

doi:10.3788/gzxb20144312.1206002

# 分布式传感光纤应变和温度同时标定方法

吕安强<sup>a</sup>, 李永倩<sup>a</sup>, 李静<sup>b</sup>, 陈永<sup>a</sup>

(华北电力大学 a. 电子与通信工程系; b. 信息与网络管理中心, 河北 保定 071003)

**摘 要:**为了实现分布式传感光纤应变和温度响应系数的快速准确标定,提出了应变和温度同时标定法.利用恒温装置控制传感光纤和金属管的温度,利用金属管的线性热膨胀对缠绕其上的分布式传感光纤施加应变,通过恒温装置中的松弛传感光纤补偿金属管上传感光纤的温度,共同实现应变和温度的同时、快速、准确标定.利用恒温水浴和不锈钢管进行了单模裸纤布里渊频移应变和温度响应系数的标定实验,应变标定跨度  $620 \mu\epsilon$ ,温度标定范围  $35\sim 75\text{ }^\circ\text{C}$ ,得到单模裸纤布里渊频移的应变和温度响应系数分别为  $0.048 \text{ MHz}/\mu\epsilon$  和  $1.06 \text{ MHz}/^\circ\text{C}$ .结果表明该方法可用于小直径分布式传感光纤的应变和温度同时标定.

**关键词:** 光纤; 标定; 热膨胀; 应变; 温度; 传感器

**中图分类号:** TN253; TN29

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2014)12-1206002-5

## Simultaneous Calibration Method for Strain and Temperature of Distributed Sensing Optical Fibers

LÜ An-qiang<sup>a</sup>, LI Yong-qian<sup>a</sup>, LI Jing<sup>b</sup>, CHEN Yong<sup>a</sup>

(a. Department of Electronic and Communication Engineering, b. Information and Network Management Center, North China Electric Power University, Baoding, Hebei 071003, China)

**Abstract:** In order to realize the quick and accurate calibration for strain and temperature response coefficients of distributed sensing optical fibers, a novel method for simultaneous calibration of strain and temperature was proposed. The temperature of sensing fiber and metal tube was controlled by the thermostat. The strain of optical fiber twined around the metal tube was controlled by the linear thermal expansion of the metal tube. The temperature change of optical fiber around the metal tube was compensated by the loose fiber in the same thermostat. So that the simultaneous, quick and accurate calibration of strain and temperature can be realized. The strain and temperature response coefficients of Brillouin frequency shift of bare single-mode fiber were calibrated using a thermostatic waterbath and a stainless steel tube. The calibration span of strain was  $620 \mu\epsilon$ , the calibration range of temperature was  $35\sim 75\text{ }^\circ\text{C}$ . The strain and temperature response coefficients of Brillouin frequency shift of bare single-mode fiber were  $0.048 \text{ MHz}/\mu\epsilon$  and  $1.06 \text{ MHz}/^\circ\text{C}$  respectively. Experiment results indicate that the method can be used to calibrate the strain and temperature of minor diameter distributed sensing fiber simultaneously.

**Key words:** Fiber optics; Calibration; Thermal expansion; Strain; Temperature; Sensors

**OCIS Codes:** 060.2300; 000.3110; 120.3940; 120.4825; 120.0280

## 0 引言

分布式光纤传感技术具有分布式、长距离、不受电

磁干扰等优点,近年来在国内外成为研究热点<sup>[1-4]</sup>.常见的分布式光纤传感技术包括布里渊光时域反射(Brillouin Optical Time Domain Reflectometer,

**基金项目:**国家自然科学基金(Nos. 51407074, 61377088)、中央高校基本科研业务费专项资金(No. 13MS62)和河北省自然科学基金(No. E2012502045)资助

**第一作者:**吕安强(1979-),男,讲师,硕士,主要研究方向为分布式光纤传感技术. Email: lvaqdz@163.com

**导 师:**李永倩(1958-),男,教授,博士,主要研究方向为光通信与光传感技术. Email: liyongqian1958@163.com

**收稿日期:**2014-04-28; **录用日期:**2014-06-30

<http://www.photon.ac.cn>

BOTDR)、布里渊光时域分析(Brillouin Optical Time Domain Analyzer, BOTDA)、相干光时域反射( Coherent Optical Time Domain Reflectometry, COTDR)等<sup>[5-7]</sup>,它们能实现应变和温度的测量,应用于电力、石油、航空航天、土木工程等领域<sup>[8-10]</sup>.为了实现应变和温度的准确测量,分布式传感光纤必须在使用前进行标定,确定其应变和温度响应系数.由于厂家、型号、批次都能影响光纤的应变和温度响应系数,所以使用前需进行标定工作.

常用的温度标定方法是将松弛光纤放入高准确度的恒温装置中,控制温度在一定范围内离散变化,记录各点温度和分布式传感光纤测量数据,最后进行数据处理和拟合,获得温度响应系数<sup>[11-12]</sup>.应变标定主要有三种方法:1)将传感光纤绕置在定滑轮上,光纤一端固定,另一端用重物牵引,根据重力、光纤的截面积和弹性模量计算光纤受到的应变,实现应变的标定<sup>[13]</sup>;2)将传感光纤粘贴固定在等强度梁上,利用应变片和等强度梁应变的计算公式,实现应变的标定<sup>[12]</sup>;3)将传感光纤两段固定在高准确度位移控制平台上,利用高准确度位移控制实现应变的控制,从而实现应变的标定<sup>[14]</sup>.方法一使用灵活,实现简单,但定滑轮的安装角度和轴承润滑性能会影响光纤应变的均匀性和准确性;方法二中使用的等强度梁的挠度、厚度、距固定端长度、百分表位置、光纤和应变片粘贴方法等都会带来标定误差;方法三采用的高准确度位移控制平台可实现位移的精确控制,但没有考虑光纤自重和气流波动导致的附加应变.三种方法都是在空气中进行的,无法精确控制应变标定环境的温度稳定性和均匀性,即温度的波动会再次增加应变标定的误差.另外,应变和温度的分别标定也降低了标定的效率.因此,有必要研究一种新的应变和温度标定方法.

本文研究了金属管的线性热膨胀特性,提出利用金属管和恒温装置实现分布式传感光纤应变和温度同时标定的方法,设计了标定方案,计算了光纤应变与金属管线膨胀系数的关系,搭建了标定实验系统,以光纤布里渊频移的应变和温度响应系数标定实验为例,验证了方法的可行性和准确性.

## 1 应变和温度标定的理论模型

### 1.1 方案设计

为了提高应变标定的准确性,减少附加误差,应保证光纤在恒温环境下施加应变.传统方法需要较大的空间进行操作,很难实现操作空间的温度一致性和稳定性.目前控温较好的装置是恒温水/油浴,但这种装置一般空间很小,所以应变施加装置需小型化、易操作化.

在一定的温度范围内,金属具有良好的线性热膨

胀特性,如果能将金属的线性热膨胀转化为光纤的线性应变,在已知金属线性热膨胀系数和温度变化的条件下,就可以获得金属的热膨胀值,从而控制光纤的应变.同时,标定装置应该具有灵活控制被标定光纤长度和易操作等特点,因此,可设计标定用金属为圆柱形,将光纤均匀缠绕在圆柱体表面,通过设置圆柱体直径、长度、光纤缠绕圈数实现被标定光纤长度的控制,通过恒温水浴实现精确温控,进而精确控制光纤的应变.缠绕于金属圆柱上的光纤同时承受温度和应变,为了剔除温度的影响,可留出一段松弛光纤,置于同一恒温水浴中,让其只承受温度,不承受应变,在完成温度标定的同时,补偿金属圆柱上光纤的温度,实现应变的独立标定.标定装置如图1.

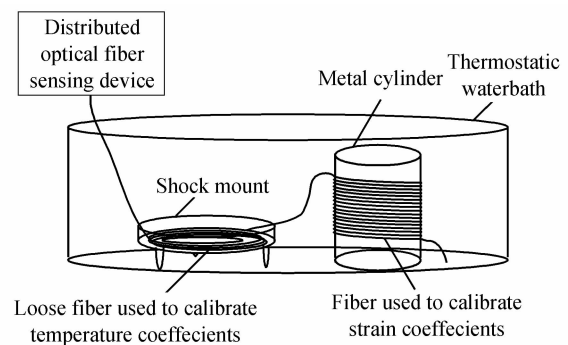


图1 应变和温度同时标定装置

Fig.1 Schematic diagram of simultaneous calibration device of strain and temperature

### 1.2 光纤应变的计算

根据线膨胀系数的定义,固体会因温度改变而导致长度变化,这种变化用线膨胀系数 $\alpha$ 来描述.如果长度为 $L$ 的固体因温度上升 $\delta\theta$ 而增加 $\delta L$ ,则

$$\alpha = \frac{\delta L}{L} \cdot \frac{1}{\delta\theta} = \frac{\epsilon}{\delta\theta} \quad (1)$$

式中, $\epsilon$ 是固体的应变.

由式(1)可知, $\alpha$ 是单位温度变化引起的固体应变,单位是 $K^{-1}$ ,对于给定的材料, $\alpha$ 值不是常量,而是随温度变化略有变化.低温时,线膨胀系数不会随温度升高而增加;高温时,线膨胀系数随温度升高而增加.如果温度增量趋向于0,则 $\alpha$ 趋向于特定温度上的线膨胀系数,在 $0\sim 100^\circ C$ 范围内可看做常量.

对于各向同性的柱形材料,直径的变化满足线膨胀系数.于是,周长变化率满足

$$\frac{\Delta p}{p} = \frac{2\pi r - 2\pi r_0}{2\pi r_0} = \frac{2\pi \Delta r}{2\pi r_0} = \frac{2\pi \alpha \cdot \delta\theta \cdot r_0}{2\pi r_0} = \alpha \cdot \delta\theta \quad (2)$$

式中, $\Delta p/p$ 是周长变化率,也就是光纤的应变, $r_0$ 和 $r$ 分别是金属棒热膨胀前后的直径, $\Delta r$ 是半径变化量.因此,在已知金属棒线性热膨胀系数的前提下,可通过设置温度实现光纤应变的控制.需要说明的是,金属棒轴向的热膨胀也会导致光纤的应变,可以通过减小光纤缠绕节距的方法将应变降低至可以忽略的范围.

### 1.3 金属棒的选择

待标定光纤缠绕于金属棒上,为了避免弯曲导致的损耗,金属棒的半径应大于光纤的最小弯曲半径,且金属棒表面应光滑,以保证热膨胀时光纤的均匀受力。

另外,实心金属棒重量大、热传导时间长导致实验不便,可以选用具有一定厚度的、内外径加工准确度和一致性好的金属管代替。这是因为热膨胀的实质是分子活动度增加,当温度增加时,金属分子的动能增加,分子间的距离变大,在材料满足均匀一致性时,各处热膨胀比例也一致,即不会出现内应力。从另一个角度考虑,可以把圆柱看成是多层圆管的紧密层套,只要温度变化缓慢、受热均匀,各层之间就不会有应力,它们的径向变化是一样的。因此,可以用任意壁厚的金属管代替金属棒,实现低成本、高效的标定。

金属管材料特性也是需要考虑的问题。分布式传感技术中使用的传感光纤可能用于不同的测量场合,光纤所处的实际应变和温度范围也是不同的,光纤的标定应对应其将来的应用范围。金属材料的线性热膨胀系数在不同温度范围内是不同的,应根据实际的范围查表获得金属管的准确系数,当温度范围跨越两个或多个区段时,应及时进行调整,以保证标定的准确度。常用的金属材料有钢、铝、铜等。

## 2 标定装置和方法

### 2.1 标定系统

以 G.652 普通单模裸纤为例介绍标定系统。选择牌号为 1Cr18Ni9 的不锈钢管,在 20~100 °C 范围内,其线膨胀系数为  $15.5 \mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}$ ,金属管外径 80 mm,管壁厚度 4 mm。为了便于缠绕,同时避免金属管轴向热膨胀导致光纤的滑移,在金属管外壁上均匀刻出宽  $125 \mu\text{m}$ 、深  $62.5 \mu\text{m}$ 、节距  $200 \mu\text{m}$  的矩形螺纹,如图 2。凹槽尺寸的设置以方便被标定传感光纤放入、

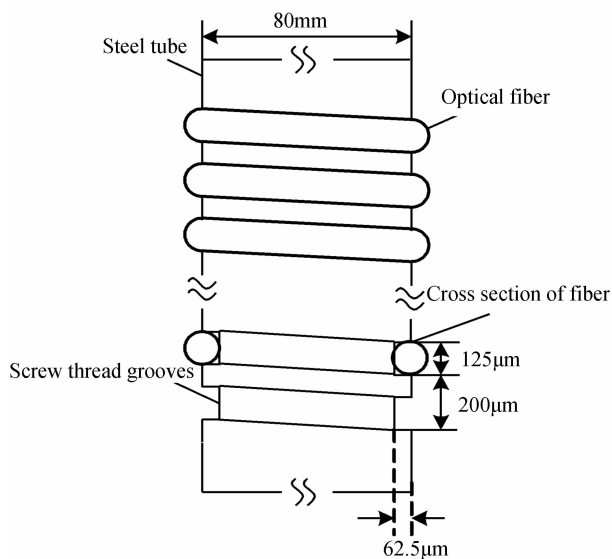


图 2 金属管与待标定光纤示意

Fig. 2 Schematic diagram of metal tube and fiber

避免轴向滑移为准;节距尽量小,以减少金属管轴向热膨胀导致的光纤应变增加,同时可保证金属管上能缠绕更长的光纤。

用防水胶将距离光纤末端 1~2 m 处的待标定光纤固定在金属管外壁上,固定位置应在螺纹凹槽的延长线上,以保证光纤轴向受力。从固定位置起,沿金属管壁上螺纹凹槽以恒定拉力缠绕待标定长度的光纤,根据需标定光纤的长度设置缠绕的圈数,最后用防水胶将另一端也固定在金属管管壁上。为保证以恒定拉力缠绕,需要在凹槽内涂抹起润滑作用的凡士林油,另外,用一定质量的砝码产生恒定拉力,通过缓慢转动金属管实现待标定光纤绕制,如图 3。砝码的质量可根据应变标定范围进行设置,应变标定起始值较大时可选用较大质量的砝码,为光纤施加预应变。

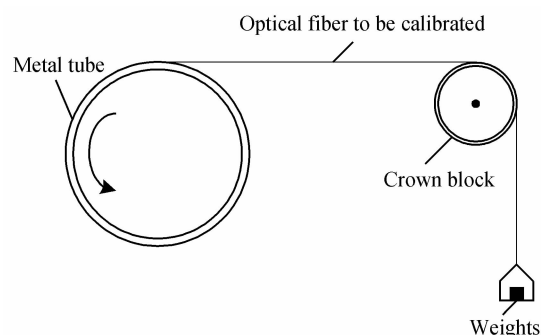


图 3 光纤缠绕示意

Fig. 3 Schematic diagram of twining fiber

金属管上的光纤绕好后,继续取一定长度的光纤,使其松弛盘绕放置在防震支架上,保证其不受恒温水浴中水流冲刷产生附加应变,同时保证弯曲半径大于光纤的最小弯曲半径。将缠绕待标定光纤的金属管和放置松弛待标定光纤的防震支架同时放入恒温水浴内,让二者保持一定距离,使其不会相互影响。最后将光纤接入分布式光纤传感设备上,如图 1。

### 2.2 标定步骤

以单模裸纤布里渊频移的应变和温度响应系数标定为例。光纤布里渊传感设备选用日本 Advantest 公司生产的 BOTDR 设备 N8511,传感光纤选用 G.652 单模裸纤,温度标定范围 30~80 °C,应变标定范围 0~1 000  $\mu\epsilon$ 。此范围内单模光纤具有较好的应变和温度线性度,选用恒温水浴的控温准确度为  $\pm 0.05 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,温控范围 5~95 °C。标定步骤为:

1) 控制恒温水浴使其分别稳定工作于 5 个温度点  $T = [35, 45, 55, 65, 75] \text{ } ^\circ\text{C}$ 。分别记录 5 个温度点处,松弛光纤上的布里渊频移  $\nu_{\text{BT}} = [\nu_{\text{BT}}(1), \nu_{\text{BT}}(2), \dots, \nu_{\text{BT}}(5)]$ ,金属管上光纤的布里渊频移  $\nu_{\text{BS}} = [\nu_{\text{BS}}(1), \nu_{\text{BS}}(2), \dots, \nu_{\text{BS}}(5)]$ ,则 35 °C、零应变下的光纤布里渊频移初始值为  $\nu_{\text{BT}}(1)$ 。

2) 定义每个温度点处金属管热膨胀使光纤应变增

加导致的布里渊频移变化量为

$$\Delta v_{BS}(n) = v_{BS}(n) - v_{BS}(1) - [v_{BT}(n) - v_{BT}(1)] \quad (3)$$

其中,  $1 \leq n \leq 5$ .

定义每个温度点处的温度变化量为

$$\Delta T(n) = T(n) - T(1) \quad (4)$$

定义每个温度点处金属管上光纤的应变变化量为

$$\Delta \epsilon(n) = \alpha \times \Delta T(n) \quad (5)$$

3) 用最小二乘法对  $v_{BT}(n)$  和  $T(n)$  进行线性拟合, 获得光纤布里渊频移的温度系数  $C_{vT}$ ; 用最小二乘法对  $\Delta v_{BS}(n)$  和  $\Delta \epsilon(n)$  进行线性拟合, 获得光纤布里渊频移的应变系数  $C_{v\epsilon}$ .

### 3 结果分析

#### 3.1 标定曲线分析

应变和温度标定光路如图 4. G. 652 普通单模光纤全长 5 686 m, 盘绕在光纤轴上, 末端 100 m 用于标定应变和温度系数, 其中 50 m 缠绕在金属管上, 另外 50 m 松弛盘绕放置在恒温水浴内的托盘上, 光纤轴放置在室温空气中, 整盘光纤通过跳线接入 BOTDR.

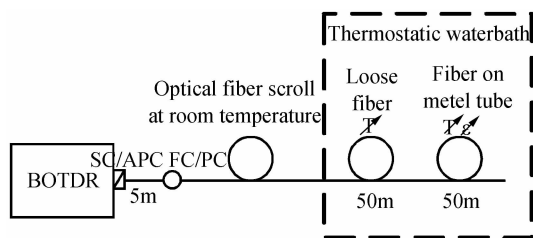


图 4 应变和温度标定系统

Fig. 4 Calibration system of strain and temperature

BOTDR 的参量设置为脉宽 50 ns、采样分辨率 0.2 m、平均次数  $2^{14}$ 、扫频范围 10.81~10.98 GHz、扫频步进 1 MHz、折射率 1.472 0. 恒温水浴控温从 35~75 °C 以 10 °C 步进往返一次, 每个温度点处 BOTDR 进行一次测量, 对应应变标定跨度为  $15.5 \mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K} \times (75 - 35) \text{K} = 620 \mu\epsilon$ , 得到的曲线如图 5. 由图可见,  $T_1$  左侧区间为光纤轴上光纤的布里渊频移, 在多次测量过程中, 由于空气温度的波动, 各次测量曲线出现了整体的上下波动, 最大波动幅度达到 7 MHz, 若在此环境下标定应变, 将导致大的标定误差.  $T_1 \sim T_2$  区间为放置在恒温水浴外侧的松弛光纤, 受恒温水浴温度影响, 幅度被小幅抬高.  $T_2 \sim T_3$  区间是松弛放置在恒温水浴中的光纤, 曲线水平度好, 说明恒温水浴的控温准确度、稳定性和均匀性较高, 曲线间的距离也基本相同, 说明布里渊频移与温度之间存在线性关系.  $T_3$  右侧区间是缠绕在金属管上光纤的布里渊频移, 曲线在距离方向上存在较大波动, 说明光纤在缠绕时各圈受力不均; 但不同温度点处曲线的形状保持不变, 说明金属管热膨胀导致光纤应变的增加是均匀且线性的; 可以通过距离上的平均消除曲线波动的影响.  $T_2$  右侧区

间的光纤都在恒温水浴内承受相同的温度, 但每条曲线上,  $T_3$  右侧区间比  $T_2 \sim T_3$  区间曲线整体偏高, 说明将光纤缠绕在金属管上时, 光纤被施加了预应变.

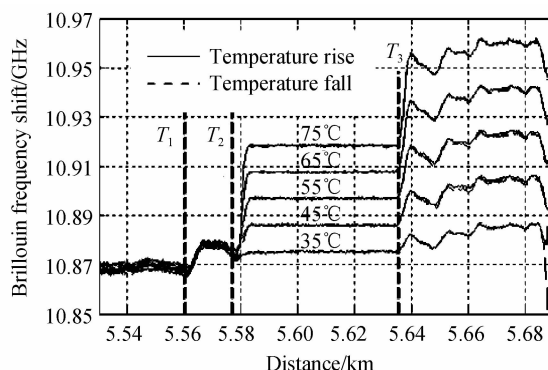
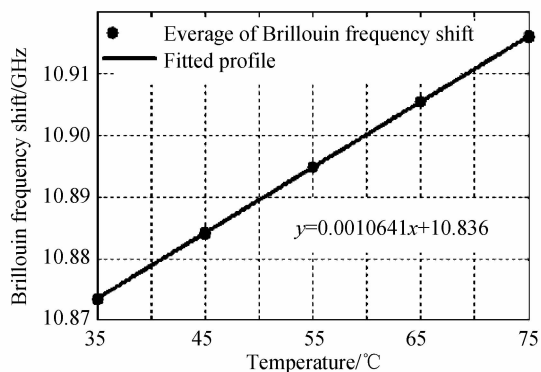


图 5 不同温度下的布里渊频移分布曲线

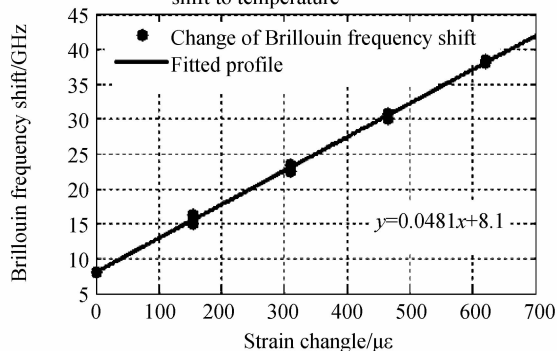
Fig. 5 Distributed profiles of Brillouin frequency shift at different temperatures

#### 3.2 拟合结果

对图 5 中每个温度下曲线的  $T_2 \sim T_3$  区间求平均, 对  $T_3$  右侧 5.64~5.68 km 曲线也求平均, 按照 2.2 节介绍的方法, 分别求布里渊频移对温度的拟合结果, 以及布里渊频移变化对应变变化的拟合结果, 得到图 6 所示的拟合曲线. 图 6(a) 的拟合确定系数为 1, 拟合标准差为  $6.523 \times 10^{-5}$  GHz; 图 6(b) 的拟合确定系数为



(a) Fitted profile of Brillouin frequency shift to temperature



(b) Fitted profile of Brillouin frequency shift change to strain change

图 6 布里渊频移的应变和温度响应系数拟合  
Fig. 6 Fitting for response coefficients of strain and temperature to Brillouin frequency shift

0.9983,拟合标准差为 0.462 5 MHz;布里渊频移的温度系数为 1.06 MHz/°C,应变系数为 0.048 MHz/ $\mu\epsilon$ ,与文献[15]中系数一致,标定实验证明了该标定方法及装置的可行性和准确性。

## 4 结论

本文提出了一种分布式传感光纤的应变和温度同时标定方法,设计了标定方案和装置,给出了应变标定的理论依据和标定实例,证明了标定方法和装置的可行性和准确性,结果表明:

1)可以利用金属管的线性热膨胀特性准确标定光纤的应变响应系数,通过选择不同线膨胀系数的金属和温度变化幅度可以控制应变施加的准确度和范围;

2)本文提出的标定方法和装置可以实现传感光纤应变和温度的同时标定,标定长度可通过选择金属管直径和长度灵活设置;

3)金属管上可以同时缠绕不同型号的传感光纤进行批量标定,大幅提高标定效率;通过合理设置金属管和螺纹尺寸,可实现其它小直径带护套传感光纤的应变和温度同时标定。

4)金属管上缠绕的光纤被拉伸时,光纤的波导会发生变化。当温度变化量较大、光纤拉伸应变变量很大时,光纤纤径变窄,截至频率变化,可能会对测量结果造成影响,拟在后期进行相关研究。

### 参考文献

- [1] LI Yong-qian, WANG Hu, LI Huan, *et al.* Theoretical model and experimental study of electro-optic modulator in rayleigh BOTDA system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(11): 1286-1291.  
李永倩,王虎,李欢,等. 瑞利布里渊光时域分析系统中电光调制器的理论模型与实验研究[J]. 光子学报, 2012, **41**(11): 1286-1291.
- [2] ZHANG Qi, ZHOU Jun, CHEN Jin-ping, *et al.* Temperature sensing characteristics of all-fiber Mach-Zehnder interferometer based bitapper-LPFG-bitaper structure [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(3): 307-310.  
张琪,周骏,陈金平,等. 基于 Bitaper-LPFG-Bitaper 结构的全光纤 Mach-Zehnder 干涉仪的温度传感特性[J]. 光子学报, 2013, **42**(3): 307-310.
- [3] XIA Tao, LI Xiao-bing, GUO Jiang-tao, *et al.* High precision temperature calculation method of fiber-optic distributed temperature sensing system based on iteration technique[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(7): 831-835.  
夏涛,李小兵,郭江涛,等. 光纤分布式测温系统中基于迭代法的高准确度温度解调算法[J]. 光子学报, 2012, **41**(7): 831-835.
- [4] HUANG Wen-fa, WANG Xiao-chao, WANG Jiang-feng, *et al.* Temperature characteristic of stimulated Brillouin scattering in single-mode fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **40**(4): 1-6.  
黄文发,汪小超,王江峰,等. 单模光纤中受激布里渊散射的温度特性[J]. 光子学报, 2013, **40**(4): 1-6.
- [5] LI Yun, BAO Xiao-yi, DONG Yong-kang, *et al.* A novel distributed Brillouin sensor based on optical differential parametric amplification [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, **28**(18): 2621-2626.
- [6] ZHOU Da-peng, LI Wen-hai, CHEN Ling, *et al.* Distributed temperature and strain discrimination with stimulated Brillouin scattering and Rayleigh backscatter in an optical fiber[J]. *Sensors*, 2013, **13**(2): 1836-1845.
- [7] ZHANG Xu-ping, HU Junhui, ZHANG Yi-xin. A hybrid single-end-access BOTDA and COTDR sensing system using heterodyne detection[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, **31**(12): 1954-1959.
- [8] LV An-qiang, LI Yong-qian, LI Jing, *et al.* Strain and temperature monitoring of optical fiber composite submarine power cable based on Brillouin optical time domain reflectometer[J]. *High Voltage Engineering*, 2014, **40**(2): 533-539.  
吕安强,李永倩,李静,等. 基于 BOTDR 的光纤复合海底电缆应变/温度监测[J]. 高电压技术, 2014, **40**(2): 533-539.
- [9] JIANG Qi, SUI Qing-mei. Technological study on distributed fiber sensor monitoring of high voltage power cable in seafloor [C]. 2009 IEEE International Conference on Automation and Logistics, 2009, (1-3): 1154-1157.
- [10] SUN Yi-jie, SHI Bin, CHEN Sen-en, *et al.* Feasibility study on corrosion monitoring of a concrete column with central rebar using BOTDR [J]. *Smart Structures and Systems*, 2014, **13**(1): 41-53.
- [11] JIN Zhong-xie, CUI Hai-jun, NING Feng, *et al.* Distributed optical fiber Raman temperature measurement system based on the dynamic multi-section temperature calibration [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(9): 1297-1302.  
金钟燮,崔海军,宁枫,等. 基于动态多段温度标定的分布式光纤 Raman 测温系统[J]. 光子学报, 2011, **40**(9): 1297-1302.
- [12] SUO Wen-bin, SHI Bin, ZHANG Wei, *et al.* Study on calibration of distributed optical fiber sensors based on BOTDR [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, **27**(9): 985-989.  
索文斌,施斌,张巍,等. 基于 BOTDR 的分布式传感光纤标定实验研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, **27**(9): 985-989.
- [13] MAUGHAN S M, KEE H H, NEWSON T P. Simultaneous distributed fibre temperature and strain sensor using microwave coherent detection of spontaneous Brillouin backscatter[J]. *Measurement Science and Technology*, 2001, **12**(7): 834-842.
- [14] JIA Xi-ge, LI Su-zhen, ZHAO Ming. Experimental characterization of a stimulated Brillouin optical-time domain analyzer system [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2011, **34**(3): 79-84.  
贾喜鸽,李素贞,赵鸣. 受激布里渊光时域测试系统性能标定实验研究[J]. 电子测量技术, 2011, **34**(3): 79-84.
- [15] PARKER T R, FARHADIROUSHAN M, HANDEREK V A, *et al.* Temperature and strain dependence of the power level and frequency of spontaneous Brillouin scattering in optical fibers[J]. *Optics Letters*, 1997, **22**(11): 787-789.