

doi: 10.3788/gzxb20164511.1106004

基于宽带光源和自外差检测的布里渊光时域 反射温度传感系统

李晓娟, 李永倩, 何玉钧, 张立欣

(华北电力大学 电子与通信工程系, 河北 保定 071003)

摘 要:为简化系统结构、减小相干瑞利噪声对系统性能的影响,提出了一种采用宽带光源的瑞利和布里渊散射自外差检测布里渊光时域反射温度传感系统.分析了瑞利和布里渊自外差检测原理,研究了布里渊频移和自外差信号功率与光纤温度和应变的关系.设计并搭建采用宽带光源的自外差检测布里渊光时域反射温度传感系统,获得了常温下沿光纤分布的自外差信号功率谱及不同温度时加热段光纤的功率谱,验证了布里渊频移和自外差信号相对功率变化随温度的线性增加关系.通过实验数据获得的布里渊频移和相对功率变化的温度系数分别为 1.07 ± 0.01 MHz/°C 和 $(0.37 \pm 0.09)\%$ /°C. 本文的研究结果为基于瑞利和布里渊自外差检测布里渊光时域反射传感系统的温度和应变同时测量提供了理论和实验依据.

关键词: 光纤光学; 布里渊散射; 瑞利散射; 自外差检测; 布里渊频移

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)11-1106004-6

Temperature Sensing System Based on Brillouin Optical Time Domain Reflectometer with Broad-band Laser and Self-heterodyne Detection

LI Xiao-juan, LI Yong-qian, HE Yu-jun, ZHANG Li-xin

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

Abstract: To simplify the system structure and reduce the effect of coherent Rayleigh noise on system performance, a temperature sensing system based on Brillouin optical time domain reflectometry by employing broad-band laser and self-heterodyne detection of Rayleigh and Brillouin scattering was proposed. The principle of self-heterodyne detection of Rayleigh and Brillouin scattering was analyzed, and the relationships of Brillouin frequency shift and self-heterodyne detection signal power with temperature and strain were studied. A temperature sensing system based on Brillouin optical time domain reflectometry by employing broad-band laser and self-heterodyne detection was designed and constructed, the power spectrum of self-heterodyne detection signal along the sensing fiber at room temperature and the power spectra of the heated fiber at different temperature were obtained. The linear increase relationships of Brillouin frequency shift and change in relative self-heterodyne detection signal power with temperature were demonstrated. The temperature coefficients of Brillouin frequency shift and change in relative power were experimentally obtained to be 1.07 ± 0.01 MHz/°C and $(0.37 \pm 0.09)\%$ /°C. The results of this study can provide a theoretical and experimental basis for the simultaneous measurement of temperature and strain of Brillouin optical time domain reflectometer sensing system based on self-heterodyne detection of Rayleigh and Brillouin scattering.

Key words: Fiber optics; Brillouin scattering; Rayleigh scattering; Self-heterodyne detection; Brillouin

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61377088)、河北省自然科学基金(Nos. F2014502098, F2015502059)和中央高校基本科研业务费专项资金(No. 2014XS77)资助

第一作者: 李晓娟(1987-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为光通信与光传感. Email: dztxlxj@126.com

导师(通讯作者): 李永倩(1958-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光通信与光传感. Email: liyongqian1958@163.com

收稿日期: 2016-05-26; **录用日期:** 2016-08-16

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

frequency shift

OCIS Codes: 060.2370;290.5830;290.5900

0 引言

自1989年Culverhouse D等提出将受激布里渊散射(Stimulated Brillouin Scattering, SBS)作为一种分布式温度传感机理以来^[1-3],布里渊光纤传感技术得到了广泛研究.其中,布里渊光时域反射(Brillouin Optical Time Domain Reflectometer, BOTDR)传感系统利用光纤中背向自发布里渊散射(Spontaneous Brillouin Scattering, SPBS)的频移和强度与温度和应变的线性关系,结合光时域反射脉冲定位技术,可实现温度和应变的同时测量,因其单端测量和结构简单等特点,在电力、石油、水利和建筑等行业大型设施健康诊断方面具有广阔的应用前景^[4-5].

SPBS信号的检测方式包括直接检测和外差检测.直接检测一般采用高分辨率的光学滤波器,如法布里-珀罗干涉仪^[6]、马赫-曾德干涉仪^[7]和高分辨率光纤布喇格光栅^[8],由于信号功率较低,且易受外界环境影响,测量准确度较低.为了提高系统信噪比和测量准确度,通常采用本地外差和自外差方式对布里渊散射信号进行检测.2001年,Newson T P等^[9]通过本振光和布里渊散射光外差的方式检测SPBS信号,采用线宽1 MHz的窄谱光源在30 km光纤上实现了空间分辨率20 m、温度和应变分辨率4 °C和100 $\mu\epsilon$ 的同时测量;2009年,常天英等^[10]提出瑞利散射光和布里渊散射光自外差检测方案,通过采用线宽小于1 MHz的窄谱光源和本地光外差检测,对布里渊频移的温度和应变系数进行了标定.由于相干瑞利噪声(Coherent Rayleigh Noise, CRN)是瑞利散射的固有噪声^[11],在采用窄带光源的瑞利和布里渊散射自外差检测系统中,自外差信号强度的波动除受热噪声和散粒噪声影响外,主要受CRN的影响,且CRN无法通过叠加平均来减小,这将导致自外差检测系统中的强度信息无法利用.其次,因受SBS效应的影响,采用窄带光源时的入纤脉冲光功率较低,传感系统性能的提高受限.

为了简化系统结构和减小CRN对系统性能的影响,本文提出一种采用宽带光源的瑞利和布里渊散射自外差检测BOTDR温度传感系统.分析瑞利和布里渊自外差检测的原理,研究布里渊频移和自外差信号功率与光纤温度和应变的关系;设计并搭建了瑞利和布里渊自外差检测BOTDR传感系统,实现传感光纤的温度测量.

1 理论分析

1.1 自外差检测原理

通常情况下,分布反馈激光器(Distributed

Feedback-Laser Diode, DFB-LD)工作在单纵模状态,但由于激光器有源区中处于反转分布的粒子位于一个能带的离散能级上,因此单纵模内部是由多个等频率间隔、幅度随时间变化的谱线构成^[12].假设宽带DFB-LD带宽内包含 $2N+1$ 个谱线,LD输出光波经电光调制器(Electro-Optic Modulator, EOM)调制后进入传感光纤,其在光纤中传输时产生的瑞利和布里渊散射光场强分别表示为

$$E_R(t) = \sum_{q=-N}^N E_{Rq} \exp [i(2\pi\nu_{Rq}t + \varphi_{Rq})] \quad (1)$$

$$E_B(t) = E_S(t) + E_{AS}(t) = \sum_{q=-N}^N \{E_{Sq} \exp \{i[2\pi(\nu_0 + q\Delta\nu - \nu_{Bq})t + \varphi_{Sq}]\} + E_{ASq} \exp \{i[2\pi(\nu_0 + q\Delta\nu + \nu_{Bq})t + \varphi_{ASq}]\}\} \quad (2)$$

式中: E_{Rq} 为谱线 q 产生的瑞利散射光场强; ν_{Rq} 为谱线 q 产生的瑞利散射光频率,其与第 q 个谱线的探测光频率相等; φ_{Rq} 为谱线 q 产生的瑞利散射光相位. E_{Sq} 和 E_{ASq} 分别为谱线 q 产生的斯托克斯(Stokes)和反斯托克斯(Anti-Stokes)光场强; ν_0 为光源输出光中心频率, ν_{Bq} 为谱线 q 产生的布里渊频移, $\Delta\nu$ 为谱线频率间隔; φ_{Sq} 和 φ_{ASq} 分别为谱线 q 产生的Stokes光和Anti-Stokes光的相位.考虑到自发布里渊散射中 $E_{Sq} = E_{ASq}$,为了分析方便,这里仅考虑瑞利散射光和Stokes光的外差信号来分析瑞利散射和布里渊散射光的自外差输出,二者在光电探测器(Photoelectric Detector, PD)中进行相干检测时的输出光电流为

$$i(t) = R[\bar{E}_R(t) + \bar{E}_S(t)][E_R(t) + E_S(t)] = R\left\{\left\{\sum_{q=-N}^N \bar{E}_{Rq} \exp[-i(2\pi\nu_{Rq}t + \varphi_{Rq})]\right\} + \sum_{q=-N}^N \bar{E}_{Sq} \cdot \exp\{-i[2\pi(\nu_0 + q\Delta\nu - \nu_{Bq})t + \varphi_{Sq}]\}\right\} \times \left\{\sum_{q=-N}^N E_{Rq} \cdot \exp[i(2\pi\nu_{Rq}t + \varphi_{Rq})] + \sum_{q=-N}^N E_{Sq} \exp\{i[2\pi(\nu_0 + q\Delta\nu - \nu_{Bq})t + \varphi_{Sq}]\}\right\} = i_R(t) + i_S(t) + i_{RS}(t) \quad (3)$$

式中: $\bar{}$ 表示共轭; R 为PD响应度; i_R 和 i_S 、 i_{RS} 分别为瑞利散射光和Stokes光产生的光电流、二者的交叉光电流项.由于宽带光源输出的单个谱线线宽很窄,具有很强的相干性,但不同谱线的相位在时间上无关,是独立和随机的,因此,由瑞利散射光某一谱线与其在光纤中产生的布里渊散射光外差能够获得携带布里渊频移和强度信息的单频信号,而由瑞利散射光某一谱线不同谱线产生的布里渊散射光的外差信号将以组合频率的形式表现为一种随机的背景噪声.由带通滤波器(Band-Pass Filter, BPF)滤除式(3)中的直流项、和频及倍频项,则PD输出光电流为

$$i_{AC}(t) = 2R \sum_{q=-N}^N \sqrt{P_{Rq}(t)P_{Sq}(t)} \cdot \cos [2\pi\nu_{Bq}t + \varphi_{RSq}(t)] \quad (4)$$

式中: $P_{Rq}(t)$ 和 $P_{Sq}(t)$ 分别为 t 时刻谱线 q 产生的瑞利散射光和 Stokes 光功率; $\varphi_{RSq}(t)$ 为瑞利散射光和 Stokes 光的相位差,其值服从均匀分布.由式(4)可知,当采用宽带光源时,PD 输出光电流是每个谱线产生的瑞利散射光与布里渊散射光外差后的布里渊信号的叠加,因此可获得较高的信噪比.

1.2 自外差信号的温度和应变特性

由于瑞利散射光频率与光源输出光频率相同,通过检测瑞利和布里渊自外差输出信号频率即可获得布里渊频移.布里渊散射是由介质的声学特性、弹性力学和热弹性力学特性共同决定的非弹性散射,其布里渊频移可表示为^[13]

$$\nu_B = \frac{2nV_A}{\lambda} = \frac{2n}{\lambda} \sqrt{\frac{(1-\kappa)E}{(1+\kappa)(1-2\kappa)\rho}} \quad (5)$$

式中: n 为光纤纤芯折射率, V_A 为光纤中的声速, λ 为光源的中心波长; κ 为纤芯材料的泊松比, E 为杨氏模量, ρ 为密度.由于 n 、 E 、 κ 和 ρ 为温度和应变的函数,因此通过 ν_B 的测量可获得沿光纤分布的温度和应变信息.当温度或应变变化较小时,各参量随温度或应变的变化可通过泰勒级数展开的一次项近似,得到 ν_B 与温度 T 和应变 ε 的关系为^[3]

$$\nu_B(T, \varepsilon) = \nu_B(T_0, 0) + C_{vT}(T - T_0) + C_{v\varepsilon}\varepsilon \quad (6)$$

式中, $\nu_B(T_0, 0)$ 为初始温度 T_0 且无应变时的布里渊频移, C_{vT} 和 $C_{v\varepsilon}$ 分别为布里渊频移的温度和应变系数.

光源输出光在光纤中产生的瑞利散射光功率 P_R 和布里渊散射光功率 P_S 分别表示为^[14-18]

$$\begin{cases} P_R = \frac{P_0 c W \exp(-2\alpha z)}{3\lambda^2 A_{\text{eff}}^2} \pi^2 n^5 \rho_{12}^2 k \beta_T T_g \\ P_S = \frac{P_0 c W \exp(-2\alpha z)}{3\rho\lambda^2 A_{\text{eff}}^2 V_A^2} \pi^2 n^5 \rho_{12}^2 k T \end{cases} \quad (7)$$

式中: P_0 为入纤光脉冲峰值功率, W 为光脉冲宽度; c 为真空中的光速, α 为光纤衰减系数, z 为光纤散射点距始端的距离; A_{eff} 为光纤有效纤芯面积; ρ_{12} 为光弹常量; k 为玻尔兹曼常量; $\beta_T = 3(1-2\kappa)/E$ 为光纤材料在假想温度 T_g (熔融状态下的热动态密度波动冻结成玻璃状的温度)下的熔融等温压缩率.

由式(7)可知,瑞利散射功率和布里渊散射功率均与光纤所受温度和应变有关,因此通过测量自外差信号功率可获得沿光纤分布的温度和应变信息.通过泰勒级数展开,自外差信号功率 $P_{RS}(T, \varepsilon)$ 与温度 T 和应变 ε 的关系表示为

$$P_{RS}(T, \varepsilon) = P_{RS}(T_0, 0) [1 + C_{PT}(T - T_0) + C_{P\varepsilon}\varepsilon] \quad (8)$$

式中: $P_{RS}(T_0, 0)$ 为初始温度 T_0 且无应变时的自外差信号功率; C_{PT} 和 $C_{P\varepsilon}$ 分别为自外差信号相对功率变化的温度和应变系数.因瑞利和布里渊散射功率均为光

纤温度和应变的函数,根据式(4)可将 C_{PT} 和 $C_{P\varepsilon}$ 表示为

$$\begin{cases} C_{PT} = \frac{d\langle i_{AC}^2(t) \rangle}{\langle i_{AC}^2(t) \rangle dT} = \frac{d(2P_R P_S)}{2P_R P_S dT} = \\ \frac{1}{P_S} \cdot \frac{dP_S}{dT} + \frac{1}{P_R} \cdot \frac{dP_R}{dT} = C_{PST} + C_{PRT} \\ C_{P\varepsilon} = \frac{d\langle i_{AC}^2(t) \rangle}{\langle i_{AC}^2(t) \rangle d\varepsilon} = \frac{d(2P_R P_S)}{2P_R P_S d\varepsilon} = \\ \frac{1}{P_S} \cdot \frac{dP_S}{d\varepsilon} + \frac{1}{P_R} \cdot \frac{dP_R}{d\varepsilon} = C_{PSe} + C_{PR\varepsilon} \end{cases} \quad (9)$$

式中: C_{PST} 和 C_{PSe} 分别为 Stokes 光相对功率变化的温度和应变系数; C_{PRT} 和 $C_{PR\varepsilon}$ 分别为瑞利散射光相对功率变化的温度和应变系数.由式(9)可知,自外差信号相对功率变化的温度/应变系数分别为 Stokes 光和瑞利散射光相对功率变化的温度/应变系数的叠加.由文献[18]可知,温度和应变变化对瑞利散射光功率的影响较小,故 C_{PRT} 和 $C_{PR\varepsilon}$ 均可近似为 0.因布里渊频移与入射光波长成反比且波长系数为 7 MHz/nm^[19],同时根据式(9)可知,对于谱宽远小于 1 nm 的宽带光源而言,波长依赖性对布里渊频移和自外差信号功率的温度和应变系数的影响可忽略不计.

对于标准单模光纤,根据文献[9]中布里渊频移和相对功率变化的温度和应变系数计算可知,1 °C 温度变化引起的 ν_B 变化可等效为 23 $\mu\varepsilon$ 应变变化引起的 ν_B 变化;1 °C 温度变化引起的 P_S 变化可等效为 450 $\mu\varepsilon$ 应变变化引起的一 P_S 变化.在本文实验中,为了降低实验难度,温度被用作传感参量,但相关实验结果也适用于应变传感.

2 实验及结果分析

为了省去额外的本地参考光,简化温度测量系统结构,减小相干瑞利噪声对系统性能的影响,设计了如图 1 所示的基于宽带光源和瑞利与布里渊自外差检测的 BOTDR 传感系统.系统采用线宽~55.23 MHz、中心波长 1 550.08 nm、输出功率 12.75 mW 的宽带 DFB-LD 光源,LD 输出光被由脉冲发生器(Pulse Generator, PG)驱动 EOM 调制成重复频率 10 kHz、脉冲宽度 130 ns 和峰值功率 450 mW 的光脉冲,再经掺铒光纤放大器(Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA)1 放大和光栅滤波器(Fiber Bragg Grating Filter, FBGF)1 滤除自发辐射(Amplified Spontaneous Emission, ASE)噪声后通过环形器(Circulator)和扰偏器(Polarization Scrambler, PS)进入传感光纤.光脉冲在光纤中传输时产生的背向瑞利散射光和布里渊散射光经 PS、EDFA 2 放大和 FBGF 2 滤除 ASE 噪声后进入带宽 11.9 GHz 的 PD 进行自外差检测.根据文献[20]可知,当入射光偏振态为随机偏振时,光纤 SBS 阈值得到提高,因此在系统中将 PS 放于环形器和传感光纤之间.同时,PS 可使瑞利和布里渊散射光偏振态均

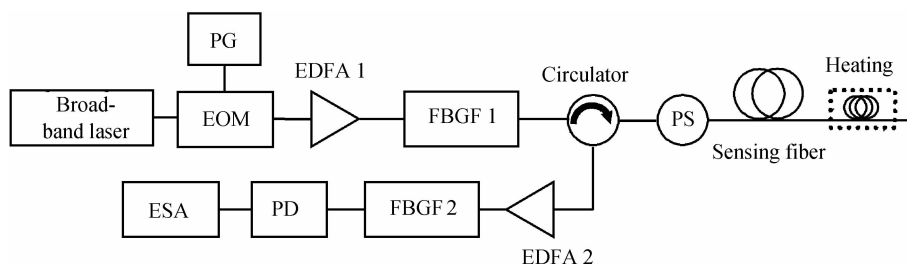


图1 基于宽带光源和自外差检测的BOTDR传感系统

Fig. 1 Experimental setup of the BOTDR sensing system based on broad-band laser and self-heterodyne detection

接近随机状态,从而减小偏振衰落噪声.

系统中传感光纤采用长度为 9.5 km 的标准单模光纤,末端 70 m 光纤放入准确度为 $\pm 0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的恒温水浴中加温,室温为 $28\text{ }^{\circ}\text{C}$.分辨率带宽 8 MHz 的频谱分析仪(Electrical Spectrum Analyzer, ESA)工作在“zero-span”模式,测量中心频率在布里渊频移 10.842 GHz附近的自外差信号功率的时域波形.设置 ESA 中心频率的调节步进为 8 MHz,在 10.746~10.938 GHz范围内对瑞利和布里渊自外差信号的时域波形进行扫频测量,每次测量平均 5000 次得到一条自外差 BOTDR 时域波形.为了验证采用宽带 DFB-LD 光源对系统中相干瑞利噪声的减小作用,实验中分别

采用线宽 1.86 MHz 的窄带光源和线宽 55.23 MHz 的宽带光源测量 PD 输出信号,并利用 Matlab 绘出了如图 2 所示的常温下自外差信号三维功率谱.通过图 2 中沿光纤分布的布里渊散射谱可知,采用宽带光源时可有效地减小相干瑞利噪声.

将恒温水浴中的 70 m 光纤加温至 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$,并对光纤各个位置处的布里渊谱测量数据进行洛伦兹拟合,可获得如图 3 所示的采用窄带光源和宽带光源时沿光纤分布的布里渊频移.光纤加温段与未加温段的平均布里渊频移分别为 10.871 GHz 和 10.848 GHz,二者的频移差为 23 MHz.由于窄带光源线宽较窄,系统中的相干瑞利噪声较大,此时沿光纤分布的布里渊频移波动和均方根误差(Root-Mean-Square Error, RMSE)较大,其值分别为 4.5 MHz 和 1.4 MHz;当采用宽带光源时,相干瑞利噪声得到了有效地降低,因此布里渊频移波动和 RMSE 减小至 2.4 MHz 和 0.8 MHz.

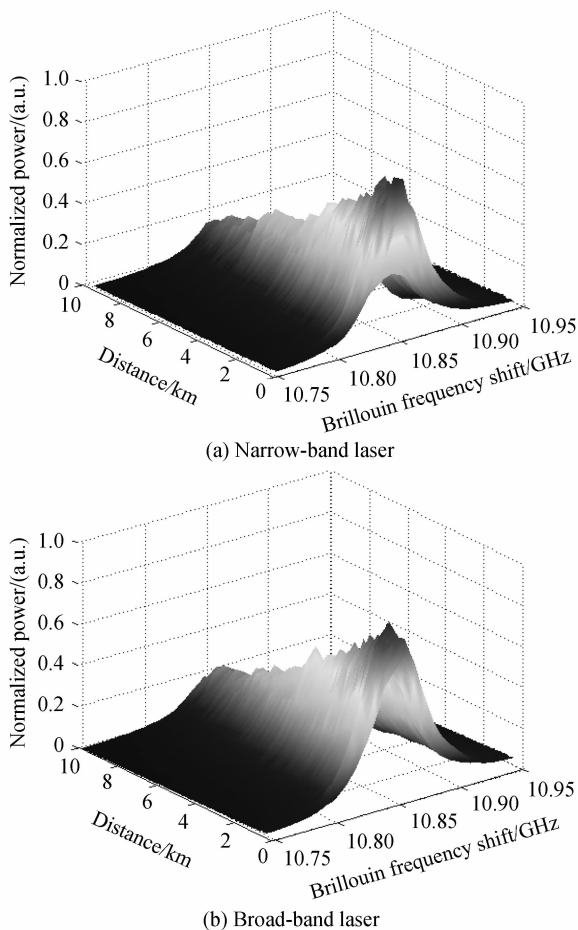


图2 三维自外差信号功率谱

Fig. 2 3D power spectra of self-heterodyne detection signals

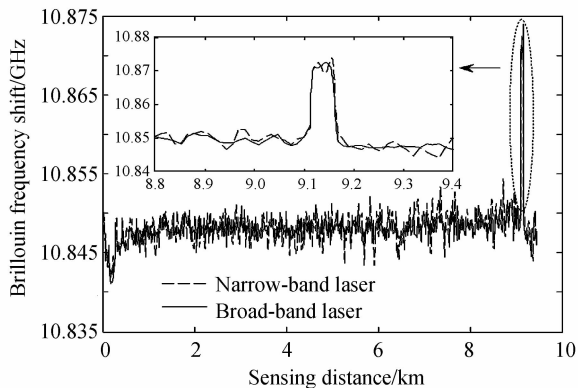


图3 采用两种光源时沿光纤分布的布里渊频移

Fig. 3 Distribution of Brillouin frequency shift along the fiber with two kinds of lasers

采用宽带 DFB-LD 光源时,将恒温水浴中的光纤分别加温至 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$,测量得到的自外差信号功率谱及相应的拟合曲线如图 4.由图可知,加温段光纤所受温度不同时,布里渊频移和谱峰功率均随温度的升高而增加,而功率谱宽随温度的升高而降低.为了实现基于自外差信号功率谱中心频率及谱积分功率变化的温度测量,需要对二者的温度系数进行标定.

为了更好地获得布里渊频移和自外差信号相对功率变化与温度的关系,将光纤末端 70 m 松弛光纤置于

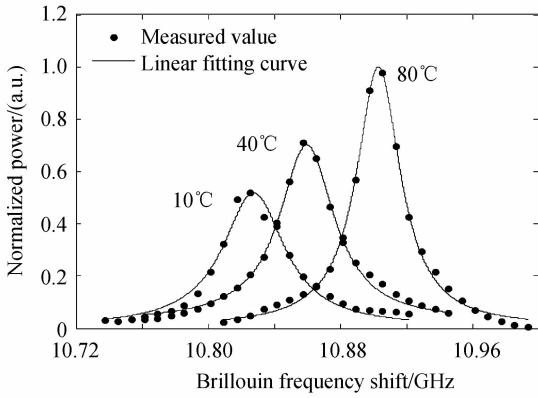


图4 自外差信号功率谱

Fig. 4 Power spectra of self-heterodyne detection signals 恒温水浴中进行一致的温度控制. 以 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为步进对 70 m 光纤进行加温, 温度变化范围为 $10\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, 对加温段光纤四次测量的实验数据分别进行洛伦兹拟合, 可得如图 5 所示的布里渊频移与温度的关系. 对四次测量数据的平均值进行线性拟合得到布里渊频移的温度系数 $C_{\text{VT}}=1.07\pm 0.01\text{ MHz}/^{\circ}\text{C}$, 根据文献[9]计算可得等效的布里渊频移的应变系数为 $0.046\text{ MHz}/\mu\epsilon$, 与已报道的数据具有良好的 consistency.

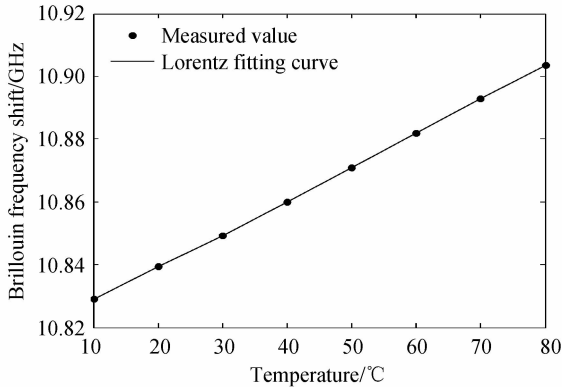


图5 布里渊频移与温度的关系

Fig. 5 Brillouin frequency shift versus temperature

对加温段光纤不同温度时的自外差信号功率谱进行洛伦兹拟合, 并通过拟合后的洛伦兹谱进行积分可得加温段光纤的自外差信号功率. 当加温段光纤加温至某一温度时, 为了消除 EOM 调制不稳定性的影响, 每次测量时将某一温度下非加温段光纤上相同位置处的 70 m 光纤的自外差信号功率作为参考, 对加温段光纤自外差信号功率进行归一化处理. 图 6 给出了自外差信号相对功率变化与温度的关系. 对四次实验测量数据的平均值进行线性拟合可得相对功率变化的温度系数为 $C_{\text{PT}}=(0.37\pm 0.09)\%/^{\circ}\text{C}$, 根据文献[9]计算可得等效的相对功率变化的应变系数为 $-(8.2\pm 2)\times 10^{-4}\%/ \mu\epsilon$, 与已报道的数据基本一致. 需要说明的是, 由于布里渊频移的温度系数和应变系数受光纤纤芯掺杂种类和浓度的影响^[21], 不同类型光纤的布里渊

频移的温度和应变系数可能存在微小的差异. 另外, 与文献[9]中的本地外差检测给出的实验结果相比测量误差偏大, 这是由于 CRN 是瑞利散射的固有噪声, 自外差信号受其影响较大. 根据图 5 和图 6 拟合得到的 C_{VT} 和 C_{PT} 及其对应的 C_{VE} 和 C_{PE} 可知, $C_{\text{VT}}C_{\text{PE}}/(C_{\text{VE}}C_{\text{PT}})=-0.052$, 则 $C_{\text{VT}}C_{\text{PE}}\neq C_{\text{VE}}C_{\text{PT}}$, 系数矩阵满足非奇异条件, 因此通过测量布里渊频移和自外差信号功率, 可实现基于瑞利和布里渊自外差检测 BOTDR 系统的温度和应变的同时测量.

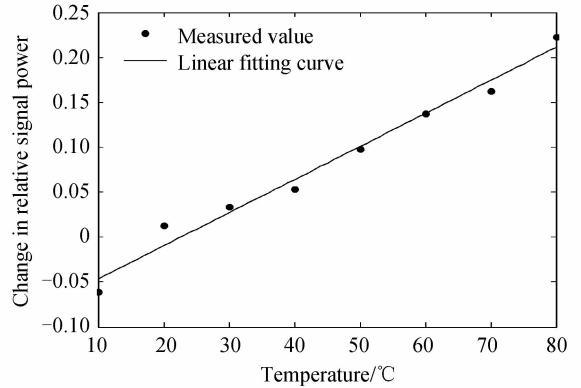


图6 自外差信号相对功率变化与温度的关系

Fig. 6 Change in relative self-heterodyne signal power versus temperature

3 结论

为了简化系统结构、减小相干瑞利噪声对系统性能的影响, 本文提出了一种采用宽带 DFB-LD 光源的瑞利和布里渊自外差检测 BOTDR 温度传感系统. 分析了瑞利和布里渊散射自外差检测的原理, 研究了布里渊频移和自外差信号功率与光纤温度和应变的线性变化关系. 搭建了采用宽带光源的瑞利和布里渊自外差检测 BOTDR 温度传感系统, 获得了常温下沿光纤分布的自外差信号功率谱及不同温度时加温段光纤的功率谱, 验证了布里渊频移和自外差信号相对功率变化与温度的线性增加关系. 通过实验数据获得的布里渊频移和相对功率变化的温度系数分别为 $1.07\pm 0.01\text{ MHz}/^{\circ}\text{C}$ 和 $(0.37\pm 0.09)\%/^{\circ}\text{C}$, 为基于瑞利和布里渊自外差检测 BOTDR 传感系统的温度和应变同时测量提供了理论和实验依据.

参考文献

- [1] FARAH I F, PANNELL C N, JACKSON D A. Potential of stimulated Brillouin scattering as sensing mechanism for distributed temperature sensors[J]. *Electronics Letters*, 1989, 25(14): 913-914.
- [2] HORIGUCHI T, TATEDA M. BOTDA-nondestructive measurement of single-mode optical fiber attenuation characteristics using Brillouin interaction: theory[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1989, 7(8): 1170-1176.
- [3] 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.
- [4] YANG Lin, SHI Zun-wei, HUANG Ji-chao, *et al.* Field test research on temperature detection of overhead transmission line based on BOTDR distributed fiber sensing technology[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, **41**(3): 329-333.
阳林, 史尊伟, 黄吉超, 等. 基于 BOTDR 分布式光纤传感技术的架空线路温度检测现场试验研究[J]. 高电压技术, 2015, **41**(3): 329-333.
- [5] FENG X, WU W J, LI X Y, *et al.* Experimental investigations on detecting lateral buckling for subsea pipelines with distributed fiber optic sensors[J]. *Smart Structures and Systems*, 2015, **15**(2): 245-258.
- [6] PARKER T R, FARHADIROUSHAN M, HANDEREK V A, *et al.* A fully distributed simultaneous strain and temperature sensor using spontaneous Brillouin backscatter [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1997, **9**(7): 979-981.
- [7] KEE H H, LEES G P, NEWSON T P. An all-fiber system for simultaneous interrogation of distributed strain and temperature sensing using spontaneous Brillouin scattering[J]. *Optics Letters*, 2000, **25**(10): 695-697.
- [8] KIM S, KWON H, YANG I, *et al.* Performance of a distributed simultaneous strain and temperature sensor based on a Fabry-Perot laser diode and a dual-stage FBG optical demultiplexer[J]. *Sensors*, 2013, **13**(11): 15452-15464.
- [9] 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.
- [10] CHANG T Y, KOSCICA T E, LI D Y, *et al.* A novel detection method of Brillouin backscattered light in optical fiber[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2009, **9**(4): 430-434.
- [11] DE SOUZA K. Significance of coherent Rayleigh noise in fiber-optic distributed temperature sensing based on spontaneous Brillouin scattering [J]. *Measurement Science and Technology*, 2006, **17**(5): 1065-1069.
- [12] MANDEL L, WOLF E. Optical coherence and quantum optics[M]. England: Cambridge University Press, 1995, 900-972.
- [13] AGRAWAL G P. Nonlinear fiber optics[M]. 3rd, New York: Academic Press, 2001, 355-388.
- [14] AOYAMA K, NAKAGAWA K, ITOH T. Optical time domain reflectometry in a single-mode fiber [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1981, **QE-17**(6): 862-868.
- [15] TSUNEO H, KAORU S, TOSHIO K, *et al.* Development of a distributed sensing technique using Brillouin scattering [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1995, **13**(7): 1296-1302.
- [16] SAKAGUCHI S, TODOROKI S, SHIBATA S. Rayleigh scattering in silica glasses [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1996, **79**(11): 2821-2824.
- [17] RICH T C, PINNOW D A. Evaluation of fiber optical waveguides using Brillouin spectroscopy[J]. *American Ceramic Society Bulletin*, 1973, **52**(9): 702.
- [18] DE SOUZA K, WAIT P C, NEWSON T P. Double-pass configured fibre Mach-Zehnder interferometric optical filter for distributed fibre sensing[J]. *Electronics Letters*, 1997, **33**(25): 2148-2149.
- [19] LI C L, LU Y G, ZHANG X P. SNR enhancement in Brillouin optical time domain reflectometer using multi-wavelength coherent detection[J]. *Electronics Letters*, 2012, **48**(18): 1139-1141.
- [20] VAN DEVENTER M O, BOOT A J. Polarization properties of stimulated Brillouin scattering in single-mode fibers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1994, **12**(4): 585-590.
- [21] NIKLES M, THEVENAZ L, ROBERT P A. Brillouin gain spectrum characterization in single-mode optical fibers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, **15**(10): 1842-1851.