作出布里渊频移与温度的拟合曲线图,如图6所示。

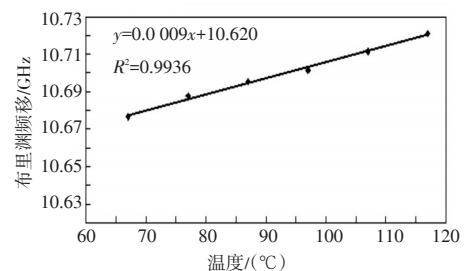


图6 布里渊频移与温度的拟合曲线

由拟合曲线与式(2)可知,布里渊频移-温度系 (下转第50页)

- [3] 冈萨雷斯. 数字图像处理 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [4] 何东健. 数字图像处理 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2007.
- [5] 韩思奇, 王蕾. 图像分割的阈值法综述[J]. 系统工程与电子技术, 2002(6): 91-94.
- [6] 杨晖, 曲秀杰. 图像分割方法综述 [J]. 电脑开发与应用, 200(3): 21-93.
- [7] 李小红. 基于 LOG 滤波器的图像边缘检测算法的研究 [J]. 计算机应用与软件, 2005(5): 107-108.
- [8] 陈宏希. 基于边缘保持平滑滤波的 Canny 算子边缘检测 [J]. 兰州交通大学学报, 2006(1): 86-90.
- [9] 马艳, 张治辉. 几种边缘检测算子的比较 [J]. 工矿自动化, 2004(1): 54-56.
- [10] 冯俊萍, 赵转萍. 基于数学形态学的图像边缘检测技术 [J]. 航空计算技术, 2004(3): 53-56.
- [11] 雷丽珍. 数字图像边缘检测方法的探讨 [J]. 测绘通报, 2006(3): 40-42.
- [12] 沈圆, 李国勇. 图像的阈值分割法设计 [J]. 机械工程与自动化, 2012(5): 45-46.
- [13] 邹洪杰. 基于最大方差法的图像分割与边缘检测 [J]. 黑龙江科技信息, 2013(27): 96, 121.
- [14] 陈露晨, 李光明. 快速最大熵多阈值图像分割算法 [J]. 计算机应用与软件, 2012(3): 267-268.
- [15] 卢建华. 基于直方图阈值法的遥感图像分割算法研究 [D]. 福建: 福建农林大学.
- [16] 张小琳. 图像边缘检测技术综述 [J]. 高能量密度物理, 2007(1): 37-40.

(上接第45页)

数, 即  $C_{\nu T}$  为 0.9 MHz/°C。BOTDA 系统测出布里渊频移变化, 根据以上参数既可以测出管线沿线的温度分布信息。

### 3 结 论

文中提出了一种螺旋式盘绕传感光纤的技术方法来提高 BOTDA 系统的空间分辨率, 在不改变泵脉冲光宽度的条件下采用一维直线式分布光纤与螺旋式盘绕分布光纤进行对比实验。通过在系统空间分辨率为 1 m 的条件下, 分别测量 1 m 与 0.5 m 管线沿线的温度分布信息, 得出采用螺旋盘绕式的传感光纤, 具有更高的实际测量的空间分辨率。这种方式是一种更精确、更有效的测量技术手段。

### 参考文献

- [1] Naruse H, Tateda M, Ohno H, et al. Linear strain distribution dependence of the Brillouin gain spectrum. Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest[C]//Portland, OR, USA, 2002, 1: 309-312.
- [2] 沈一春, 宋牟平, 章献民, 等. 单模光纤中受激布里渊散射阈值研究 [J]. 中国激光, 2005, 32(4): 497-500.
- [3] Kurashima T, Horiguchi T, Lzumita H, et al. Brillouin optical fiber time domain reflectometry [J]. IEICE Transac
- tions on Communication, 1993, E76-B(4): 382-390.
- [4] Horiguchi T, Tateda M. BOTDA-nondestructive measurement of single mode optical fiber attenuation characteristics using Brillouin interaction theory [J]. Journal of Light Wave Technology, 1989, 7(8): 1170-1176.
- [5] 聂俊, 李端有, 梁俊. 基于 BOTDA 的温度和应变测试探讨 [J]. 长江科学院院报, 2011, 28(4): 68-70.
- [6] 王菊, 刘银, 张伟娟. 基于布里渊损耗的单端分布式光纤传感系统研究 [J]. 激光与红外, 2014, 44(7): 773-776.
- [7] 崔何亮, 张丹, 施斌. 布里渊分布式传感的空间分辨率及标定方法 [J]. 浙江大学学报, 2013, 47(7): 1233-1237.
- [8] Anthony W B, Michael D D, Bao X, et al. Spatial resolution enhancement of a Brillouin distributed sensor using a novel signal processing method [J]. Journal of Lightwave Technology, 1999, 17(7): 1179-1183.
- [9] ZHANG Dan, XU Hong-zhong, SHI Bin, et al. Brillouin power spectrum analysis for partially uniformly strain optical fiber [J]. Optics and Laser in Engineering, 2009, 47(9): 976-981.
- [10] Brown A, Bao X Y. Analysis of the precision of a Brillouin scattering based distributed strain sensor [J]. Proc. of SPIE 1999, 3670: 359-365.
- [11] Bao X Y, Brown A, Demerchant M, et al. Characterization of the Brillouin loss spectrum of single-mode fiber by use of very short (<10ns) pulses [J]. Optics Letters, 1999, 24(8): 510-512.