

基于布里渊光时域反射计的铁路既有光缆在线温度监测

曹玉龙^{1,2} 叶青¹ 蔡海文¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 单模光纤中的布里渊散射光相对于入射光有一定的频移, 该频移量与单模光纤所处环境的温度呈线性关系。根据这种线性温度敏感特性, 布里渊光时域反射计(BOTDR)作为一种分布式光纤布里渊传感系统, 可对铁路既有线上的光缆温度分布进行监测。分别定位和测试水泥包覆、铁管包覆、土壤直埋这三种铺设方式的路段, 获得温度变化曲线, 温度变化量分别为 10, 8, 6 °C, 温升速率分别为 10, 8, 1 °C/h。实验结果表明, 系统能够反映管线中的温度变化趋势以及变化速率, 可用于铁路既有线的温度安全监测。

关键词 光纤光学; 光纤传感; 布里渊散射; 光缆; 温度检测

中图分类号 TN29 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.080602

On-Line Temperature Monitoring in Railway Existing Fiber Cable Based on Brillouin Optical Time-Domain Reflectometry

Cao Yulong^{1,2} Ye Qing¹ Cai Haiwen¹

¹ Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The Brillouin frequency shift is linearly related to the temperature change along the single-mode fiber. Based on the linear temperature sensitivity, the Brillouin optical time-domain reflectometry (BOTDR), as one of the distributed optical fiber Brillouin sensing system, can realize detection of temperature distribution along the existing fiber cable in the railway communication system. Three kinds of cables with different cablecasting styles, including cement cladding, iron piping and directly buried laying, are positioned and tested, and temperature change curves are obtained. Temperature variation for the three kinds of fibers is 10, 8, and 6 °C, respectively, and the temperature rising rate is 10, 8, and 1 °C/h, respectively. The experimental results show that the BOTDR sensing system can reflect the trend and the rate of temperature change, and can be used for on-line temperature monitoring on railway communication fiber cables.

Key words fiber optics; fiber sensing; Brillouin scattering; fiber cable; temperature detection

OCIS codes 060.2370; 190.5890; 060.2430

1 引言

随着铁路的高速发展, 里程和车次不断增加, 铁路沿线的安全问题越来越复杂, 对线路外部环境安全的监控需求和等级越来越高。铁路沿线铺设的通信光电缆承担着铁路运输指挥任务, 是确保列车安全运行极为重要的基础设施。铁路光电缆的数量和长度不断增加, 且早期铺设光电缆持续老化, 导致光电缆故障不断发生, 给铁路运输安全带来不同程度的影响。铁路沿线光电缆具有线路长、铺设方式多样化、沿线环境复杂

收稿日期: 2016-03-18; **收到修改稿日期:** 2016-04-28; **网络出版日期:** 2016-07-26

基金项目: 国家自然科学基金(U0934001, 11076028)

作者简介: 曹玉龙(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: zerone.cyl@gmail.com

导师简介: 蔡海文(1975—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光纤传感、光电检测等方面的研究。

E-mail: hwcai@siom.ac.cn(通信联系人)

等特点,传统的人员巡检模式效率低、速度慢、人力成本高,传统检测手段难以实现快速精确定位和事先预警^[1-2]。光缆中的光纤具有传感器的功能,可以用于监测和预警光纤断线、温度变化、应变变化和振动激扰等物理现象,利用这些既有的光缆,快速准确地监测沿线温度,及时反馈沿线烧荒、同槽电缆异常温升等事故,对于铁路的光缆防护以及安全运营具有重大意义。

基于散射的分布式光纤传感器,具有抗电磁干扰能力强、距离长等诸多优点,能够无缝接入通信线路,不会对既有光缆的通信造成影响。目前已发展了基于拉曼散射^[3-5]和布里渊散射^[6-9]的多种长距离分布式光纤传感技术。基于拉曼散射的传感器需要使用多模光纤,与现有的通信光缆兼容性较差,且检测距离难以超过 10 km^[4,10]。基于布里渊散射的分布式光纤传感系统,探测距离超过 30 km^[11-13],且基于普通单模光纤,能与现有的通信光缆完美兼容,因此更适合用于长里程、沿线已铺设好光缆的铁路系统。基于布里渊散射的分布式传感系统,主要有布里渊光时域反射计(BOTDR)^[14-15]和布里渊光时域分析仪(BOTDA)^[13]两种。前者基于自发布里渊散射,属于单端接入系统;后者基于受激布里渊散射,信号更强但是需要在传感光纤两端接入激光,对线路要求高。

针对铁路沿线既有光缆监控距离长、光缆埋设保护性较高因而难以外接传感器等问题,利用 BOTDR 系统对铁路沿线光缆的温度进行在线探测,监测铁路通信光缆的温度状况及健康状态。首先测试光纤中的布里渊频移,并设置为初始参考值,随着光纤温度状态的变化,后续所测的布里渊频移相对于这个参考值会发生一定的变化,这个变化量与温度的变化线性相关。实际铁路线路上的通信光缆,埋设方式较为复杂,主要埋设方式有水泥包覆、铁管包覆以及土壤直埋。其中水泥包覆和铁管包覆主要是在过桥过涵位置,在这些位置光缆一般与电缆放置在同一槽道中,可利用光缆监测槽道内温度,能够同时防护同槽电缆。本文分别测试了不同埋设方式的光缆的温升,并得到了各种铺设方式下的温度变化曲线,实验结果表明,BOTDR 系统能够有效检测铁路通信光缆的温度,对于铁路沿线光缆的温度监控和事故预防有一定辅助作用。

2 原理与装置

光纤中布里渊散射光相对于入射光有约 11 GHz 的频移,且该频移量与温度和应变均线性相关,布里渊频移与温度和应变的关系可表示为^[16]

$$\nu_B(e, T) = \nu_B(0, T_r) [1 + C_e e + C_T (T - T_r)], \quad (1)$$

式中 $\nu_B(e, T)$ 和 $\nu_B(0, T_r)$ 分别为对应温度和应变情况下的布里渊频移, C_T 和 C_e 分别为温度和应变的布里渊频移系数, e 为应变, T 为温度, T_r 为已知情况下的参考温度。

从(1)式可以看出,布里渊频移与温度和应变线性相关,温度和应变变化都有可能造成频移量的变化,即交叉敏感。但是在铁路既有线的监测实验中,铁路通信系统中的光缆是将光纤用油脂松套包覆,外层更有硬质的保护套,如图 1 所示,在光缆外侧仍有松套保护层,这种松套保护使得内部的光纤免受外界应变的干扰。

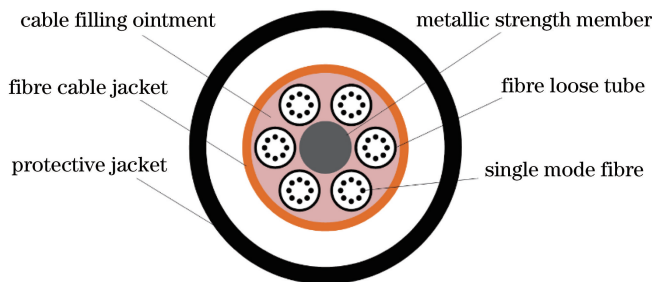


图 1 铁路既有线 48 芯通信光缆截面结构

Fig. 1 Cross section of 48-core communication fiber cable in railway existing fiber cable

从图 1 所示光缆结构可知,铁路既有光缆保护措施较好,最外一层有松套的硬质管保护,在长期埋设且没有变动的情况下,光纤应力处于稳定状态,因此光纤受到应变变化的影响可以忽略,即

$$\nu_B(T) = \nu_B(T_0) [1 + C_T (T - T_0)], \quad (2)$$

式中在 1550 nm 波段温度频移系数与布里渊频移的积 $C_T \nu_B \approx 1.1 \text{ MHz/K}$ ^[16]。令 T_0 为传感系统标定时的

温度,则系统所测的温度变化值为

$$\Delta T = T - T_0 = \frac{\nu_B(T) - \nu_B(T_0)}{C_T \nu_B(T_0)} \approx \frac{\nu_B(T) - \nu_B(T_0)}{1.1 \text{ MHz/K}} \quad (3)$$

BOTDR 传感系统的原理图如图 2 所示。一个波长为 1551.7 nm、功率为 20 mW 的半导体激光器作为主光源,经过 1:1 的耦合器分为两束。其中一束激光用于抽运布里渊激光器(BFL),该激光器相对于主光源有约 11 GHz 的频移,并使用扰偏器(PS)对其输出光偏振态进行随机化,这种经过扰偏的激光光源作为本地参考光。另一束激光经声光调制器(AOM)调制产生重复频率为 1 kHz、脉宽为 50 ns 的光脉冲,该脉冲作为探测脉冲,经过掺铒光纤放大器(EDFA)放大,然后通过环形器注入到待测光纤(FUT)中。光脉冲注入光纤中产生后向散射光,散射光再经环形器的三端口输出,与作为本地参考光的布里渊激光器输出进行相干拍频,拍频光由双平衡探测器(DBPD)探测接收转化为电信号,这种微弱电信号通过微波放大器(MWA)放大后被采样率为 3 GSa/s 的高速数据采集卡(DAQ)采集并传输到工控机中。AOM 和采集卡受同步信号发生器(SSG)触发控制,以保证光脉冲注入与数据接收的同步。数据处理程序对原始电压信号进行分段快速傅里叶变换(FFT)并多次平均(3000 次)后,通过洛伦兹曲线拟合获取布里渊频移的中心频率,该中心频率的变化量即与光缆温度相关。分段 FFT 的数据包含 5 m 范围内的散射光信号,系统空间分辨率为 5 m。

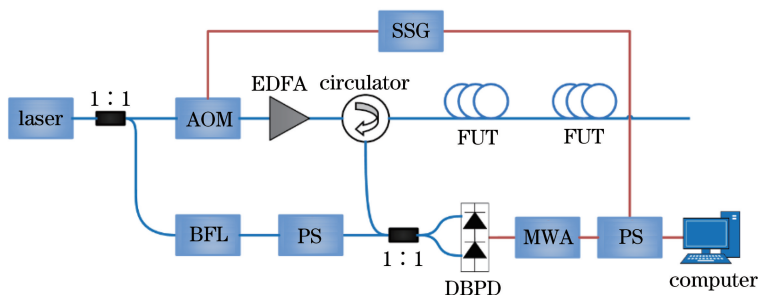


图 2 BOTDR 系统原理图

Fig. 2 Schematic of BOTDR system

利用 BOTDR 系统测试得到某一时刻的光纤布里渊频移,并以此作为标定参考值,根据(3)式,任一时刻所测的布里渊频移与此标定参考值的差值,即为这一时刻相对于标定时刻的温度变化值,根据这些温度变化值获取温度变化曲线以及温度变化速率。

3 实验结果与分析

早期铺设的光电缆线路大部分采用土壤直埋方式,在过桥过涵等特殊位置则会使用铁管包覆或水泥槽覆盖。这些陈旧的光电缆更容易发生事故,如电缆老化带来的短路起火、烧荒、失火、高温等。在土壤直埋区域,光电缆与外界隔离度较高,相对而言遭到破坏、侵蚀的概率更低,而在过桥过涵位置,光电缆与外界隔离度较低,更容易遭到破坏。针对各种铺设方式的光缆,分别进行温升实验,以监控光缆的温度状态及同槽电缆的温度状态。

3.1 水泥覆盖区域温度监测

在铁路沿线的部分区域,由于土质较硬难以挖掘,或者接近桥涵位置,光电缆铺设时会选择使用水泥槽倒扣将光电缆包覆其中,以保护光电缆。这些位置的光电缆一般离地表较近,甚至部分水泥脱落导致光电缆裸露在表面,这些区域的光电缆很容易受到外界影响。

实验过程中,在实际的光电缆线路上 14190 m 处的水泥覆盖区域附近用炭火烘烤,如图 3(a)所示,其中水泥槽厚度约 5 cm。对水泥槽道烘烤 2 h 后,撤去炭火令水泥自主降温,并检测从烘烤开始后 16 h 内的温度变化,从而得到温度变化曲线,如图 3(b)红色曲线所示。升温过程开始于 14:00,系统检测到温度的上升过程,经过约 2 h 的升温后最终温度上升到 10 °C 左右。再经过 2.5 h 后,水泥逐渐冷却,伴随着气温的降低,系统检测到光缆的温度慢慢下降,到次日凌晨 5:00 左右相对于前一天下午有大约 9 °C 的降温。图 3(b)中蓝线是未加热状态下的水泥槽道内温度变化,反映了同一过程中 15 h 内的温度变化趋势。

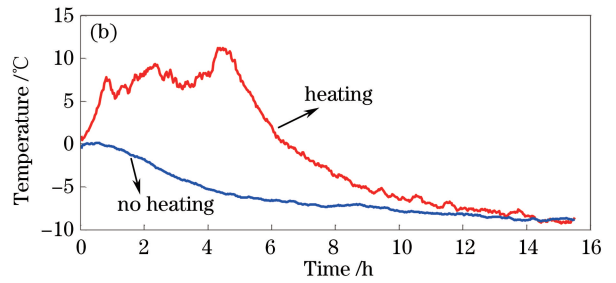


图3 (a)水泥包覆区域加热; (b)温度变化曲线

Fig. 3 (a) Heating cement cladding; (b) temperature change curves

3.2 铁管包覆区域温度监测

光缆经过桥梁或者涵洞时,会使用铁管包覆,铁管长期裸露在室外,容易受到外部环境的侵蚀。相对于土壤直埋和水泥覆盖而言,铁管包覆更容易受到外界影响,属于重点监测区域。如图4(a)所示,过涵洞的光缆保护铁管受到的腐蚀非常严重,且附近有大量枯枝等易燃物。在铁路既有光缆的4690 m处,将炭盆放置在距铁管30 cm的位置对铁管进行加热,得到15 h内的温度变化曲线,如图4(b)所示。在下午15:00左右开始升温,经过2 h的烘烤后撤走炭火,系统检测到温度的上升趋势,最终温度上升到8°C左右。经过1.5 h,也就是到晚上18:30之后,铁管开始逐渐冷却,伴随着气温的降低,系统检测到光缆的温度逐渐下降,到凌晨5:00左右相对于前一天下午有约2°C的降温。图4(b)中蓝色曲线为未加热状态下铁管内光缆的温度变化,反映了同一时间15 h内的温度变化趋势。

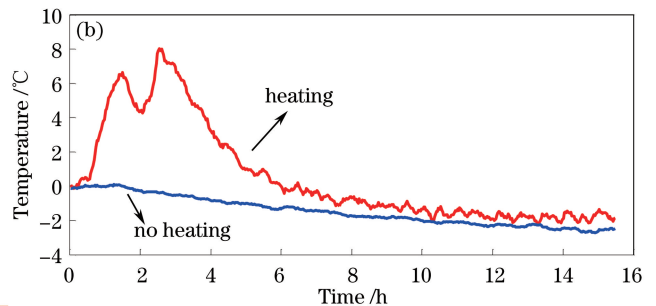


图4 (a)铁管包覆区域加热; (b)温度变化曲线

Fig. 4 (a) Heating iron piping; (b) temperature change curves

3.3 土壤直埋区域温度监测

铁路沿线光缆中,最简单直接的铺设方式为土壤直埋,一般埋设深度为50~80 cm,地表温度难以传输到光缆上。具有防水和防腐功能的保护套能够较好地保护光缆,因此一般直埋较深的光缆都较为安全。但是由于施工、土壤冲刷等原因,部分区域光缆埋设不够深,易受外界影响。实验过程中选取一段直埋较浅的区域进行升温实验,在铁路既有光缆的14205 m处,光缆距地表约40 cm,先在地表进行模拟烧荒,经过2 h后发现没有检测到温度变化,撤走炭火慢慢挖开泥土,挖掉约25 cm左右厚度的泥土后发现泥土没有温度变化,说明短时间内温度难以渗透到25 cm以下的泥土中。将炭火重新覆盖在只有约15 cm厚度的泥土上,系统检测到光缆的温度在缓慢升高,升温速率约1°C/h,最终温度升高到6°C左右。4 h后撤离炭火,为防止发生事故将该位置重新用泥土覆盖,检测发现15 h后温度依然保持在6°C左右,说明泥土的保温性能较好,热量尚未散掉。图5(b)中蓝色曲线为土壤直埋区域同一时间段内的温度变化,说明土壤直埋处光缆基本不受外界温度影响。

监测实际铁路线路时,首先需要对线路上的铺设情况进行详细的定标测试,获取每一个位置的铺设方式,包括直埋深度等信息。在土壤直埋区域,一般不会出现温度的大范围变化,若温度缓慢升高,说明光缆上方有烧荒或其他异常情况,需要通知巡检人员前去查看。在加热过程中,系统检测到水泥槽道或管道在升

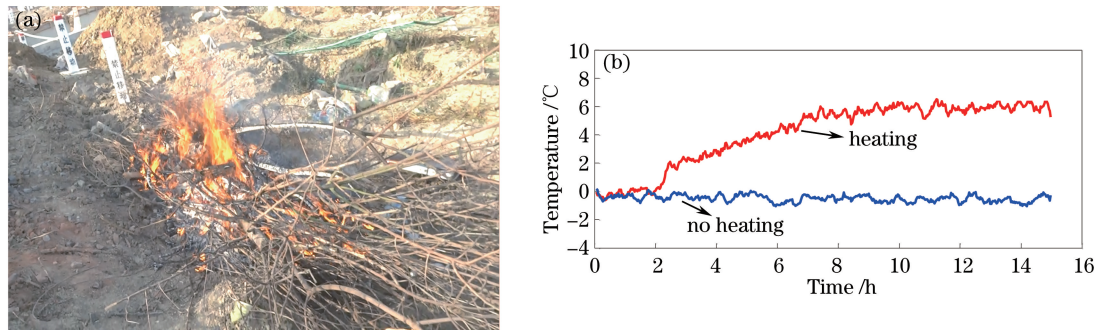


图5 (a)土壤直埋区域加热;(b)温度变化曲线

Fig. 5 (a) Heating directly buried laying; (b) temperature change curves

温一段时间后,会先下降 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,然后再次快速升温,达到最大值之后再开始缓慢降温。这种现象不是系统测量误差引起的,未加热时的温度变化曲线中没有出现此类抖动,土壤覆盖区域也没有出现这种现象,水泥覆盖和铁管包覆区域都存在一定的空气隔离,温度变化过程较为复杂。铁管包覆或水泥槽道覆盖区域属于需要重点监控的位置,这些位置温度随气温的变化也较为明显,但这种情况下温度变化速度不快。根据天气情况可以判断温度变化是否处于正常状态,当出现异常温度变化如烧荒时,温度变化速度较快,温升速率大于 $8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$,最终温度升高 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。根据温度变化值和温度变化速率,可以判别重点监控区域是否发生异常。

4 结 论

BOTDR系统能够有效地监控铁路通信光缆的温度,对于铁路通信光缆的安全监测具有一定意义。针对线路上几种代表性铺设方式的光缆分别进行温升测试,实验结果表明,系统能够获取光缆所处环境的温度变化趋势。由于光缆受到重重保护,因而传导至光缆纤芯的温度有很大的衰减。需要重点监测的区域为水泥槽道覆盖和铁管包覆的过桥过涵区域,在外界加热后检测到的温度变化为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,温升速率大于 $8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$,可以根据温度变化量和变化速率进行综合温升告警。

参 考 文 献

- 1 庞维生. 铁路通信光缆线路的维护[J]. 铁路技术创新, 2014(1): 41-45.
- 2 赵少琛. 光缆线路维护的特点及对策[J]. 科技创新与应用, 2013(12): 47.
- 3 Dakin J P, Pratt D J, Bibby G W, *et al.* Distributed optical fiber Raman temperature sensor using a semiconductor light source and detectors[J]. Electronics Letters, 1985, 21(13): 569-570.
- 4 Hwang D, Yoon D J, Kwon I B, *et al.* Novel auto-correction method in a fiber-optic distributed-temperature sensor using reflected anti-Stokes Raman scattering[J]. Optics Express, 2010, 18(10): 9747-9754.
- 5 Liu Jiansheng, Li Zheng. Physical essentials and design considerations of temperature calibration for distributed optic fiber Raman temperature sensing system[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(10): 1168-1171.
刘建胜, 李 铮. 光纤拉曼测温系统的温度标定及设计考虑[J]. 光学学报, 2003, 23(10): 1168-1171.
- 6 Tkach R W, Chraplyvy A R, Derosier R M. Spontaneous Brillouin scattering for single-mode optical-fibre characterisation [J]. Electronics Letters, 1986, 22(19): 1011-1013.
- 7 Horiguchi T, Kurashima T, Tateda M. Tensile strain dependence of Brillouin frequency dependency shift in silica optical fibres[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1989, 1(5): 107-108.
- 8 Peng Jiaobo, Bian Zhenglan, Hao Yunqi, *et al.* Frequency locking of two DFB lasers for distributed optical fiber sensing applications[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(7): 0705001.
彭交波, 卞正兰, 郝蕴琦, 等. 用于布里渊分布式光纤传感的光学锁频系统[J]. 中国激光, 2012, 39(7): 0705001.
- 9 Liu Wenzhe, Zhang Yanjun, Fu Xinghu, *et al.* A model research of BOTDR signal processing based on G-Simplex coding [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(9): 090601.
刘文哲, 张燕君, 付兴虎, 等. 基于G-Simplex编码的BOTDR信号处理模型研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52

- (9): 090601.
- 10 Rogers A. Distributed optical-fibre sensing[J]. *Measurement Science and Technology*, 1999, 10(8): R75-R99.
- 11 Alahbabi M N, Cho Y T, Newson T P. 150-km-range distributed temperature sensor based on coherent detection of spontaneous Brillouin backscatter and in-line Raman amplification[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2005, 22(6): 1321-1324.
- 12 de Merchant M, Brown A, Bao X, *et al.* Structural monitoring by use of a Brillouin distributed sensor[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(13): 2755-2759.
- 13 Song Muping, Li Zhicheng, Qiu Chao. A 50 km distributed optical fiber sensor based on Brillouin optical time-domain analyzer[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(6): 1426-1429.
宋牟平, 励志成, 裘超. 50 km 长距离布里渊光时域分析分布式光纤传感器[J]. *中国激光*, 2010, 37(6): 1426-1429.
- 14 Hao Y Q, Cao Y L, Ye Q, *et al.* On-line temperature monitoring in power transmission lines based on Brillouin optical time domain reflectometry[J]. *Optik*, 2015, 126(19): 2180-2183.
- 15 Chen Fuchang, Hu Jiacheng, Zhang Chengtao, *et al.* Distributed Brillouin optical fiber temperature sensor based on high frequency microwave technology[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(6): 0605009.
陈福昌, 胡佳成, 张承涛, 等. 基于高频微波技术的分布式布里渊光纤温度传感器[J]. *中国激光*, 2012, 39(6): 0605009.
- 16 Fang Z J, Chin K, Qu R H, *et al.* *Fundamentals of optical fiber sensors*[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc, 2012.