

一种利用布里渊增益谱边带解调提高布里渊光时域反射系统测温精度的方法

刘瑞霞 张明江 张建忠 刘毅 靳宝全 白清 李哲哲

Temperature measurement accuracy enhancement in the Brillouin optical time domain reflectometry system using the sideband of Brillouin gain spectrum demodulation

Liu Rui-Xia Zhang Ming-Jiang Zhang Jian-Zhong Liu Yi Jin Bao-Quan Bai Qing Li Zhe-Zhe

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 65, 244203 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.244203

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.244203>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I24>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

非球形椭球粒子参数变化对光偏振特性的影响

[Research of the influence of non-spherical ellipsoid particle parameter variation on polarization characteristic of light](#)

物理学报.2016, 65(6): 064205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.064205>

多次散射因素影响下天空偏振光模式的解析模型

[An analytical model for skylight polarization pattern with multiple scattering](#)

物理学报.2014, 63(11): 114201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.114201>

实际加工表面红外激光散射特性的实验研究

[Infrared laser scattering characteristics of machining surfaces](#)

物理学报.2013, 62(24): 244201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.244201>

基于格林函数法研究金属线栅在太赫兹波段的散射特性

[Study on scattering properties of the metal wire gating in a THz band based on 'Green function method'](#)

物理学报.2013, 62(19): 194207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.194207>

沙丘粗糙面的二次极化电磁散射

[Secondary electromagnetic polarimetric scattering from dune surface](#)

物理学报.2013, 62(14): 144213 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.144213>

一种利用布里渊增益谱边带解调提高布里渊光时域反射系统测温精度的方法*

刘瑞霞¹⁾²⁾ 张明江^{1)2)3)†} 张建忠¹⁾²⁾ 刘毅¹⁾²⁾³⁾ 靳宝全¹⁾²⁾³⁾
白清¹⁾²⁾ 李哲哲¹⁾²⁾

1) (新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 太原 030024)

2) (太原理工大学物理与光电工程学院, 光电工程研究所, 太原 030024)

3) (煤与煤层气共采国家重点实验室, 晋城 048000)

(2016年5月4日收到; 2016年7月20日收到修改稿)

测温精度是衡量分布式光纤温度传感系统的一项重要性能指标. 本文提出一种通过解调布里渊增益谱边带, 以提高布里渊光时域反射仪测温精度的方法. 在此基础上, 进一步分析并验证了探测光脉冲峰值功率对测温精度的影响. 理论分析表明, 利用声光调制器的频移特性可产生布里渊增益谱边带, 相比于中心峰解调方法, 采用布里渊增益谱边带解调法可获得更高的系统信噪比, 进而提高系统测温精度. 实验结果表明, 在相同测量条件下, 布里渊增益谱左边带峰值功率较其中心峰峰值功率高 3.27 dB, 且其 -1 dB 谱宽比中心峰窄 14.5 MHz. 对布里渊增益谱左边带进行频率扫描, 由于相干探测时参考光的作用以及消除了相干瑞利噪声的影响, 系统信噪比提高了 4.35 dB, 并在 10.2 km 的传感距离上实现了 ± 0.5 °C 的测温精度.

关键词: 布里渊光时域反射, 布里渊增益谱边带, 峰值功率, 测温精度

PACS: 42.68.Mj, 42.81.Pa, 42.81.Dp, 42.79.-e

DOI: 10.7498/aps.65.244203

1 引言

分布式光纤传感技术只采用单根光纤作为传感和信号传输元件^[1], 即可实现整条光纤上空间和时间的分布式连续性测量^[2], 克服了点式传感器难以对被测物体进行全方位连续监测的缺陷, 且具有损耗低、耐腐蚀、抗电磁场干扰、易于工程铺设等优越性能, 从而成为目前安防、电力、航空航天、建筑、交通、通信等领域理想的大型设施无损监测技术^[3,4]. 基于布里渊光时域反射 (Brillouin optical time domain reflectometry, BOTDR) 的分布式传感技术可实现温度和应变同时测量, 同时具有装置简单、单端接入^[5]、可检测断点、可长距离测量等优

点^[6], 因而成为研究的热点且被广泛应用于大型设施的结构健康监测中.

温度或应变的测量精度是衡量 BOTDR 系统性能的一个重要指标^[4,6-9]. 为了提高系统测量精度: 2009年, Xia等^[7]采用基于边沿探测技术的 BOTDR 系统, 在 2 km 的传感距离上实现了 0.5 °C 的测温精度, 在 4 km 处获得了 110 $\mu\epsilon$ 的应变测量精度; 2010年, Hu等^[8]通过改善偏振态、引入窄带光栅、累加平均等方法, 提高了系统信噪比, 在 20 km 传感光纤上获得 2 °C 的测温精度; 2012年, Wang等^[9]在参考路引入马赫-曾德尔干涉消除偏振噪声, 在 24 km 的传感光纤上实现了测温误差为 0.5 °C 的分布式温度测量; 次年采用 BOTDR 与偏振光时域反射 (polarization optical time-domain

* 国家自然科学基金 (批准号: 61377089, 61527819)、山西省煤基重点科技攻关项目 (批准号: MQ2014-09) 和山西省煤层气联合研究基金 (批准号: 2015012005) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhangmingjiang@tyut.edu.cn

reflectometry)相结合的技术,获得了4 km的传感距离和0.2 MHz的布里渊频移不确定度^[10];2014年,Hao等^[11]采用基于编码脉冲进行数字相干探测技术,布里渊频移波动减小14.01 MHz;2016年,Song等^[12]在BOTDR系统中引入单向抽运拉曼放大技术,在100 km的传感光纤上获得了 ± 3 °C的测温精度.传统BOTDR系统中光源发出的连续光由电光调制器(electro-optical modulator, EOM)或声光调制器(acoustic optical modulator, AOM)调制成脉冲光注入待测光纤,通过解调以中心频率为布里渊频移的布里渊增益谱实现温度或应变的测量^[8,9,13-15],该增益谱呈洛伦兹型.EOM偏压点难以长时间稳定,因此基于EOM调制探测光脉冲的BOTDR系统易引起连续光泄漏,降低光脉冲的消光比^[14,16].若引入EOM反馈控制系统,则结构复杂,成本昂贵^[17].基于AOM调制光脉冲的BOTDR系统因AOM消光比高、可长时间稳定运行等优点,越来越受到研究者的重视^[13,15,18-20].然而,AOM的频移特性使得光纤后向散射光成分复杂,影响测量精度.2013年,Kwon等^[20]通过滤除后向散射光中的瑞利光和布里渊斯托克斯散射光,对布里渊反斯托克斯散射光进行解调,用以消除AOM频移的影响,实现了36 km的分布式温度测量.但其主要侧重于温度的解调算法的实现,并未对后向散射光与参考光的拍频谱进行深入研究.

本文研究了AOM频移特性对BOTDR系统中后向散射光与参考光拍频谱的影响,发现AOM频移特性使得布里渊增益谱产生了左、右两个边带,且左、右边带的峰值功率高于布里渊增益谱中心峰,频谱宽度比中心峰窄.基于该现象,我们提出了一种基于布里渊增益谱边带解调的方法,提高了系统测温精度,并在此基础上研究了探测光脉冲峰值功率对测温精度的影响.

2 实验装置及原理

2.1 实验装置

基于布里渊增益谱边带解调的BOTDR分布式温度传感实验装置如图1所示.采用微波外差扫频的方法对布里渊增益谱边带进行扫描从而实现布里渊频移的解调.实验中采用分布式反馈

半导体激光器(distributed feedback laser diodes, DFB-LD, 康冠光电)作为光源.激光器发出的光经90:10的耦合器分成探测光和参考光两路,其中90%一路作为探测光,经AOM(Gooch & Housego)调制成光脉冲,其脉冲宽度为50 ns,重复频率为8 kHz.探测光脉冲经脉冲掺铒光纤放大器1(erbium doped fiber amplifier 1, EDFA1, 中讯)放大并经滤波器(Filter1)滤除放大自发辐射(amplified spontaneous emission, ASE)噪声后,经过99:1的耦合器分成两路,1%一路经可调光衰减器(variable optical attenuator, VOA)降低功率后进入线性光电探测器(photodetector, PD2, Thorlabs)转化为电脉冲,用示波器测量其脉冲幅值,以监测入纤的峰值功率;99%一路通过光环形器(optical circulator, OC)进入传感光纤(G.652D),光纤尾端绕制的两个小环用于抑制光纤末端面较强的菲涅耳反射.光在光纤中传输时的后向散射光携带有光纤沿线的温度信息,其后向散射光经掺铒光纤放大器(EDFA2, Connet)放大并经Filter2滤除ASE噪声后,与激光器分出的10%一路的参考光经50:50耦合器进行拍频,所得拍频信号经光电探测器(PD1, 康冠光电)转化为电信号,并由高频带通滤波器(band pass filter, BPF, 带宽8—12 GHz)滤除信号的低频分量,后经低噪放大器(low noise amplifier, LNA)放大后与微波本地振荡器(local oscillator, LO, 康冠光电)输出的微波信号经混频器(Mixer)进行混频,降低所采集信号的频率.通过调节LO的输出频率完成对布里渊增益谱的扫描,其中当LO输出频率与布里渊频移相等时,其信号幅度达到最大.

参考路中的扰偏器(polarization scrambler, PS, General Photonics, PCD-003)用于消除偏振态对拍频光的影响.脉冲信号发生器(Agilent, 80050 A)一方面为AOM提供驱动脉冲信号,另一方面作为频谱分析仪(electrical signal analyzer, ESA, Agilent, N9010A)的触发信号,用于采集参考光与光纤后向散射光的拍频信号的时序.实验中频谱分析仪不仅作为中心频率200 MHz,带宽3 MHz的窄带滤波器(narrow band pass filter, NBPF)使用,还利用了其检波特性和零跨度(zero span)模式采集信号的时序,如图1红色虚线框中所示.

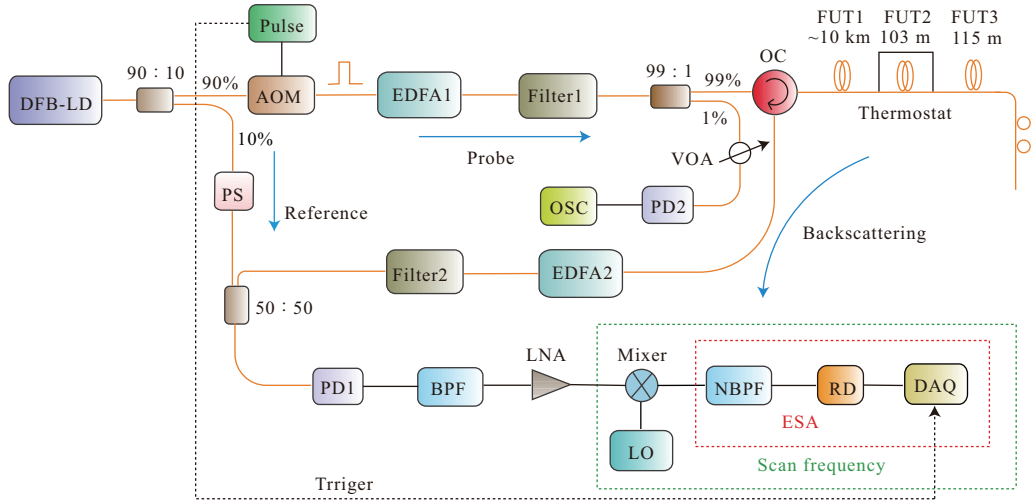


图1 (网刊彩色) 基于布里渊增益谱边带解调的BOTDR分布式温度传感实验装置图

Fig. 1. (color online) Experimental setup of distributed temperature sensor of BOTDR system based on demodulation for sideband of Brillouin gain spectrum.

2.2 布里渊增益谱边带产生及布里渊频移解调原理

实验中采用后向散射光与参考光相干探测的方法实现对布里渊散射光的探测. 如图2所示, 蓝色虚线表示若AOM对其注入光不产生频移, 光纤后向散射分布情况; 红色曲线表示AOM的频移特性导致光纤后向散射光的频率分布情况. 即AOM的上频移特性使得后向散射光中瑞利散射光的频率为 $\nu_0 + \nu_{FS}$, 布里渊散射光的频率为 $\nu_0 \pm \nu_B + \nu_{FS}$, 其中 ν_0 为激光器输出光频率, ν_B 为布里渊频移 (Brillouin frequency shift, BFS), ν_{FS} 为AOM产生的频移.

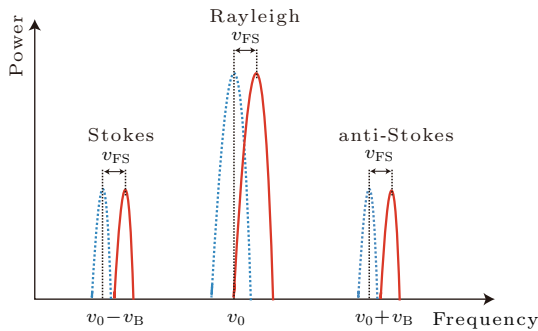


图2 (网刊彩色) 后向散射光中各光频成分图解

Fig. 2. (color online) Schematic mechanism of frequency in the backscatter light.

假设光电探测器接收到参考光和后向散射光偏振态相同, 分别表示为^[21]

$$\widetilde{E}_L(t) = E_L(t) \cos(2\pi\nu_0 t + \varphi_1),$$

$$\begin{aligned} \widetilde{E}_S(t) = & E_B(t) \cos[2\pi(\nu_0 \pm \nu_B + \nu_{FS})t + \varphi_2] \\ & + E_R(t) \cos[2\pi(\nu_0 + \nu_{FS})t + \varphi_3], \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $E_L(t)$, $E_B(t)$, $E_R(t)$ 和 φ_1 , φ_2 , φ_3 分别为参考光、后向散射光的布里渊散射光、瑞利散射光的电场幅度和相位; $\nu_0 \pm \nu_B + \nu_{FS}$ 分别为布里渊散射光中反斯托克斯光和斯托克斯光的频率, $\nu_0 + \nu_{FS}$ 为瑞利散射光的频率.

理想情况下, 光电探测器响应时间为0, 其输出光电流为

$$\begin{aligned} i = & \rho K \{ E_L(t) \cos(2\pi\nu_0 t + \varphi_1) \\ & + E_B(t) \cos[2\pi(\nu_0 + \nu_{FS} \pm \nu_B)t + \varphi_2] \\ & + E_R(t) \cos[2\pi(\nu_0 + \nu_{FS})t + \varphi_3] \}^2 \\ = & \rho K \left(\frac{1}{2} E_L^2(t) [1 + \cos(4\pi\nu_0 t + 2\varphi_1)] \right. \\ & + \frac{1}{2} E_B^2(t) \{ 1 + \cos[4\pi(\nu_0 + \nu_{FS} \pm \nu_B)t \\ & + 2\varphi_2] \} \\ & + \frac{1}{2} E_R^2(t) \{ 1 + \cos[4\pi(\nu_0 + \nu_{FS})t + 2\varphi_3] \} \\ & + E_L(t) E_B(t) \{ \cos[2\pi(2\nu_0 + \nu_{FS} \pm \nu_B)t \\ & + (\varphi_1 + \varphi_2)] \\ & + \cos[2\pi(\nu_B \mp \nu_{FS})t + (\varphi_1 - \varphi_2)] \} \\ & + E_L(t) E_R(t) \{ \cos[2\pi(2\nu_0 + \nu_{FS})t \\ & + (\varphi_1 + \varphi_3)] \\ & + \cos[2\pi\nu_{FS}t + (\varphi_1 - \varphi_3)] \} \\ & \left. + E_B(t) E_R(t) \{ \cos[2\pi(2\nu_0 - 2\nu_{FS} \mp \nu_B)t \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + (\varphi_2 - \varphi_3)] \\
 & + \cos[2\pi\nu_B t + (\varphi_2 + \varphi_3)] \Big), \quad (2)
 \end{aligned}$$

式中, ρ 为光电探测器响应度, 单位为 A/W; K 为比例常数, 单位为 W/(V/m)². 考虑所用光电探测器为交流耦合型且带宽为 12 GHz, (2) 式右端前三项表示的直流分量和高频分量不能在探测器上响应, 此时探测器响应的中低频交流分量为

$$\begin{aligned}
 i_S = \rho K \{ & E_L(t)E_B(t) \cos[2\pi(\nu_B \mp \nu_{FS})t \\
 & + (\varphi_1 - \varphi_2)] \\
 & + E_B(t)E_R(t) \cos[2\pi\nu_B t + (\varphi_2 + \varphi_3)] \\
 & + E_L(t)E_R(t) \cos[2\pi\nu_{FS}t + (\varphi_1 - \varphi_3)] \}. \quad (3)
 \end{aligned}$$

故光电探测器射频端输出信号经带宽为 8—12 GHz 的高频带通滤波器滤波后, 输出信号的光电压为

$$\begin{aligned}
 u_S = C \{ & E_L(t)E_B(t) \cos[2\pi(\nu_B \mp \nu_{FS})t \\
 & + (\varphi_1 - \varphi_2)] \\
 & + E_B(t)E_R(t) \cos[2\pi\nu_B t + (\varphi_2 + \varphi_3)] \}, \quad (4)
 \end{aligned}$$

式中, $C = \rho KR$ 为探测器转换增益, 单位为 V/W, 其中 R 为探测器跨阻增益, 单位为 V/A. 从 (4) 式可以看出, 探测器输出端的中频信号含有 3 种频率分量, 即布里渊频移 ν_B , AOM 频移引起的频率分量即布里渊增益谱边带峰值对应的频率 $\nu_B \mp \nu_{FS}$. 在相同噪声条件下, 参考光电场幅度 $E_L(t)$ 远大于瑞利散射光的电场幅度 $E_R(t)$, 因此, 布里渊增益谱边带的强度远大于布里渊增益谱中心峰值的强度, 该中心峰值对应频率即为布里渊频移 ν_B .

另一方面, BOTDR 系统中, 测温精度 δT 正比于频率精度 $\delta\nu$: $\delta T/T = \delta\nu/C_T$, 且频率精度与布里渊散射的信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) 相关^[18], 即

$$\frac{\delta\nu}{\Delta\nu} \propto \frac{1}{\sqrt{2}(SNR)^{1/4}}, \quad (5)$$

其中 $C_T \approx 1.18 \text{ MHz}/^\circ\text{C}$, $\Delta\nu$ 为布里渊增益谱宽. 从 (5) 式可知布里渊散射信噪比越高, 频率精度越高, 从而系统测温精度也越高. 因此, 对布里渊增益谱边带进行频率扫描解调的测温精度要高于对其中心峰进行扫描解调.

频率扫描部分的装置如图 1 绿色虚线框中所示, 由混频器、微波源、窄带滤波器、检波器 (radio detector, RD) 和数据采集装置 (data acquisition, DAQ) 构成, 其中窄带滤波器、检波器以及数据采集由频谱仪完成.

布里渊频移解调的具体实现原理如图 3 所示. 待测射频信号通过混频器与微波源输出本振信号混频, 将射频信号搬移到中频带. 当以固定步进不断改变微波源的输出频率时, 待测信号中心频率会逐渐接近窄带滤波器中心频率, 并最终使窄带滤波器扫过整个待测频谱, 最终依次扫描出相应频率点的功率, 从而完成整个高频信号的频谱测量. 当微波源输出频率为布里渊频移与窄带滤波器中心频率之和 (或差) 时, 布里渊增益谱达到峰值, 此时微波源输出频率减去 (或加上) 滤波器中心频率即为布里渊频移. 检波器起功率检波的作用, 将幅值信号转换为功率信号, 检波器输出电压与幅值信号的功率成正比. 经过检波作用, 输出信号为 DC 信号, 消除了布里渊散射随机相位的影响, 大大降低了对采集设备的要求.

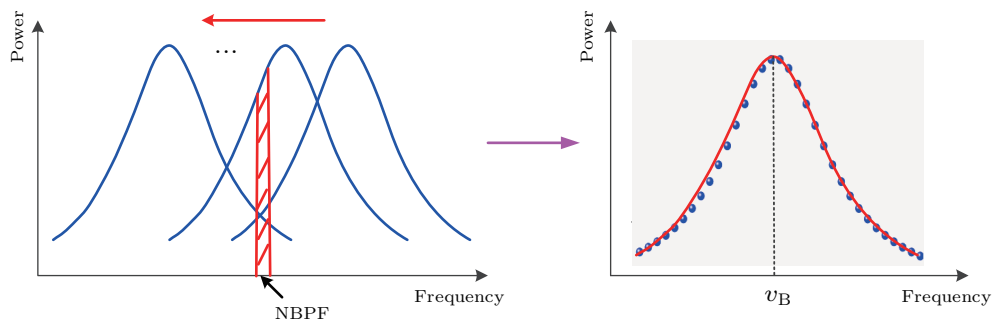


图 3 (网刊彩色) 基于微波外差扫频的布里渊频移解调原理示意图

Fig. 3. (color online) Sketch map of the demodulation principle of BFS based on microwave heterodyne technique.

3 实验结果与分析

3.1 激光器线宽的测量

由延时自外差法 (delayed self-heterodyne interferometer, DSHI) 测得激光器的线宽, 结果如图 4 所示. 由于延时自外差法测得的拍频信号功率谱的半高全宽为激光器线宽的两倍 [22], 故所采用 DFB 窄线宽激光器的 -3 dB 线宽为 95 kHz.

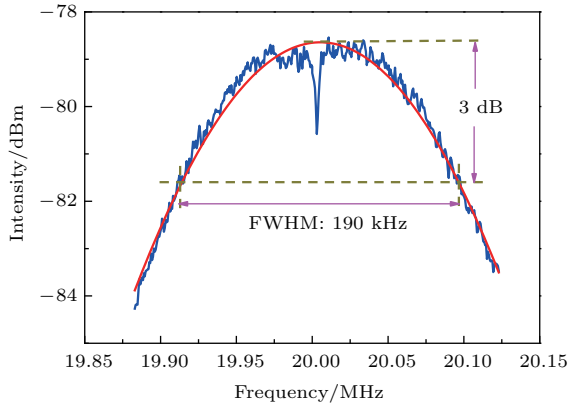


图 4 (网刊彩色) 激光器线宽的测量结果

Fig. 4. (color online) Measurement of laser linewidth.

3.2 基于布里渊增益谱边带对布里渊频移的解调结果与分析

为验证上述理论分析, 观测参考光与经过放大滤波后的后向散射光的拍频谱 (图 5(a)), 结果显示拍频谱出现 3 个峰, 且中心峰距离左、右边带均为 200 MHz 左右. AOM 厂商提供的技术指标指出, AOM 对注入光会产生 200 MHz 的上移频 (ν_{FS}). 为证实该现象, 实验中把经 AOM 调制后的脉冲光与参考光进行拍频得到图 5(b) 蓝色曲线所示的拍频谱, 图 5(b) 中黑色曲线为所用频谱仪的噪声基底, 红色曲线为 AOM 调制后脉冲光的频谱, 且脉冲光频谱与噪声基底几乎重合. 结果表明 AOM 确实对其注入光产生了 200 MHz 的频移, 且调制后的脉冲光频率为 $\nu_0 + \nu_{FS}$. 图 5(a) 所示拍频谱的中心峰对应 (4) 式中右式的第二项, 表示后向散射光中的瑞利散射光 (频率为 $\nu_0 + \nu_{FS}$) 与布里渊散射光 (频率为 $\nu_0 \pm \nu_B + \nu_{FS}$) 的拍频谱, 其峰值对应的频率即为布里渊频移 ν_B ; 左、右边带对应 (4) 式中右式的第一项, 表示布里渊散射光的斯托克斯光 (频率为 $\nu_0 - \nu_B + \nu_{FS}$)、反斯托克斯光 (频率为 $\nu_0 + \nu_B + \nu_{FS}$)

分别与参考光 (频率为 ν_0) 拍频形成的拍频谱, 其峰值对应的频率分别为 $\nu_B \pm 200$ MHz 左右. 图 5(a) 显示, 布里渊增益谱左边带峰值功率比中心峰值高约 3.27 dB, 且强度略高于右边带峰值功率; 其 -1 dB 谱宽比中心峰窄 14.5 MHz. 故选择布里渊增益谱左边带进行频率扫描解调出来的频率误差要小于对中心峰进行扫描的结果.

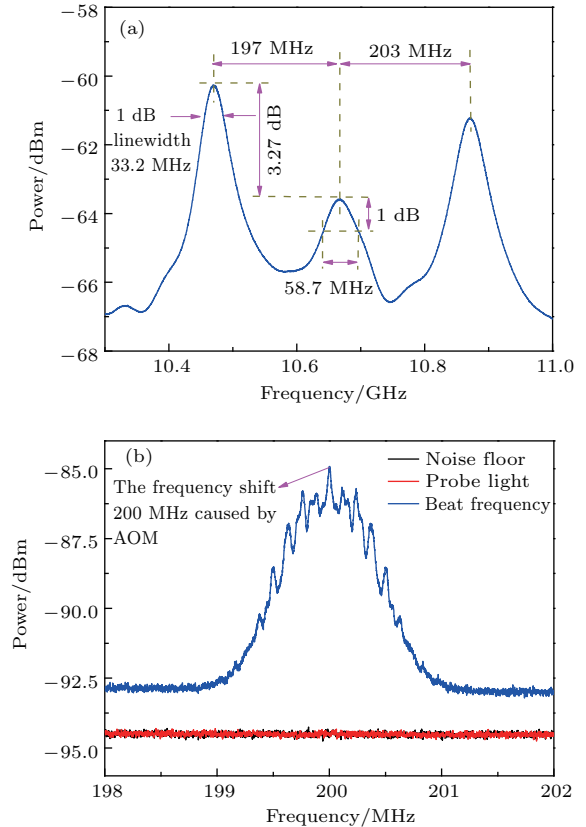


图 5 (网刊彩色) 拍频谱 (a) 后向散射光与参考光的拍频谱; (b) AOM 200 MHz 频移的拍频谱

Fig. 5. (color online) Beat frequency signals: (a) The beat of the reference light and the backscattering light; (b) the beat of frequency shift 200 MHz caused by AOM.

为证明对布里渊增益谱左边带进行频率扫描所解调出的频率精度优于对其中心峰扫描, 把恒温箱 (BH8104-D) 温度稳定在 25 °C 和 55 °C, 分别对图 5(a) 中的布里渊增益谱中心峰和左边带进行扫描, 步进均为 3 MHz, 每个频率点对应的时序平均 2^{12} 次后用频谱仪采集, 并用 LabVIEW 编程进行数据处理. 对同一光纤传感位置点的信号进行洛伦兹拟合并提取其信号最大值点所对应的频率, 即为该位置处的布里渊频移. 为消除光纤本身应变所产生的频移, 以恒温箱 25 °C 时光纤沿线的布里渊频移为基准得到布里渊频移差的沿线分布情况, 如

图6所示, 黑线和红线分别代表对布里渊增益中心峰和左边带进行扫描. 结果显示, 前端置于空气中的约10 km 光纤, 对布里渊增益谱中心峰扫描时布里渊频移差波动幅度远高于对左边带扫描的结果; 对置于恒温箱中的103 m 光纤, 对左边带进行频率扫描时解调出来的频率差为35.34 MHz, 频率精度为1.61 MHz; 但对布里渊增益谱中心峰扫描时所解调出来的频移差为负值, 表明对其进行扫描已无法正确解调待测光纤的布里渊频移. 因此可得, 窄线宽激光器作为光源时, 对布里渊增益谱的左边带扫描解调出温度的精度优于对其中心峰扫描的结果.

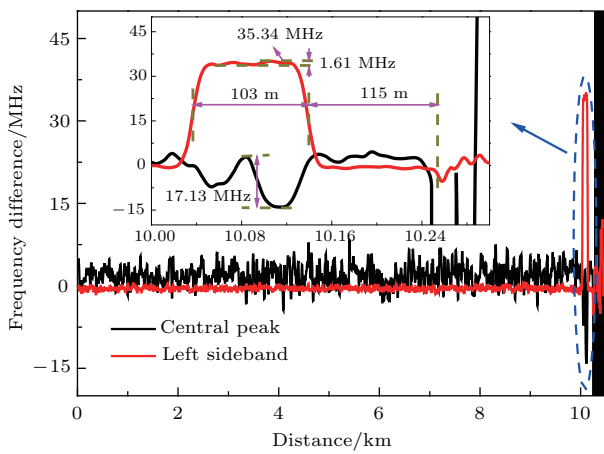


图6 (网刊彩色) 对布里渊增益谱中心峰和左边带分别扫描解调出的布里渊频移差沿线分布情况
 Fig. 6. (color online) Demodulated BFS differences of frequency scanning the central peak and the left sideband of Brillouin gain spectrum, respectively, along the optical fiber.

图7所示分别为对布里渊增益谱中心峰((a1), (a2), (a3))和左边带((b1), (b2), (b3))扫频时, 光纤1, 5, 10 km处实际测得的布里渊增益谱(蓝点所示)和进行洛伦兹拟合后的布里渊增益谱(红线所示). 结果显示, 对布里渊增益谱中心峰扫描时, 光纤5 km后布里渊增益谱的洛伦兹拟合已失真, 导致图6中所示的对布里渊增益谱中心峰扫描时, 无法正确解调待测光纤的布里渊频移. 而对布里渊增益谱左边带进行扫描, 所得的光纤各单元的实时布里渊增益谱, 随着光纤长度的增加出现一定展宽, 但仍服从洛伦兹分布. 随着光纤传感距离的增加, 布里渊增益谱展宽, 其原因是: 当脉冲光在光纤中传输时, 随着光纤长度的增加, 其信号强度逐渐衰减进而造成布里渊散射信号的信噪比逐渐降低, 谱宽增加.

由(5)式可得, 在自发布里渊散射范围内, 后向散射光功率越强, 对应布里渊散射信噪比越高, 则其解调出的频率精度越高. 与其他频率点下拍频信号对应的强度相比, 布里渊增益谱各峰值对应频率下的拍频信号强度是最强的, 故比较该频率下的拍频信号的强度可以进一步说明对两峰扫描时解调出的频率精度. 图8所示分别为布里渊增益谱中心峰(黑线)、左边带(红线)对应峰值频率下的拍频信号强度沿光纤长度的变化情况. 结果显示, 随着光纤长度的增加其拍频信号强度均逐渐减小, 且在光纤末端左边带对应拍频信号功率比中心峰值对应的值强4.35 dB左右, 即前者的信噪比要比后者的信噪比约高4.35 dB. 图8显示, 光纤同一位置处, 布里渊增益谱中心峰对应频率下的拍频信号的波动较大, 其原因是: 布里渊增益谱中心峰是由后向散射光中瑞利散射光与布里渊散射光拍频形成. 实验中采用光源为线宽95 kHz的窄线宽激光器, 其相干长度远大于光纤瑞利散射单元, 造成光纤中不同位置的各瑞利散射单元产生的散射光进行相干叠加, 且散射光在振幅和相位上随机分布, 从而光纤中不同位置处的瑞利散射信号相干叠加在一起的散射光功率随机起伏, 形成相干瑞利噪声^[23-25], 导致BOTDR系统拍频信号功率随机波动较大, 系统信噪比降低^[24], 从而造成图7中所示的相同位置处的中心峰解调出的布里渊增益谱比左边带解调的要宽许多.

通过比较光纤同一位置处, 对布里渊增益谱中心峰和左边带分别解调时的布里渊增益谱谱宽, 以及两者峰值对应频率下的拍频信号强度随光纤长度的变化关系, 进一步表明了对布里渊增益谱左边带进行扫描时后向散射光功率、系统信噪比均高于对其中心峰进行扫描的结果, 因此解调出的频率精度较高.

为证明对布里渊增益谱左边带进行扫频可以准确解调光纤沿线的温度信息, 我们标定了布里渊频移随温度变化的关系, 如图9所示. 把恒温箱温度在15—65 °C范围内调节, 每10 °C一个间隔, 对左边带进行频率扫描, 采集和数据处理与上述相同. 为消除光纤本身存在应变对布里渊频移的影响, 以恒温箱25 °C时沿线光纤的布里渊频移为基准, 再进行频率修正得到了如图9(a)所示的不同温度下恒温箱中约103 m光纤的布里渊频移沿线分布情况. 图9(a)中显示对布里渊增益谱左边带进

行扫描, 布里渊频移的频率波动最大为 1.19 MHz, 即布里渊频移解调精度为 ± 0.595 MHz. 需要说明的是, 为了消除光纤本身存在应变对布里渊频移的影响, 图 9(a) 中各温度下的布里渊频移均是以温度为 25 °C 时光纤的布里渊频移为基准进行修正得到的. 其中橙色曲线显示, 恒温箱外光纤的布里渊频移波动较大, 是因为该频移曲线包含光纤本身应变产生的布里渊频移的信息, 为其他温度进行频率

校正的基准. 恒温箱中的光纤在各温度下解调出的布里渊频移进行平均, 得到图 9(b) 所示的光纤布里渊频移与所处温度的关系. 结果显示, 线宽为 95 kHz 的激光器作为光源时, 得到所用传感光纤的布里渊频移与温度的系数关系 1.18 MHz/°C, 且线性拟合度达到 0.9955. 因此, 对左边带进行扫描时的测温精度约为 ± 0.5 °C.

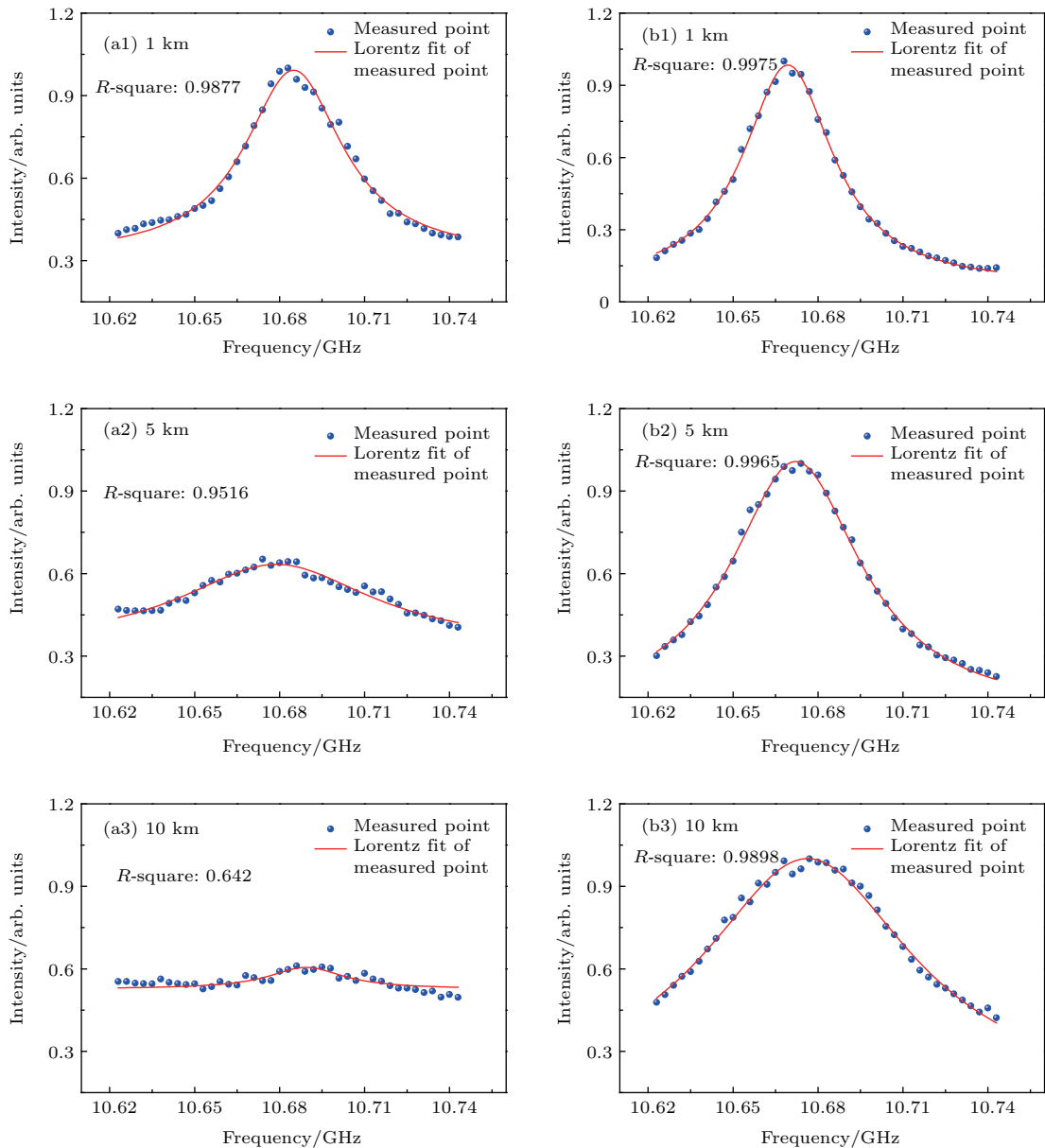


图 7 (网刊彩色) 不同位置处的实测布里渊增益谱与经洛伦兹拟合后的布里渊增益谱 (a1) 对中心峰扫描, 1 km; (a2) 对中心峰扫描, 5 km; (a3) 对中心峰扫描, 10 km; (b1) 对左边带扫描, 1 km; (b2) 对左边带扫描, 5 km; (b3) 对左边带扫描, 10 km
 Fig. 7. (color online) Measured Brillouin gain spectrum and Brillouin gain spectrum fitted to Lorentz in different lengths (a1) 1 km, (a2) 5 km, (a3) 10 km in scanning the central peak of Brillouin gain spectrum and (b1) 1 km, (b2) 5 km, (b3) 10 km in scanning the left sideband of it.

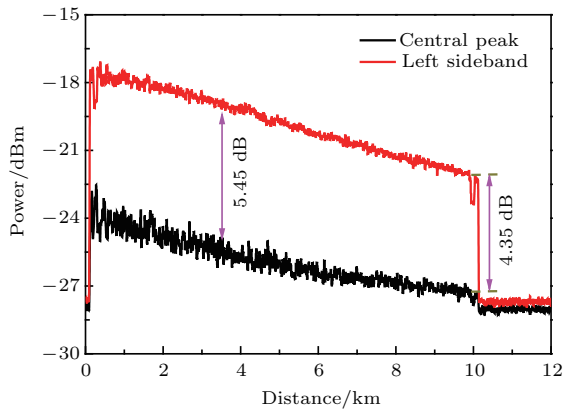


图8 (网刊彩色) 布里渊增益谱中心峰值和左边带峰值对应的频率下, 参考光与后向散射光的拍频信号强度随光纤长度的变化
 Fig. 8. (color online) Intensity of the beat of the reference and the backscattering in the frequency of peak value of the central peak and the left sideband of Brillouin gain spectrum along the sensing fiber, respectively.

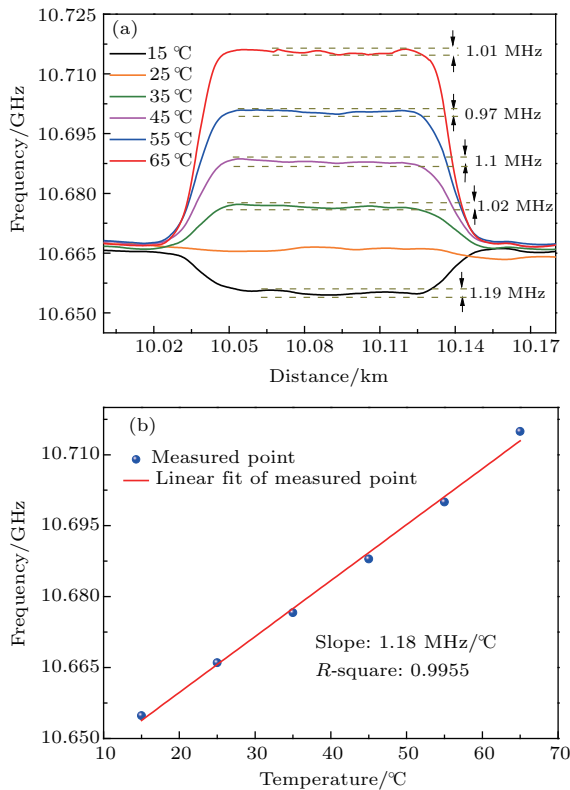


图9 (网刊彩色) 对左边带进行扫频时布里渊频移与温度的关系
 (a) 不同温度下, 待测光纤的布里渊频移沿线分布情况; (b) 待测光纤的布里渊频移随温度的变化
 Fig. 9. (color online) Relationship of BFS and temperature in frequency scanning the left sideband: (a) BFS of the fiber under test in different temperature along the optical fibers; (b) the coefficient between BFS and temperature.

3.3 入纤峰值功率对BOTDR系统测温精度的影响

在BOTDR光纤传感实验中, 适合的脉冲入纤

峰值功率对信号在传感光纤中的传输至关重要. 如果脉冲入纤峰值功率过小, 光纤本身的损耗导致光纤末端的信号特别微弱甚至传不到末端; 如果脉冲入纤峰值功率过大, 信号在光纤中传输时则会产生受激布里渊散射等非线性效应. 总之, 无论脉冲入纤峰值功率过小还是过大都会影响信号在光纤中的传输以及后向散射光的信噪比, 进而影响布里渊频移的解调精度. 因而, 根据实验所用激光器以及传感光纤确定合适的脉冲入纤峰值功率显得尤为关键.

为探究探测光脉冲峰值功率对BOTDR系统温度解调精度的影响, 实验中比较了不同入纤峰值功率下的布里渊频移差波动情况. 恒温箱温度分别稳定在 25 °C 和 55 °C, 通过调节脉冲放大器的放大倍数来设置不同的入纤峰值功率. 在不同的峰值功率下, 分别对布里渊增益谱左边带进行频率扫描, 以恒温箱温度为 25 °C 时的布里渊频移为基准进行校正, 消除光纤本身因应变产生的布里渊频移, 得出不同入纤峰值功率下布里渊频移差沿线分布情况, 如图 10 所示. 结果显示: 对于恒温箱中的约 103 m 光纤, 随着入纤峰值功率的增加, 解调出的布里渊频移差的频率波动逐渐较小; 但当入纤峰值功率达到 512 mW 时所解调出来的频率波动略有增大, 且入纤峰值功率增加至 696 mW 时, 图 10 (f) 中显示对于前端置于空气中的约 10 km 光纤在约 8—10 km 之间的布里渊频移差波动达 14.4 MHz, 位于恒温箱中的约 103 m 光纤的布里渊频移差波动约为 3.67 MHz. 根据图 10 中所示的不同功率下的布里渊频移差的解调精度可以得出, 探测脉冲信号的入纤峰值功率对系统测温精度有着非常重要的影响. 系统的测温精度会随着入纤峰值功率增大而增高, 但当入纤功率达到一定值即受激布里渊阈值时, 系统的测温精度则会降低.

自发布里渊散射信号越强, 布里渊增益谱越窄, 解调出布里渊频移精度越高. 通过比较不同入纤峰值功率下的同一位置处拍频信号的强度以及布里渊增益谱谱宽, 可以进一步得知入纤峰值功率对BOTDR系统测温精度的影响. 图 11 (a) 和图 11 (b) 分别为不同入纤峰值功率下, 布里渊增益谱左边带峰值对应频率下参考光与后向散射光拍频信号和对左边带进行扫频时解调出的布里渊增益谱宽随光纤长度的变化情况. 结果显示, 解调出

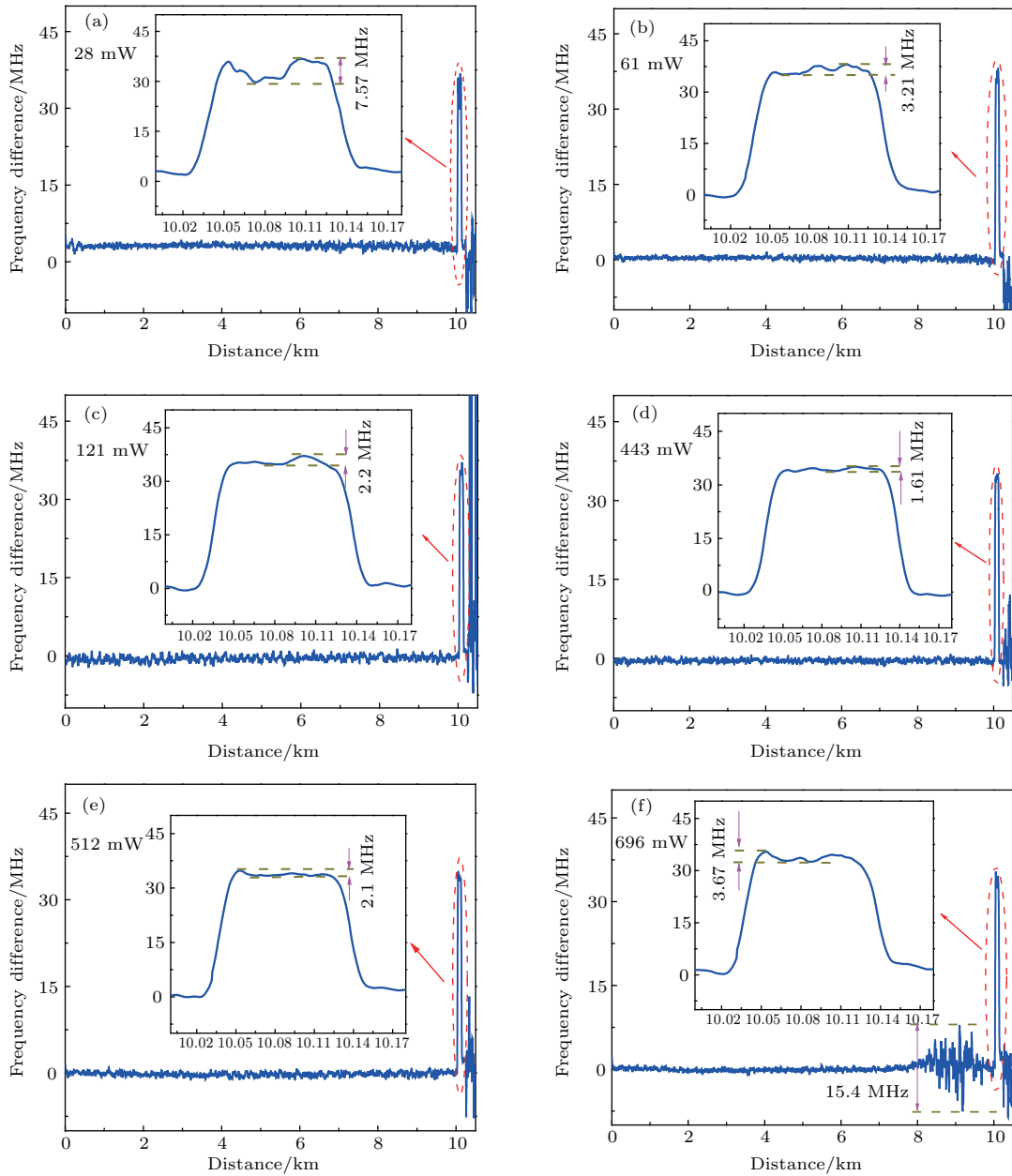


图 10 (网刊彩色) 对布里渊增益谱左边带扫频时, 不同入纤峰值功率下的布里渊频移差沿线分布情况 (a) 28 mW; (b) 61 mW; (c) 121 mW; (d) 443 mW; (e) 512 mW; (f) 696 mW

Fig. 10. (color online) BFS difference in frequency scanning the left sideband in different peak power into fiber along the sensing fibers: (a) 28 mW; (b) 61 mW; (c) 121 mW; (d) 443 mW; (e) 512 mW; (f) 696 mW.

的布里渊增益谱谱宽的变化趋势与采集到的拍频信号强度随光纤长度的变化趋势一一对应, 即光纤同一位置的布里渊增益谱谱宽随拍频信号的强度的增强而逐渐变窄, 但入纤峰值功率在 121—443 mW 之间时同一位置处的布里渊谱宽几乎不变. 当入纤峰值功率达到 512 mW 时在光纤约 9 km 的位置处拍频信号的强度下降趋势加快, 对应的布里渊谱展宽速度加快, 说明此功率下光纤已发生了受激布里渊散射等非线性效应. 当入纤峰值功率

增加至 696 mW 时, 在光纤约 7 km 处布里渊谱急剧展宽, 与此同时拍频信号强度急剧衰减, 但光纤在约 8.7 km 之后布里渊谱宽又逐渐变窄, 伴随着拍频信号强度回升. 该现象主要是入纤峰值功率过大使传输光纤发生了强的受激布里渊散射效应导致拍频信号强度急剧下降, 在强的受激布里渊散射过程中, 因电致伸缩效应而放大的声波调制光纤的材料密度, 进而引起非线性折射率变化使光纤产生双折射等非均匀性现象^[26], 由于光纤双折射的

长程累积引起后向布里渊散射信号的偏振态的变化^[27], 从而造成当入纤峰值功率为696 mW时, 光纤约7 km之后的布里渊增益谱宽的大动态范围的波动, 与此同时引起布里渊散射信号强度的波动进而影响拍频信号强度的波动. 为证明该现象非偶然因素造成, 图11中给出了探测脉冲峰值功率为815 mW时的拍频信号强度以及对应的布里渊增益谱宽随光纤长度的变化关系, 充分证明入纤峰值功率过大时, 强受激布里渊散射引起双折射加剧, 进而引起布里渊散射信号偏振态的变化.

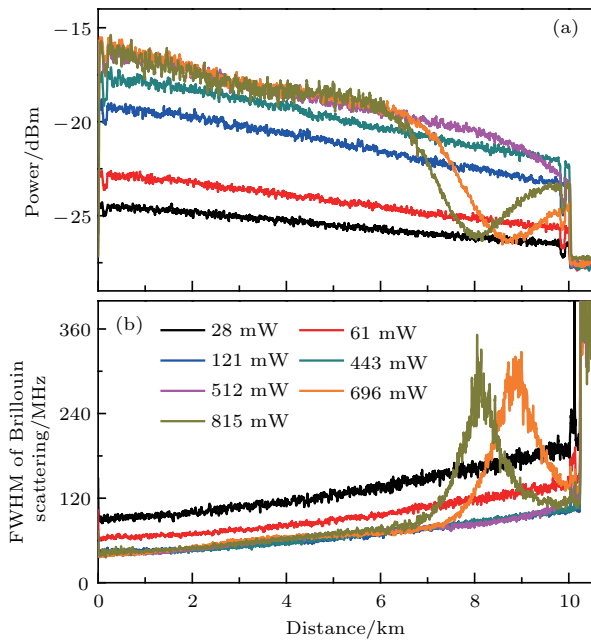


图11 (网刊彩色) 对左边带扫频时, 不同入纤峰值功率下拍频信号强度和布里渊增益谱宽沿光纤分布情况 (a) 左边带峰值对应频率下参考光与后向散射拍频信号强度; (b) 布里渊增益谱谱宽

Fig. 11. (color online) Intensity of the beat and full width at half maximum (FWHM) of Brillouin gain spectrum in frequency scanning the left sideband in different peak power along the sensing fibers: (a) Intensity of the beat of the reference and the backscattering in the frequency of peak value of the left sideband; (b) FWHM of Brillouin gain spectrum.

从上述实验结果和分析可知, 入纤光脉冲的峰值功率对BOTDR测温系统温度解调精度的影响十分显著. 当入纤峰值功率过小时, 光纤后向布里渊散射信号混杂于噪声之中, 系统信噪比很低, 导致后向布里渊增益谱较宽, 解调出的温度测量精度较差; 但当入纤峰值功率超过一定值即受激布里渊阈值时, 则会产生受激布里渊散射等非线性效应导致光纤双折射等非均匀性现象加剧, 使得后向布里渊

信号的强度以及其谱宽出现特别大的动态范围, 进而影响系统测温精度. 因此在实际应用中须选择合适的入纤峰值功率以提高系统测温精度.

4 讨 论

本文理论分析了AOM的频移特性造成布里渊增益谱产生边带以及对边带进行解调可以提高BOTDR系统测温精度的原因, 且实验验证了理论分析的正确性. 实验中采用AOM进行探测光脉冲的调制, 而声光调制器由于声光效应, 对其注入光产生多普勒频移, 本实验表现为调制成的光脉冲的频率相较于注入光向上频移200 MHz, 进而导致待测光纤的后向散射光中各光谱成分的频率均上移200 MHz, 如图2所示. 由于实验中采用参考光与后向散射光进行相干探测得到布里渊增益谱, 如图5(a)所示, 布里渊增益谱的边带(频率分别为 $\nu_B \pm \nu_{FS}$)是由参考光(频率为 ν_0)与布里渊散射光(斯托克斯光与反斯托克斯光频率分别为 $\nu_0 \pm \nu_B + \nu_{FS}$)拍频形成, 其中心峰(频率为 ν_B)是由瑞利散射光(频率为 $\nu_0 + \nu_{FS}$)与布里渊散射光拍频形成. 布里渊增益谱边带由于参考光的作用, 其信号强度高于中心峰(如图5(a)所示), 因此对布里渊增益谱边带进行解调可以提高系统信噪比, 如图8所示, 系统信噪比相较于传统的BOTDR系统提高了约4.35 dB. 根据(5)式可得, BOTDR系统信噪比越高, 布里渊频移解调精度越高, 对应着系统测温精度越高. 另一方面, 由于所用光源为线宽95 kHz的窄线宽激光器, 其相干长度远大于瑞利散射单元, 这样, 光纤中不同位置的各瑞利散射单元产生的散射光进行相干叠加, 且散射光在振幅和相位上随机分布, 进而光纤中不同位置处的瑞利散射信号相干叠加在一起的散射光功率随机起伏, 形成相干瑞利噪声, 且该噪声不能通过累加平均消除, 导致图8中所示的同一位置处, 布里渊增益谱中间峰对应的拍频信号强度随机波动较大, 进而造成图7中所示的相同位置处的中心峰解调出的布里渊增益谱比左边带解调的结果要宽许多. 综上, 采用布里渊增益谱边带进行温度解调, 不仅可以增强信号强度, 还可以消除后向散射光中相干瑞利噪声的影响, 提高了系统的信噪比. 这也是图6中显示的对布里渊增益谱左边带进行解调时, 测温精度远高于对中间峰解调的原因.

5 结 论

本文提出了一种利用布里渊增益谱边带解调提高BOTDR系统测温精度的方法,理论分析并实验验证了布里渊增益谱边带是由AOM的频移特性引起的,以及布里渊增益谱左边带进行频率扫描可以高精度解调出布里渊频移的原因.结果显示,窄线宽激光器作为光源时,参考光与后向散射光拍频形成的布里渊增益谱左边带的峰值功率远高于其中心峰值的功率,且前者的谱宽窄于后者的谱宽.对布里渊增益谱左边带进行频率扫描时,由于相干探测时参考光的作用,以及消除了相干瑞利噪声的影响,系统信噪比提高了4.35 dB,故利用布里渊增益谱左边带解调得到的测温精度远高于对其中心峰进行解调的结果.通过对左边带进行扫频,在10.2 km的传感距离上实现了 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的测温精度,并得到布里渊频移随温度变化的关系系数为 $1.18\text{ MHz}/^{\circ}\text{C}$.在此基础上,进一步研究了探测脉冲的峰值功率对系统测温精度的影响,得出入纤峰值功率过小,影响布里渊散射信号的信噪比,降低测温精度;入纤峰值功率过大,则会发生受激布里渊散射等非线性效应,并使光纤双折射现象加剧,导致信号传输距离减小,因此合适的入纤峰值功率可以提高测温精度,增加传感距离.该研究结果为提高BOTDR测温系统测温精度提供了一种新的解调方法.

感谢太原理工大学物理与光电工程学院王宇副教授对英文摘要的修改及润色.

参考文献

- [1] Liu D M, Sun Q Z 2009 *Laser Optoelect. Prog.* **46** 29 (in Chinese) [刘德明, 孙琪真 2009 激光与光电子学进展 **46** 29]
- [2] Zhao L J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6219 (in Chinese) [赵丽娟 2010 物理学报 **59** 6219]
- [3] Liu T G, Wang S, Jiang J F, Liu K, Yin J D 2014 *Chin. J. Sci. Instrum.* **35** 1681 (in Chinese) [刘铁根, 王双, 江俊峰, 刘琨, 尹金德 2014 仪器仪表学报 **35** 1681]
- [4] Leung C K Y, Wan K T, Inaudi D, Bao X Y, Habel W, Zhou Z, Ou J P, Ghandehari M, Wu H C 2015 *Mater. Struct.* **48** 871
- [5] Zhang C, Rao Y J, Jia X H, Deng K, Chang L, Ran Z L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 104211 (in Chinese) [张超, 饶云江, 贾新鸿, 邓坤, 茆亮, 冉曾令 2011 物理学报 **60** 104211]
- [6] Bao X Y, Chen L 2012 *IEEE Sensors* **12** 8601
- [7] Xia H Y, Zhang C X, Mu H Q, Sun D S 2009 *Appl. Opt.* **48** 189
- [8] Hu J C, Chen B, Li G Y, Lin Z Q 2010 *Advanced Sensor Systems and Applications Iv* Beijing, China, October 18–20, 2010 p785309
- [9] Wang F, Li C L, Zhao X D, Zhang X P 2012 *Appl. Opt.* **51** 176
- [10] Wang F, Zhang X P, Wang X C, Chen H S 2013 *Opt. Lett.* **38** 2437
- [11] Hao Y Q, Ye Q, Pan Z Q, Cai H W, Qu R H 2014 *Chin. Phys. B* **23** 110703
- [12] Song M P, Xia Q L, Feng K B, Lu Y, Yin C 2016 *Opt. Quan. Electron.* **48** 30
- [13] Maughan S M, Kee H H, Newson T P 2001 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **13** 511
- [14] Snoddy J, Li Y, Ravet F, Bao X Y 2007 *Appl. Opt.* **46** 1482
- [15] Hao Y Q, Ye Q, Pan Z Q, Yang F, Cai H W, Qu R H, Zhang Q Y, Yang Z M 2012 *IEEE Photon. J.* **4** 1686
- [16] Lu Y G, Yao Y G, Zhao X D, Wang F, Zhang X P 2013 *Opt. Commun.* **297** 48
- [17] Zhang Y X, Wu X L, Ying Z F, Zhang X P 2014 *Electron. Lett.* **50** 1014
- [18] Kurashima T, Horiguchi T, Izumita H, Furukawa S, Koyamada Y 1993 *IEICE Trans. Commun.* **76** 382
- [19] Shimizu K, Horiguchi T, Koyamada Y, Kurashima T 1994 *J. Lightwave Technol.* **12** 730
- [20] Kwon H, Kim S, Yeom S, Kang B, Kim K, Kim T, Jang H, Kim J, Kang S 2013 *Opt. Commun.* **294** 59
- [21] Wang R G 2012 *Ph. D. Dissertation* (Nanjing: Nanjing University) (in Chinese) [王如刚 2012 博士学位论文 (南京: 南京大学)]
- [22] Liu J W, Du Z H, Qi R B, Xu K X 2012 *Nanotech. Prec. Eng.* **10** 332 (in Chinese) [刘景旺, 杜振辉, 齐汝宾, 徐可欣 2012 纳米技术与精密工程 **10** 332]
- [23] Li Z L, Yan L S, Peng Y L, Pan W, Luo B, Shao L Y 2015 *Opt. Express* **23** 5744
- [24] Souza K D 2006 *Meas. Sci. Technol.* **17** 1065
- [25] Cahill J P, Okusaga O, Zhou W M, Menyuk C R, Carter G M 2015 *Opt. Express* **23** 6400
- [26] Xie S R 2013 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Tsinghua University) (in Chinese) [谢尚然 2013 博士学位论文 (北京: 清华大学)]
- [27] Dong Y K, Jiang T F, Teng L, Zhang H Y, Chen L, Bao X Y, Lu Z W 2014 *Opt. Lett.* **39** 2967

Temperature measurement accuracy enhancement in the Brillouin optical time domain reflectometry system using the sideband of Brillouin gain spectrum demodulation*

Liu Rui-Xia¹⁾²⁾ Zhang Ming-Jiang^{1)2)3)†} Zhang Jian-Zhong¹⁾²⁾ Liu Yi¹⁾²⁾³⁾
Jin Bao-Quan¹⁾²⁾³⁾ Bai Qing¹⁾²⁾ Li Zhe-Zhe¹⁾²⁾

1) (*Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education and Shanxi Province, Taiyuan 030024, China*)

2) (*Institute of Optoelectronic Engineering, College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China*)

3) (*State Key Laboratory of Coal and CBM Co-mining, Jincheng 048000, China*)

(Received 4 May 2016; revised manuscript received 20 July 2016)

Abstract

A novel method by demodulating the sideband of Brillouin gain spectrum (BGS) is proposed and demonstrated in order to enhance temperature measurement accuracy in a Brillouin optical time domain reflectometry (BOTDR) sensing system in this paper. Firstly, the characteristic of frequency shift of an acoustic optical modulator (AOM) is utilized to generate the sideband of BGS, and the influence of the peak power of the probe optical pulse on the temperature measurement accuracy is also investigated. Moreover, the theoretical analysis shows that benefiting from the reference continuous light from the source laser by the coherent detection, the intensity of the sideband is higher than that of the central peak, which indicates that the higher signal-to-noise ratio (SNR) can be expected by demodulating the sideband of BGS instead of the central peak. Thus the demodulating the sideband of BGS can further improve temperature measurement accuracy in the BOTDR sensing system theoretically. Secondly, the experimental setup of the distributed temperature sensing system based on BOTDR is built. The AOM is selected as the optical pulse modulator to produce high-extinction-ratio probe pulse light, following the frequency upshift of the injection light. The beat signal generated by coherently detecting the backscattering light from the fiber under test (FUT) and the reference light from the source laser is acquired. Furthermore, the central peak and the left sideband of BGS are respectively scanned by using microwave heterodyne frequency shift technique. The time domain waveforms at each frequency point are then obtained and Lorentzian curve fitting is performed at each sampling position, thus Brillouin frequency shift (BFS) along the FUT is plotted and the temperature is demodulated along the FUT based on the linear dependence of the BFS on the temperature in the optical fiber. Finally, the experimental results show that the peak power of the left sideband of Brillouin gain spectrum is about 3.27 dB stronger than that of the central peak. Meanwhile, the linewidth of left sideband of BGS is about 14.7 MHz narrower than that of the central peak at -1 dB point in the same conditions. When the left sideband of BGS is scanned, the SNR of the BOTDR system is improved by 4.35 dB due to the contribution of the reference light by coherently detecting and eliminating the effect of the coherent Rayleigh noise, and then the temperature measurement accuracy of ± 0.5 °C is achieved over a 10.2 km sensing fiber.

Keywords: Brillouin optical time domain reflectometry, sideband of Brillouin gain spectrum, peak power, temperature measurement accuracy

PACS: 42.68.Mj, 42.81.Pa, 42.81.Dp, 42.79.-e

DOI: 10.7498/aps.65.244203

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61377089, 61527819), the Key Science and Technology Research Project Based on Coal of Shanxi Province, China (Grant No. MQ2014-09), and the Coal-Bed Methane Joint Research Fund of Shanxi Province, China (Grant No. 2015012005).

† Corresponding author. E-mail: zhangmingjiang@tyut.edu.cn