

BOTDR 的已敷设传感光纤温度和应变区分测量方法

吕安强¹, 李永倩¹, 李静², 刘征¹

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

摘要: 为了解决已敷设传感光纤中布里渊谱峰功率初值难以获取, 基于频移和功率双参量的温度和应变区分测量误差大等问题, 提出了解决方法。通过标定实验确定布里渊频移和相对谱峰功率的温度和应变系数、频移初始值; 根据布里渊散射功率特性方程, 通过试探法, 利用已敷设光路中温度和应变已知的参考光纤确定方程系数, 建立了谱峰功率初始值; 利用归一化方法克服了传感系统中乘性噪声导致的测量误差; 利用谱宽变化消除了温度和应变突变点处的谱峰功率异常峰值; 最后, 根据光纤复合海底电缆的现场情况建立了模拟光路, 并进行了温度和应变测量实验。结果表明, 在 5.6 km 处可实现 $\pm 4.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $\pm 110\text{ }\mu\text{e}$ 的测量精度, 可实现已敷设传感光纤整条光路上的温度和应变区分测量, 为工程应用提供了理论和实验依据。

关键词: 温度和应变区分测量; 布里渊光时域反射计; 已敷设光纤; 归一化;
布里渊功率分布初值

中图分类号: TN29 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2015)10-2952-07

Distinguish measurement of temperature and strain of laid sensing optical fibers based on BOTDR

Lv Anqiang¹, Li Yongqian¹, Li Jing², Liu Zheng¹

- (1. Department of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;
2. Information and Network Management Center, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: In order to solve the problems that the initial value of Brillouin peak power in laid sensing optical fibers is hard to be obtained and the measurement error of temperature and strain is large based on Brillouin frequency shift and peak power, the method of distinguish measurement of temperature and strain is proposed. The Brillouin frequency shift and relative peak power coefficients of temperature and strain, as well as initial Brillouin frequency shift, were obtained by calibration experiment. The coefficients in Brillouin power equation were obtained by heuristic method according to the reference fiber in known temperature and strain. Then the initial Brillouin power distribution along the laid fiber was obtained. The measurement error caused by multiplicative noises in sensing system was conquered by normalization. The spikes in the Brillouin peak power profiles at positions of changed temperature or

收稿日期: 2015-02-05; 修订日期: 2015-03-03

基金项目: 国家自然科学基金(51407074, 61377088); 河北省自然科学基金(E2015502053);
中央高校基本科研业务费专项资金(2015ZD 21)

作者简介: 吕安强(1979-), 男, 讲师, 博士, 主要从事分布式光纤传感方面的研究。Email: lvaqdz@163.com

strain were eliminated by using spectral width change. The simulated optical path of optical fiber composite submarine power cable in engineering field was established. The measurement experiment of temperature and strain was performed. The results indicate that the measurement accuracy are $\pm 4.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $\pm 110\text{ }\mu\text{e}$ at 5.6 km. The distinguish measurement of temperature and strain for laid sensing fiber can be realized. The method can provide theoretical and experimental basis for engineering applications.

Key words: distinguish measurement of temperature and strain; Brillouin optical time domain reflectometer; laid sensing optical fiber; normalization; initial Brillouin power distribution

0 引言

由于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,近年来在国内外迅速发展。布里渊光时域反射计(BOTDR, Brillouin Optical Time Domain Reflectometer)以其传感距离远、单端测量、对温度和应变都敏感等特点广泛应用于电力、石油、航空航天、土木工程等各领域^[1-3]。考虑到成本与工程应用便利性,目前的传感光纤一般都采用 G.652 普通单模光纤,利用布里渊散射频移测量光纤的温度和应变。由于布里渊频移同时对温度和应变敏感,所以如何区分温度和应变成为一直以来国内外研究的热点。

目前,区分温度和应变的方法主要有以下几种:

(1) 利用并行排列的松套和紧套两根光纤,根据布里渊频移解算温度和应变;⁽²⁾ 利用布里渊散射频移和功率对温度和应变都敏感的特性,根据二元一次方程组解算温度和应变^[4-5];⁽³⁾ 利用布里渊频移和拉曼散射信号解算温度和应变^[6];⁽⁴⁾ 利用大有效面积光纤、保偏光纤、光子晶体光纤等特种光纤中布里渊散射信号的多峰现象解算温度和应变^[7-9]。方法(1)需要在工程应用前设计传感光缆结构,不适合已经敷设传感光纤的场合;方法(2)中布里渊散射功率的低信噪比会导致温度和应变测量精度的大幅下降,而且已敷设传感光纤的功率初值难以确定,这些都制约了该方法的工程应用;方法(3)可有效区分温度和应变,但两台设备导致成本上升,而且使用单模光纤测量温度的拉曼设备价格昂贵;方法四采用的特种光纤成本高,应用于工程还不成熟。综合比较以上四种方法,尽管方法二存在信噪比低和功率初值难以确定等问题,但其成本低且适合于已敷设的传感光纤。

文中提出基于布里渊频移和谱峰功率的已敷设传感光纤温度和应变区分测量方法。根据布里渊散射功率的特性方程,通过试探法,利用已敷设光路中温度和应变已知的参考光纤确定方程系数,建立谱峰功率初始值;利用归一化方法克服传感系统中乘性噪声导致的测量误差;利用谱宽变化消除温度和应变突变点处的谱峰功率异常峰值;最终实现温度和应变的区分测量。

1 理论依据

1.1 频移功率双参量计算方法

实验证明,光纤布里渊散射频移、谱峰功率与光纤的温度和应变存在线性关系^[10],对参考文献[10]中公式进行推导,可得:

$$\begin{bmatrix} T(z) \\ \varepsilon(z) \end{bmatrix} = \frac{1}{C} \begin{bmatrix} C_{Pe} & -C_{v\varepsilon} \\ -C_{PT} & C_{vT} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_B(z) - v_{B0} \\ \frac{P_B(z) - P_{B0}(z)}{P_{B0}(z)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_0 \\ \varepsilon_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $T(z)$ 和 $\varepsilon(z)$ 是光纤 z 处的温度和应变; $C = |C_{vT}C_{Pe} - C_{v\varepsilon}C_{PT}| \neq 0$, C_{vT} 和 $C_{v\varepsilon}$ 分别为布里渊频移的温度和应变系数; C_{PT} 和 C_{Pe} 分别为布里渊相对谱峰功率的温度和应变系数; $v_B(z)$ 是光纤 z 处的布里渊频移; v_{B0} 是光纤在 T_0 和 ε_0 下的初始频移; $P_B(z)$ 是光纤 z 处的布里渊谱峰功率; $P_{B0}(z)$ 是 T_0 和 ε_0 下光纤 z 处的谱峰功率初始值; T_0 和 ε_0 分别为光纤的温度和应变初始值。利用公式(1)可实现光纤应变和温度的测量。

1.2 布里渊谱峰功率分布初始值确定方法

公式(1)中的 C_{vT} 、 $C_{v\varepsilon}$ 、 C_{PT} 、 C_{Pe} 、 v_{B0} 、 T_0 、 ε_0 可通过实验室内的标定实验获得, $v_B(z)$ 和 $P_B(z)$ 是现场实测值, $P_{B0}(z)$ 和距离 z 有关,对于已敷设好的传感光纤,由于其周围环境的不确定性,很难直接获取。有报道利用 T_0 和 ε_0 下光纤朗道比是常数的特点,通过OTDR实测现场光纤的瑞利散射功率,利用朗道比计算出

$P_{B0}(z)$ ^[11]。该方法简单可行,能快速获取现场传感光路的 $P_{B0}(z)$,但由于 OTDR 测量的瑞利散射功率不可避免地存在噪声和整体波动,使 $P_{B0}(z)$ 信噪比下降,导致测量结果精度的降低。

光纤中布里渊散射功率可表示为^[12]:

$$P_B(z) = \frac{P_0 W S \alpha_B \nu}{2} e^{-2\alpha z} \quad (2)$$

式中: P_0 为入射脉冲光功率; W 为脉冲宽度; S 为布里渊散射的背向捕捉系数; α_B 为布里渊散射损耗系数; ν 为光纤中的光速; α 是光纤衰减系数。

令 $a = P_0 W S \alpha_B \nu / 2$, $b = -2\alpha$, 则公式(2)可表示为:

$$P_B(z) = a \cdot e^{bz} \quad (3)$$

在 T_0 和 ε_0 下必然存在 $a = a_0$ 和 $b = b_0$ 使公式(3)满足现场光纤的布里渊谱峰功率分布 $P_{B0}(z)$ 。以该分布曲线为基准,根据公式(1)即可计算出出现场光纤的温度和应变。 a_0 和 b_0 可以根据现场光纤的温度和应变确定。在现场,传感光纤总有一段处于值班室、光纤配线架或电缆沟等已知区域,该区域内的传感光纤一般不受应变且温度可测。可以利用试探法,手动修改参数 a 和 b ,当利用公式(1)计算出的该区域光纤温度和应变值与现场实测值一致时,当前参数就是 a_0 和 b_0 。

1.3 提高温度和应变测量精度的方法

分布式光纤传感系统由光学器件和电子器件构成,系统噪声主要包括加性噪声和乘性噪声两种^[13]。通过叠加平均可大幅消弱加性噪声,但对乘性噪声不起作用。设乘性噪声为 $N_M(i)$, $i=1, 2, 3, \dots$ 是测量次数,则实测的布里渊谱峰功率分布为 $N_M(i) \cdot P_B(z)$ 。由于乘性噪声受系统光源波动、放大器增益系数波动、光电探测器增益系数波动等多种因素影响,即使光纤在固定的温度和应变下,布里渊谱峰功率分布测量值也会出现整体波动,从而导致温度和应变测量精度的下降。可通过以下方法消除乘性噪声的影响。

在传感光路中引入一段参考光纤,让其处于 T_0 和 ε_0 下,则多次测量中参考光纤上的布里渊谱峰功率分布应该是不变的 $P_{B0}(z)$, z 的取值为参考光纤上的位置。第一次测量参考光纤的布里渊谱峰功率分布为 $N_M(1) \cdot P_{B0}(z)$, 则之后第 i 次测量值为 $N_M(i) \cdot P_{B0}(z)$, 由于乘性噪声的随机性, $N_M(1) \cdot P_{B0}(z) \neq N_M(i) \cdot P_{B0}(z)$, 二者的差值就是导致传感光纤测量误差的原因。因此,可以利用归一化的方法加以消除。

首先,利用参考光纤上的谱峰功率测量值计算乘性噪声变化倍数。

$$C_{NM}(i) = \frac{N_M(i) \cdot P_{B0}(z)}{N_M(1) \cdot P_{B0}(z)} = \frac{N_M(i)}{N_M(1)} \quad (3)$$

然后,对传感光纤第 i 次测量值 $P_B(z)$ 进行归一化处理,得到归一化功率:

$$P_{B_{norm},i}(z) = \frac{P_B(z)}{C_{NM}(i)} = \frac{N_M(i) \cdot P_B(z)}{C_{NM}(i)} = N_M(1) \cdot P_B(z) \quad (4)$$

式中: z 是传感光纤上的位置。

最后,利用公式(4)计算得到的归一化功率分布,根据公式(1)计算温度和应变,即可有效克服乘性噪声的影响。

公式(4)使传感光纤上每次的谱峰功率测量值有了相同的乘性噪声 $N_M(1)$,从而消除了乘性噪声波动导致的测量精度下降。

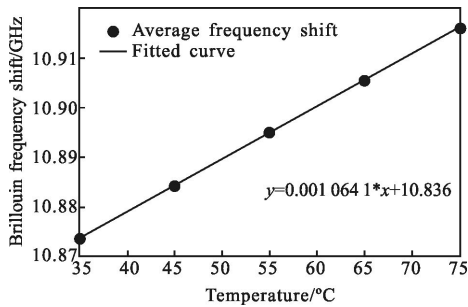
2 测量实例

为了证明文中方法的可行性和有效性,对基于 BOTDR 的光纤温度和应变测量方法进行实验验证。BOTDR 采用日本 Advantest 公司生产的 N8511,输出脉冲功率 25 dBm、脉宽 50 ns、平均次数 2^{14} ,光纤采用 G.652 普通单模裸纤。

2.1 标定

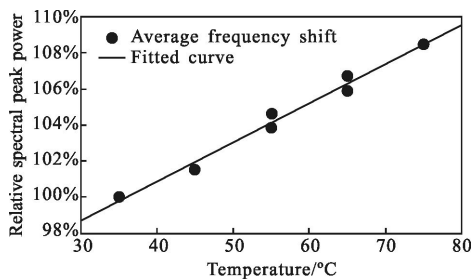
采用 ± 0.05 °C 控温精度的恒温水浴标定光纤布里渊频移和相对谱峰功率的温度系数以及频移初始值。取待标定光纤 50 m,松弛盘绕放于恒温水浴中,一端经跳线接 BOTDR,控制恒温水浴在 35 °C、45 °C、55 °C、65 °C、75 °C 5 个温度点往返一次,记录 5 个温度点处的布里渊频移和谱峰功率,利用最小二乘法对它们在每个温度点处的均值和温度进行线性拟合,结果如图 1 所示。图 1(a)的拟合确定系数为 1,拟合标准差为 6.523×10^{-5} GHz;图 1(b)的拟合确定系数为 0.983 9,拟合标准差为 0.414 1%;布里渊频移的温度系数为 1.06 MHz/°C,35 °C 时布里渊频移初值为 10.874 GHz,以 35 °C 时布里渊谱峰功率为基准的相对谱峰功率温度系数为 0.217%/°C。利用滑轮组对 20 m 光纤施加 500 $\mu\varepsilon$ 、1 500 $\mu\varepsilon$ 、2 500 $\mu\varepsilon$ 、3 500 $\mu\varepsilon$ 、4 500 $\mu\varepsilon$ 的应变,往返一次,用同样的方法处理数据,得到布里渊频移的应变系数为 0.048 MHz/ $\mu\varepsilon$,以 35 °C 时布里渊谱峰功率为基准的相对谱峰功率应变系数为 4.428×10^{-4} %/ $\mu\varepsilon$ 。以上结果与参考文献[10]中

报道的系数基本一致。



(a) 布里渊频移对温度的拟合曲线

(a) Fitting profile of Brillouin frequency to temperature



(b) 相对谱峰功率对温度的拟合曲线

(b) Fitting profile of relative peak power to temperature

图 1 布里渊散射的温度系数拟合

Fig.1 Fitting for temperature coefficients to Brillouin scatter signal

2.2 温度和应变的同时测量

以参考文献[1]所述光纤复合海底电缆现场监测光路为例。BOTDR 经 5 m 跳线接入光纤配线架,配线架后面是约 190 m 普通光缆,之后是 2.8 km 光纤复合架空地线(OPGW),最后连接光纤复合海底电缆中的光纤。监测系统利用 BOTDR 测量光纤复合海底电缆中光纤的温度和应变。建立图 2 所示的模拟光路,用 L1 处光纤模拟现场值班室内的普通光缆,通过恒温水浴控制 L1 温度为 35 °C,应变为零,模拟光缆的实际状态,将 L1 作为参考光纤,用来进行布

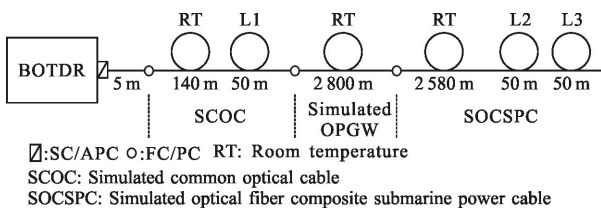


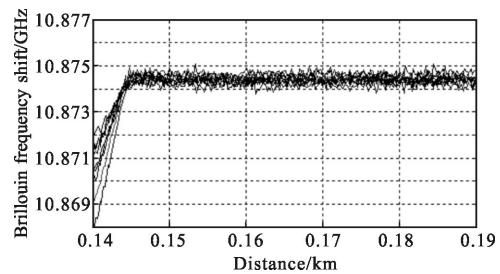
图 2 光纤复合海底电缆模拟光路

Fig.2 Simulated optical path for optical fiber composite submarine power cable

里渊谱峰功率归一化;用 L2 处光纤模拟海底电缆登陆点电缆沟内的海缆末端富余光纤,该光纤温度已知,用来确定传感光纤布里渊散射功率特性方程中的系数 a_0 和 b_0 ,进而获得 $P_{B_0}(z)$;对 L2 和 L3 施加变化温度 35 °C、45 °C、55 °C、65 °C、75 °C,同时将 L3 绕制在金属管上,利用热膨胀对 L3 施加应变,最终验证温度和应变同时测量方法的有效性。

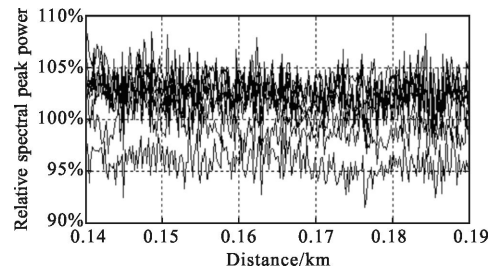
2.2.1 功率归一化

用 BOTDR 测量整条光路,观察不同温度时 L1 处光纤的布里渊频移和相对谱峰功率,如图 3 所示。图 3(a)中,L1 的布里渊频移整体波动只有 ± 0.25 MHz,对应 ± 0.2 °C 的测量精度。图 3(b)中的相对谱峰功率



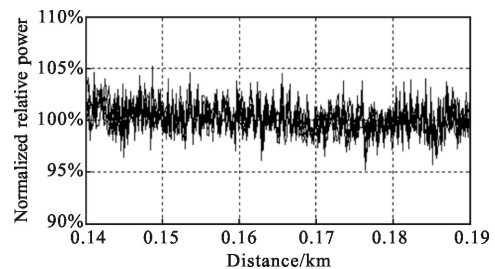
(a) L1 的布里渊频移分布曲线

(a) Brillouin frequency shift distribution profiles of L1



(b) L1 的相对谱峰功率分布曲线

(b) Relative peak power distribution profiles of L1



(c) L1 的归一化相对谱峰功率分布曲线

(c) Normalized relative peak power distribution profiles of L1

图 3 归一化前后的布里渊散射分布曲线

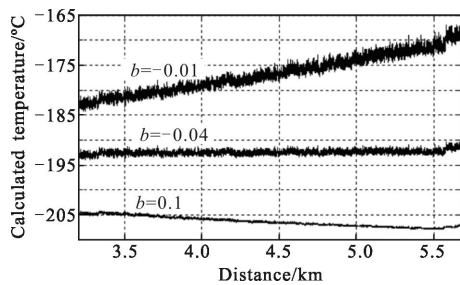
Fig.3 Brillouin scatter distribution profiles before and after normalization

的整体波动有±5%,对应±23.0℃的测量精度,采用频移和相对谱峰功率双参量计算温度和应变时,若不进行归一化处理将导致测量精度的大幅下降。图 3(c)为归一化后的谱峰功率分布,曲线整体波动已被消除,每条相对谱峰功率曲线的波动幅度约为±1.25%,对应±5.8℃的测量精度。

2.2.2 确定谱峰功率初始值

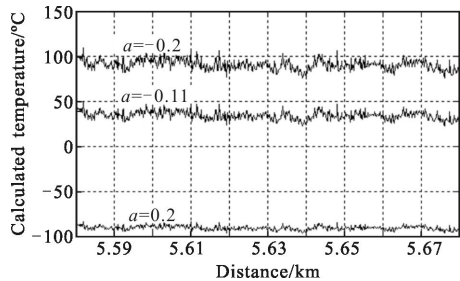
根据 1.2 节的方法,采用 2.1 节标定的布里渊散射信号温度和应变系数,取 35℃和 0 με 为计算初值,采用试探法确定系数 a_0 和 b_0 。

首先确定系数 b 。设置 $a=1$,选取两个相差较大的值作为 b 的试探值,分别代入公式(3),观察光路中模拟海缆光纤的测量结果,如图 4 所示。图 4(a)中画出了 b 取 0.1、-0.1 和 -0.04 时计算出的模拟海缆光纤温度曲线。 b 取 0.1 和 -0.1 时,曲线分别出现了下降和上升的趋势,这与模拟海缆光纤的温度分布斜率不符;但两个取值导致的分布趋势是相反的,所以正确值应该在两次取值之间。通过几次试探,最终取 -0.04 时,曲线趋于水平,该值即可作为 b_0 的正确值。



(a) 系数 b 的试探结果

(a) Trial results of coefficient b



(b) 系数 a 的试探结果

(b) Trial results of coefficients a

图 4 系数 a 和 b 的确定

Fig.4 Determination of coefficients a and b

观察曲线还可发现,温度计算值在 -190℃附近,与实际值不符,需要调整系数 a 。同样采用试探法,

先确定 a 的大体取值范围,再确定 a 的正确取值,结果如图 4(b)所示。5.58~5.68 km 为已知温度和应变区间,该处温度为 35℃、应变为零,调整系数 a 为 -0.11 时,计算结果与实际值相符。

因此, a 取 -0.11, b 取 -0.04 时,公式(3)代表的曲线就是模拟海缆光纤在 35℃、0 με 下的布里渊谱峰功率初值 $P_{B0}(z)$ 。

2.2.3 消除异常尖峰

布里渊散射谱服从洛伦兹分布,谱宽与入射脉冲宽度有关,当脉冲宽度一定时受光纤温度和应变影响不大。但是,若光纤上温度或应变发生突变的长度与 BOTDR 空间分辨率相当,布里渊谱宽会发生变化。这是因为布里渊散射谱测量的是脉冲长度内光子和声子相互作用的平均效果,若脉冲光跨越了温度或应变突变点,突变点前后的布里渊散射频移分别对应突变点前后的温度或应变,即布里渊谱会产生双峰现象,导致谱宽增加,谱峰功率下降,如图 5 所示。谱峰功率 1 中左边的负峰是温度突然增加导致的,右边的负峰是应变突然增加导致的;两个负峰处分别对应出现了两个谱宽的增加。

谱峰功率的负峰会直接影响温度和应变的计算结果,必须消除。观察曲线发现,温度或应变增加幅度越大,谱宽展宽越大,可以根据谱宽增加值修正布里渊谱峰功率。统计测量数据发现,谱宽每增加 1 MHz,谱峰功率下降 0.6%。据此修正谱峰功率得到图 5 中的谱峰功率 2 曲线。修正后的谱峰功率已看不到明显的负峰。

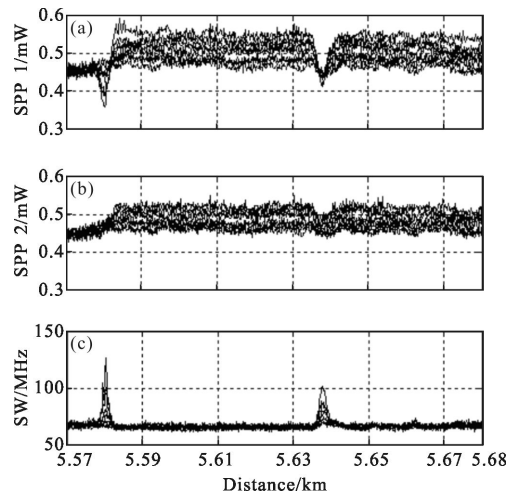


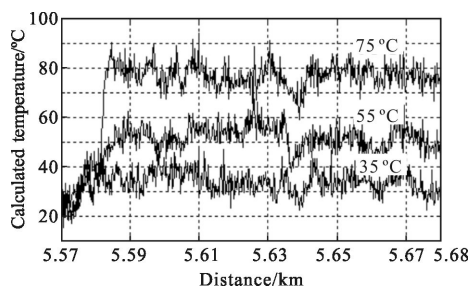
图 5 谱峰功率与谱宽曲线

Fig.5 Distribution profiles of peak power and spectrum width

(SPP: Spectral Peak Power, SW: Spectral Width)

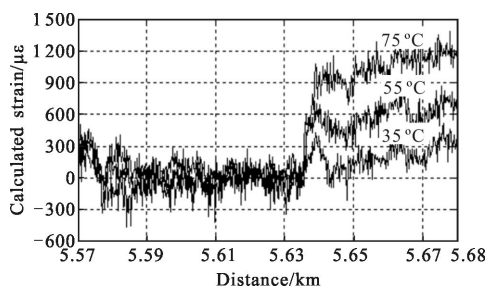
3 实验结果分析

经过前面的工作,利用公式(1)计算海缆内光纤的温度和应变,结果如图 6 所示。图中画出了 35 °C、55 °C、75 °C 时,L2 (5.58~5.635 km) 和 L3 (5.635~5.68 km) 上的温度和应变分布。由图 6(a)可知,虽然 L3 承受着金属管热膨胀带来的应变,但它的温度与 L2 相同,因此在每个温度点处,L2 和 L3 基本保持水平;计算 L2 上的标准差得温度测量精度为 ± 4.3 °C。图 6(b)曲线中的 L2 光纤松弛盘绕,应变为 0,L3 承受着金属管热膨胀带来的应变。金属管的热膨胀系数为 $15.5 \mu\text{m}/\text{m} \cdot \text{K}$,20 °C 温度变化导致的应变为 $310 \mu\epsilon$,与图中相邻曲线间的应变差值一致。L3 上曲线的波动是缠绕时用力不均匀所致,35 °C 时 L3 上的应变是缠绕时给光纤施加的预应力。计算 L3 上的标准差得应变测量精度为 $\pm 110 \mu\epsilon$ 。温度和应变测量精度可基本满足海缆状态监测的要求。



(a) 计算出的温度分布

(a) Calculated temperature distribution



(b) 计算出的应变分布

(b) Calculated strain distribution

图 6 温度和应变计算结果

Fig.6 Calculated results of temperature and strain

4 结论

文中利用 BOTDR 测量的布里渊散射频移和谱

峰功率实现了已敷设传感光纤的温度和应变区分测量,得出以下结论:

(1) 已敷设传感光纤受周围环境影响,其布里渊散射谱峰功率初始值难以确定,可根据布里渊散射功率的特性方程,采用试探法,结合已敷设光路中温度和应变已知的参考光纤确定方程系数,建立高信噪比的谱峰功率初始值。

(2) 谱峰功率值受乘性噪声、温度和应变突变等因素的影响,会出现整体浮动和异常峰值。利用归一化及谱宽增加值修正谱峰功率的方法,可有效去除计算误差。

(3) 在布里渊散射信号信噪比一定的条件下,频移的测量精度大大高于谱峰功率,利用二者计算温度和应变时,最终的精度由后者决定。工程应用中,可通过增大脉冲光功率、脉宽、平均次数等方法提高系统测量精度。

参考文献:

- [1] Lv Anqiang, Li Yongqian, 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.
- [2] Jiang Q, Sui Q. Technological study on distributed fiber sensor monitoring of high voltage power cable in seafloor[C]// United States: IEEE Computer Society, 2009: 1154-1157.
- [3] Sun Y, Shi B, Chen S, 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.
- [4] Wait P C, Newson T P. Landau Placzek ratio applied to distributed fibre sensing [J]. *Opt Commun*, 1996, 122: 141-146.
- [5] 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.
- [6] Alahbabi M N, Cho Y T, Newson T P. Simultaneous distributed measurements of temperature and strain using spontaneous Raman and Brillouin scattering [C]//Proceedings of EWOF'S'04, 2004: 488-491.
- [7] Liu X, Bao X. Brillouin spectrum in LEAF and simultaneous

- temperature and strain measurement [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(8): 1053–1059.
- [8] Dong Y, Chen L, Bao X. High-spatial-resolution time-domain simultaneous strain and temperature sensor using Brillouin scattering and birefringence in a polarization-maintaining fiber [J]. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 2010, 22(18): 1364–1366.
- [9] Li T, Dong X, Chan C C, et al. Simultaneous strain and temperature measurement based on a photonic crystal fiber modal-interference interacting with a long period fiber grating[J]. *Optics Communications*, 2012, 285(24): 4874–4877.
- [10] 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.
- [11] Sakairi Y, Uchiyama H, Li Z X, et al. System for measuring temperature and strain separately by BOTDR and OTDR[C]// SPIE, 2002, 4920: 274–284.
- [12] Aoyama K, Nakagawa K, Itoh T. Optical time domain Reflectometry in a single-mode fiber[J]. *Quantum Electron*, 1981, QE-17(6): 862–868.
- [13] Zhang Huayong, Zhang Min, Wang Liwei, et al. Output noise analysis of optical fiber interferometric sensors using a 3×3 coupler[J]. *Measurement Science and Technology*, 2011: 1–9.