

# 基于拉曼放大的长距离快速布里渊光时域反射仪

马祥杰<sup>\*\*</sup>, 周黎明, 程凌浩<sup>\*</sup>, 刘伟民

暨南大学光子技术研究院, 广东 广州 510632

**摘要** 基于宽带接收的快速布里渊光时域反射技术, 通过结合分布式拉曼放大来实现长距离分布式布里渊传感。研究了拉曼放大前后系统的性能差别以及非线性现象, 并探究拉曼抽运功率与脉冲功率的最佳组合方式。最终通过实验实现了空间分辨率为 50 m、传感距离为 100 km 左右的快速温度传感, 其中, 在 50 km 处获得 1.2 °C 的温度测量精度。系统传感距离较无拉曼放大时提高了约 50 km, 并且能够在 10 s 左右快速完成一次测量。

**关键词** 光纤光学; 布里渊光时域反射; 布里渊散射; 拉曼放大

中图分类号 TP212.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.170617

## Fast and Long-Distance Brillouin Optical Time-Domain Reflectometry Based on Raman Amplification

Ma Xiangjie<sup>\*\*</sup>, Zhou Liming, Cheng Linghao<sup>\*</sup>, Liu Weimin

*Institute of Photonics Technology, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China*

**Abstract** Herein, using a fast Brillouin optical time-domain reflectometry system with a wideband receiver and distributed Raman amplification, a long-distance distributed Brillouin sensing is realized. We study the performance difference and nonlinear phenomena observed in the system before and after Raman amplification, and also jointly optimize the Raman pump and launched pulse powers. Our experiments achieve a sensing distance of around 100 km with a spatial resolution of 50 m and accuracy of 1.2 °C at a sensing position of 50 km. In comparison to the system without Raman amplification, the sensing distance is increased by approximately 50 km and measurement can be completed in approximately 10 s only.

**Key words** fiber optics; Brillouin optical time-domain reflection; Brillouin scattering; Raman amplification

**OCIS codes** 060.2310; 060.2370; 190.5650; 280.4788

## 1 引言

由于光纤相比传统电类传感器具有抗腐蚀、抗电磁干扰等优点, 光纤传感技术得到了快速发展。分布式光纤传感技术是光纤传感领域的研究热点之一。由于分布式光纤传感技术能在传感路径上获得各点温度、应变、振动等参数的连续分布信息<sup>[1]</sup>, 因此该技术在桥梁、隧道和高压线路等大型结构的检测方面有着广阔的应用前景<sup>[2]</sup>。近年来, 随着研究不断深入, 基于布里渊散射的分布式光纤传感器的探测距离和分辨率也不断提高<sup>[3-6]</sup>, 其中, 采用单端输入输出结构的布里渊光时域反射仪(BOTDR)由于在工程实践中

使用起来更加方便, 因此受到很多关注。相比环形结构的布里渊光时域分析仪(BOTDA), BOTDR 更适宜用于长距离分布式测量的场合。但是, BOTDR 系统中, 自发布里渊散射信号非常微弱, 进行长距离测量时远端散射信号易淹没于噪声中, 从而使传感距离受到限制<sup>[7-11]</sup>。另外, 由于光纤中非线性效应的存在, 增大输入光功率易产生受激布里渊散射和调制不稳定性等附加现象, 因此不能简单地通过提高探测脉冲的功率来增加传感距离<sup>[12]</sup>。

为解决上述问题, 分布式拉曼放大技术可以用来提高整段光纤的探测精度和传感距离<sup>[13]</sup>。拉曼放大器<sup>[14]</sup>有宽增益频带(大于 100 nm)、小噪声系

收稿日期: 2019-02-25; 修回日期: 2019-04-11; 录用日期: 2019-04-25

基金项目: 国家自然科学基金(61875246)、广州市科技计划(201707010338)

<sup>\*</sup> E-mail: chenglh@ieee.org; <sup>\*\*</sup> E-mail: mxj9488@163.com

数(不大于 3 dB)等优点,而且不需要特殊增益介质,基于传感光纤即可实现光信号放大。在拉曼放大技术的应用基础上,通过调节传感光纤前端与拉曼抽运之间的距离,能够实现前端拉曼放大<sup>[15]</sup>、延迟拉曼放大<sup>[16]</sup>、远程拉曼放大<sup>[17]</sup>等不同阶段的放大目标。若对布里渊信号进行  $2^{20}$  次的平均运算,在 100 km 的传感范围内,能够达到  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$  的温度分辨率和 20 m 的空间分辨率。分布式拉曼放大技术也能够与相干检测相结合来提升传感距离<sup>[18]</sup>,达到 150 km 的传感距离;通过与内联掺铒光纤放大(EDFA)技术的结合,在一定距离内放大衰减脉冲,在 50 km 的传感距离上能够实现 5 m 的空间分辨率,  $23\text{ }\mu\text{e}$  的应变精度和  $1.08\text{ }^{\circ}\text{C}$  的温度精度,在不牺牲空间分辨率的前提下提升动态范围<sup>[19]</sup>。

在 BOTDR 系统中,对布里渊散射信号进行频谱分析,可以获得布里渊散射谱峰值处所对应的频率,即布里渊频移,进而推出光纤沿轴线的温度以及应变的分布情况。传统的方法是基于频率扫描方式<sup>[20]</sup>。但频率扫描具有固有步长,会导致测量不连续,扫频间隔过大将导致拟合的中心频率误差较大,从而劣化测量精度;如果扫频间隔过小,会造成系统测量时间较长,降低系统的实时性。本文采用宽带接收方案,通过下变频系统和宽带高速模数转换器(ADC)捕获光纤沿轴线全频带的布里渊散射信号,通过时频分析的方法来分析和处理布里渊散射信号频谱。该方案与扫频法的逐点扫描方式不同,具有较快的测量速度,克服了传统 BOTDR 系统测量时间长的问题。

在某些应用场合,比如长距离火警探测、电网光纤复合架空地线(OPGW)融冰温度监测、边坡落石告警、边界入侵等,测量时间长短是影响系统应用的重要因素。本文采用了宽带接收、短时傅里叶变换和图形处理器(GPU)并行超快速计算的新型架构,实现了长距离光纤传感的快速测量,使整个系统的单次传感时间由分钟量级提升到秒量级,对于需要快速响应需求的传感应用场景有较大的应用价值。所提方案使传感距离达到 100 km,并能够在 10 s 左右完成一次测量,具备 50 m 的空间分辨率,实验过程中在 50 km 处达到  $1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$  的温度测量精度。本文还对光纤中的非线性效应对传感距离的制约进行了研究。

## 2 基本原理

### 2.1 布里渊频谱及其检测

光纤中微观粒子的自发声场能导致光纤折射率

的周期性调制,因此自发声场产生的效果可视为形成沿光纤轴向前或向后运动的光栅。当有角频率  $\omega_0$  的抽运光注入光纤时,移动的光栅反射抽运光,产生频率下移的布里渊斯托克斯光和上移的布里渊反斯托克斯光<sup>[21]</sup>。忽略光纤色散效应,斯托克斯光和反斯托克斯光相对入射光的频移量相等,可表示为<sup>[22]</sup>

$$\nu_s = \nu_{as} = \frac{\Omega_s}{2\pi} = \frac{\Omega_{as}}{2\pi} = \frac{2nV_a}{\lambda_0}, \quad (1)$$

式中: $\nu_s$  和  $\nu_{as}$  分别为斯托克斯光和反斯托克斯光相对入射光的频移量; $\Omega_s$  和  $\Omega_{as}$  分别为斯托克斯光和反斯托克斯光相对抽运光角频率的偏移量; $n$  为光纤折射率; $V_a$  为声波速率; $\lambda_0$  为抽运光的波长。由(1)式可知,布里渊频移量与光纤的有效折射率和光纤中声波速率成正比,与抽运光波长成反比。光纤中的声速表示为

$$V_a = \sqrt{E(1-\kappa)/(1+\kappa)(1-2\kappa)\rho}, \quad (2)$$

式中: $E$  表示光纤材料的杨氏模量; $\kappa$  表示光纤的泊松比; $\rho$  为密度。传感光纤温度和应力的变化,会导致其有效折射率和声波速率发生改变,从而引起布里渊频移量的变化<sup>[23]</sup>。因此,检测布里渊频移量能够实现了对温度和应变的检测。

在实际测量中,由于光纤中声子寿命有限,布里渊频谱表现出一定的线宽,其谱型一般为洛伦兹谱型。检测布里渊频移量就需要测量出该洛伦兹谱型峰值处所对应的频率。常规的方法可以通过频率扫描来逐点测出布里渊频谱,然后通过洛伦兹拟合(Lorentz fitting)算法求出频谱峰值所对应的布里渊频移量。该方案只需要很窄的接收带宽,接收机较为简单,但是需要多次扫描,因此需要较长的测量时间。宽带接收的方案则采用宽带接收机接收整个布里渊频谱,通过快速傅里叶变换(FFT)等数字信号处理技术来求得布里渊频移量。该方案的接收机较为复杂,且数据处理量较大,但是无需多次扫描,因此测量时间较短。

### 2.2 分布式光纤拉曼放大

若一个弱信号光与一个强抽运光同时在光纤中传输,并且其频率差处于拉曼增益谱的带宽内,拉曼散射就能将此信号放大。设抽运光于  $z=0$  处注入光纤,功率为  $P_p(0)$ 。信号光和抽运光都沿  $z$  轴正方向传播,信号光和抽运光的同向耦合波方程可表示为<sup>[24]</sup>

$$\frac{dP_B(z)}{dz} = \frac{g_R}{A_{\text{eff}}} P_p(z) P_B(z) - \alpha_B P_B(z), \quad (3)$$

$$\frac{dP_P(z)}{dz} = -\frac{\nu_P}{\nu_B} \frac{g_R}{A_{\text{eff}}} P_B(z) P_P(z) - \alpha_P P_P(z), \quad (4)$$

式中： $P_B(z)$ 、 $P_P(z)$ 分别为信号光和抽运光沿光纤轴向分布的光功率； $z$ 为光纤沿轴线的位置； $g_R$ 为拉曼增益系数； $\nu_B$ 、 $\nu_P$ 分别为信号光和抽运光的频率； $A_{\text{eff}}$ 为光纤有效面积； $\alpha_B$ 、 $\alpha_P$ 分别为信号光频率和抽运频率处的光纤损耗。

当拉曼放大用于分布式放大布里渊散射信号时，作为信号光的布里渊散射信号相比于拉曼抽运，其功率非常小，(4)式等号右边第一项代表的抽运消耗可以忽略，耦合方程可被求解。因此，位置  $L$  处的布里渊散射信号强度可表示为

$$P_B(L) = P_B(0)G_A \exp(-\alpha_B L), \quad (5)$$

式中： $G_A = \exp(g_R P_0 L_{\text{eff}}/A_{\text{eff}})$ ， $L_{\text{eff}} = [1 - \exp(-\alpha_P L)]/\alpha_P$ ， $P_0$ 为信号光发射功率， $G_A$ 代表了分布式拉曼放大引入的增益。由(5)式可以求得布里渊散射信号最强处位于

$$L_{\text{max}} = \frac{1}{\alpha_P} \ln \frac{g_R P_0}{\alpha_B A_{\text{eff}}}. \quad (6)$$

(6)式表明，为了尽可能延长传感距离，应该尽量减小布里渊散射信号和拉曼抽运的损耗，同时提高拉曼抽运的发射功率。

### 3 实验装置

实验所设计的 BOTDR 系统如图 1 所示。

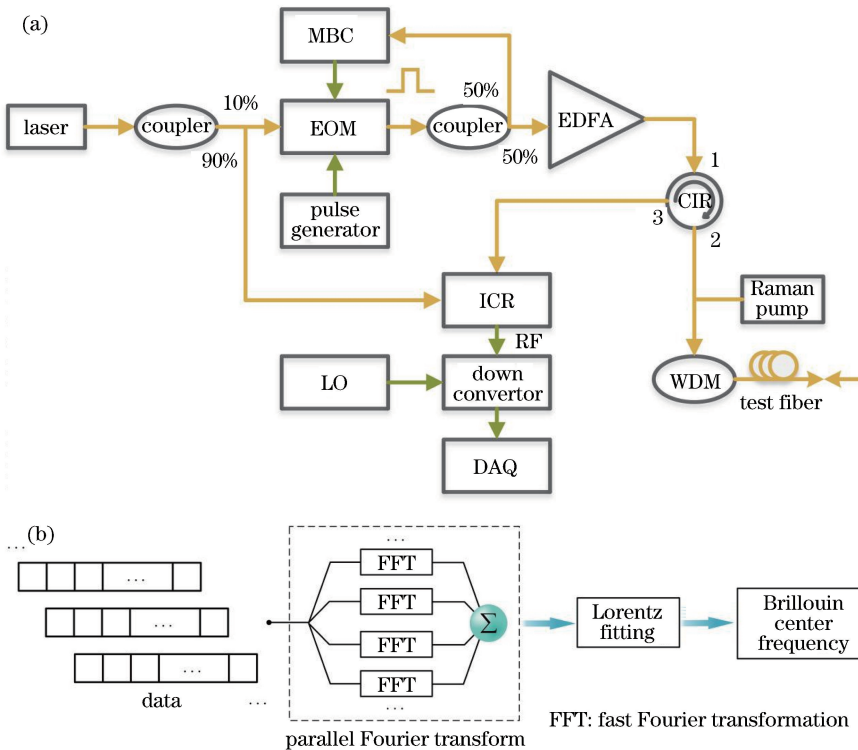


图 1 基于拉曼放大的快速 BOTDR 实验系统。(a)实验装置；(b)数据处理模块示意

Fig. 1 Experimental systems of fast BOTDR based on Raman amplification. (a) Experiment setup; (b) data processing module

图 1(a)中所示为 BOTDR 实验装置示意图。光源为中心波长 1550.12 nm，线宽 1 MHz 的可调激光器(laser)输出连续光，经 10 : 90 的光纤耦合器(coupler)分为两路，10%一路作为探测信号光经电光调制器(EOM)调制后变成探测脉冲光，由脉冲发生器(pulse generator)控制 EOM，90%的一路作为本地参考光注入相干接收机(ICR)。50 : 50 的光纤耦合器(coupler)将调制后的探测脉冲光分为两路，其中一路进入偏置电压控制器(MBC)以输出直流

偏置电压，将 EOM 控制在最低点，另一路经脉冲光放大器(EDFA)放大后进入三端口光纤环形器(CIR)1 端口。在进入传感光纤之前，设置了前向拉曼放大结构，输出功率范围为 0~800 mW 的拉曼放大器(Raman pump)通过 1455/1550 的波分复用器(WDM)接入环形器 2 端口与传感光纤中间。传感光纤为中心波长 1455 nm、长度 120 km 的单模光纤(test fiber)。经传感光纤后返回的布里渊散射信号由环形器 3 端口输出，注入 ICR<sup>[25]</sup>作为信号光，

将 ICR 输出的射频信号 (RF) 下变频, 本振频率 (LO) 设置为 10.6 GHz。对下变频后的信号进行数据采集 (DAQ)。

DAQ 的采样率为 1 GSa/s, 模拟带宽大于 1.5 GHz, 理论上可以分析约 500 MHz 带宽的频谱。因此, 将布里渊散射信号下变频至合理的中频后, 经过 DAQ 采样, 可以通过数字信号处理技术分析该中频附近 500 MHz 带宽的频谱, 从而可以快速获取整个布里渊频谱, 避免了多次扫描。如图 1(b) 中的数据模块所示, 将所得到的信号数据进行并行傅里叶变换 (parallel Fourier transform), 求和之后进行洛伦兹拟合, 利用拟合的结果可以得到布里渊中心频率 (Brillouin center frequency)。实验中, 经过并行算法处理, 可以在 10 s 内完成对 120 km 传感数据的处理, 实现了快速测量。

本文实验中, 布里渊散射信号在下变频处理过程中, 本振信号频率为 10.6 GHz, 因此, 所有测得的

布里渊谱中心频率值均是相对于 10.6 GHz 的偏移值。比如 200 MHz 的测量值对应的是 10.8 GHz 布里渊谱中心频率值。

## 4 分析与讨论

### 4.1 拉曼放大辅助的 BOTDR

为了验证拉曼放大对 BOTDR 传感距离的提升, 首先使用脉宽 500 ns 的探测脉冲进行实验, 比较拉曼放大前后系统的极限传感距离。传感光纤的总长度约为 120 km, 由 3 段不同厂家生产的单模光纤熔融拼接而成。将拉曼抽运功率分别设置为 800 mW 和 0 mW, 调整放大探测脉冲的 EDFA 抽运电流, 使得有无拉曼放大时的传感距离均为最大。将采集到的数据采用洛伦兹最小二乘法 (拟合点数为 45) 进行拟合, 分别得到光纤沿轴线各个位置的布里渊谱中心频率, 结果如图 2 所示, 可以看到拉曼放大显著地提升了系统的传感距离。

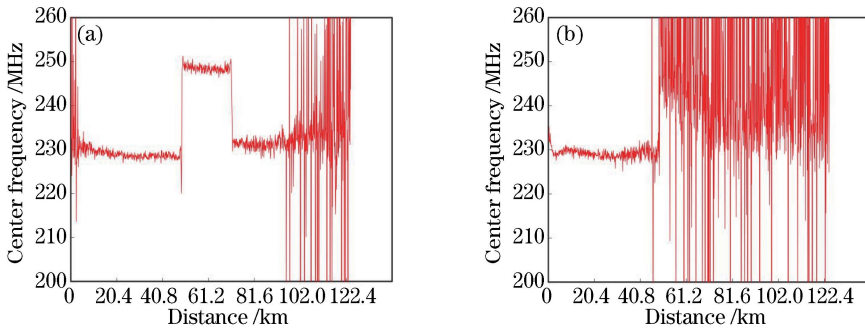


图 2 洛伦兹拟合后的光纤沿轴线各个位置中心频率图。(a)有拉曼放大;(b)无拉曼放大

Fig. 2 Center frequency as a function of sensing distance after Lorentzian fitting. (a) With Raman amplification; (b) without Raman amplification

图 2(a)展示了有拉曼放大时, 光纤各处所测得的布里渊谱中心频率值。分别对 20.4~40.8 km, 50~71 km, 72.4~95.3 km 三段光纤的数据进行进行重复性实验, 经过 32 组实验后得到最终结果, 其中: 20.4~40.8 km 处的标准差为 0.55 MHz; 50~71 km 处的标准差为 0.75 MHz; 72.4~95.3 km 处的标准差为 1.2 MHz。随着传感距离的增加, 测量精度逐渐降低。测量结果在 100 km 左右位置处开始表现出明显的劣化, 可知其极限传输距离为 100 km 左右。其中 50~71 km 段相较于另外两段的中心频率有近 20 MHz 的频率差, 这是由光纤种类不同导致的。由(2)式可知, 受光纤材料和制作工艺的不同, 不同厂家甚至不同批次生产的光纤, 在相同温度和应变条件下的布里渊中心频率也会有所不同。本实验中使用富通光纤和康宁光纤, 经过了相

同的下变频后, 常温环境下的布里渊中心频率分别在 250 MHz 和 230 MHz 左右, 差别为 20 MHz。而从图 2(b)中可以看出信号在 50 km 左右位置劣化, 其中, 7~43.8 km 处标准差为 0.95 MHz。对比图 2(a)和图 2(b)可看出, 拉曼放大后 BOTDR 系统的传感距离和精度得到提高。在无拉曼放大时, 脉冲光功率一般为 100 mW 量级。而受限于非线性效应, 为了实现长距离传感而采用拉曼放大时, 需要大幅降低输入脉冲光功率到 10 mW 量级, 使得传感光纤近端的散射光信号很微弱, 但会导致测量结果劣化。然而这一不利因素可以通过短暂关闭拉曼放大, 同时提高脉冲光功率而予以弥补。

进一步分析图 2(a)所示的有拉曼放大条件下的光纤沿轴线的频谱图, 可以得到布里渊散射信号随光纤线路的功率演变, 结果如图 3 所示。

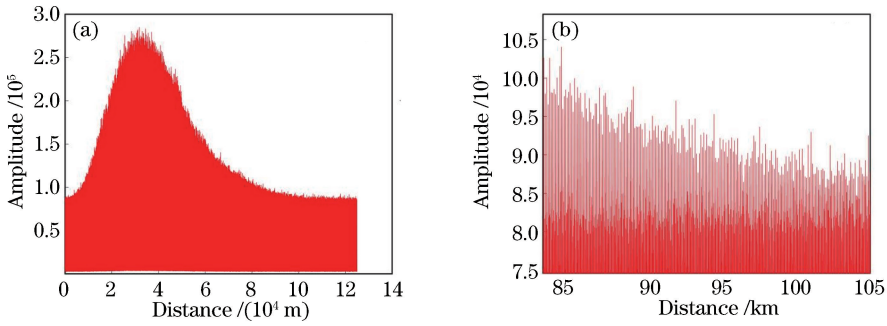


图3 光纤沿轴线频谱。(a)全段光纤频谱;(b)光纤95 km左右部分频谱

Fig. 3 Frequency spectra along fiber. (a) Frequency spectrum of whole fiber; (b) frequency spectrum around 95 km

由图3(a)可知,在传感光纤首端,散射光的功率很小,这是因为拉曼放大是一种分布式放大,需要在光纤中累积一定的传输距离才有明显的增益。随着传感距离增加,布里渊散射光功率也在不断增大。当拉曼增益和光纤衰减基本相同时,散射光功率曲线在峰值附近趋于平坦。随后,光纤损耗超越了拉曼增益,使得散射光的功率呈下降的趋势,一直到100 km附近,此时散射信号太微弱,以致淹没在噪声中。图3显示的光纤末端较为平坦的部分可被认为是本系统的本底噪声。在布里渊信号接近底噪附近的位置是该系统的极限传感距离。对光纤100 km左右位置的频谱进行分析,如图3(b)所示,在100 km左右,散射光功率已经非常接近系统本底

噪声,因此系统的极限传输距离为100 km左右。

实验中还进行了拉曼放大辅助的BOTDR系统长距离温度传感实验,如图4所示。将120 km传感光纤中部300 m左右段置于恒温水浴锅中,分别加热至35,45,55,65,75 °C,其结果如图4(a)所示。实验采用了512点的短时傅里叶变换(STFT),每个测量数据段含512个点,通过进行STFT获得布里渊频谱,从而获得布里渊频率,因此STFT对应的空间分辨率为51.2 m。由图4(b)可见,传感温度发生100%跳变对应的测量点间距为51.2 m;发生10%~90%跳变对应的测量点间距为40.96 m左右。因此,系统的传感空间分辨率为50 m左右。

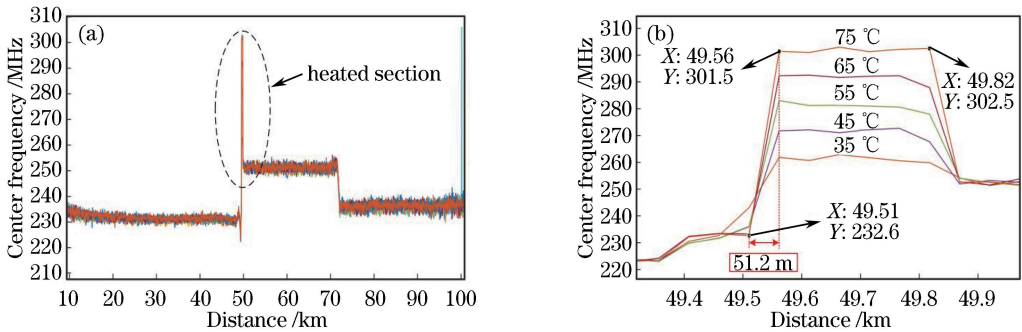


图4 长距离温度传感实验。(a)中心频率图;(b)加热段中心频率图

Fig. 4 Long-distance temperature sensing experiment. (a) Center frequency; (b) center frequency in heated section

在非加热段进行重复性的实验,利用32组实验结果的标准差验证了结果的良好一致性。在加热段,线性拟合中心频率随温度的变化关系如图5所示,设置温度与获得的布里渊中心频率之间具有良好的线性关系,曲线的斜率为1.01 MHz/°C。此外,测量数据与拟合曲线之间的标准误差为1.09 MHz,这也反映出在50 km处,温度的测量精度约为1.08 °C。

#### 4.2 光纤非线性对BOTDR传感距离的限制

光纤非线性效应限制了注入光纤所允许的最大

脉冲功率,因此也限制了BOTDR系统的最大传感距离。首先研究脉冲发射峰值功率对系统的影响。32组实验中采用脉宽为500 ns的探测脉冲光,拉曼抽运功率设置为800 mW。分别采集了脉冲光发射功率 $P$ 为5,10,15 mW下全段光纤的频谱,如图6所示。

当脉冲发射功率提高时,散射光功率最大值也随之提高,并且最大值出现的位置不断提前,但是传感距离反而缩短。这是因为越强的脉冲发射功率,引起的拉曼抽运消耗越大。同时,也更快地导致受

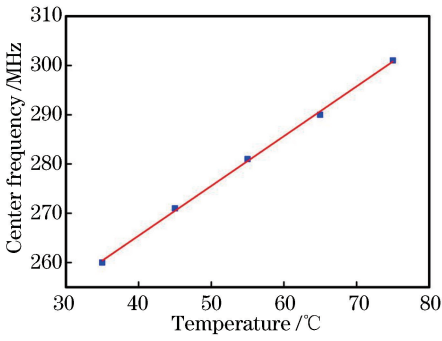


图5 布里渊中心频率随温度变化的曲线  
Fig. 5 Brillouin center frequency as a function of temperature

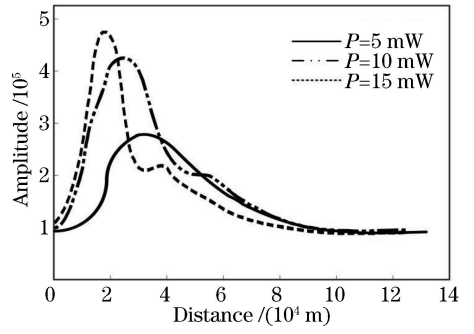


图6 不同脉冲光功率下的光纤沿轴线频谱  
Fig. 6 Frequency spectra along fiber under different pulsed optical powers

激布里渊散射,从而使得脉冲功率被过快消耗。然而在散射光功率下降的过程中,还会再一次表现出一个短暂的放大过程,比如图6中10 mW脉冲发射功率在60 km附近以及15 mW脉冲发射功率在40 km附近,都形成了另外一个散射光功率的峰值。这一现象是由自相位调制导致的调制不稳定性(MI)造成的。MI使得EDFA的自发辐射噪声(ASE)被迅速放大,并通过瑞利散射散射回接收端,从而形成了散射光的另外一个放大过程。但是MI放大主要放大了ASE,因此当MI的增益谱峰与布里

渊增益谱峰重叠时,就会对布里渊散射信号造成很强的干扰,使得测量精度降低。图7是对采集到的数据采用洛伦兹最小二乘法(拟合点数为75)进行拟合得到的布里渊频移量,对比3张图片可以发现,随着脉冲发射功率的增大,出现毛刺的位置也在不断提前。当 $P=5\text{ mW}$ 时,毛刺出现在100 km左右的位置;当 $P=10\text{ mW}$ 时,毛刺出现在40 km左右的位置;当 $P=15\text{ mW}$ 时,毛刺出现在23 km左右的位置。由此可知过强的脉冲发射功率所引起的光纤非线性效应使得测量精度劣化,并最终限制了传感距离。

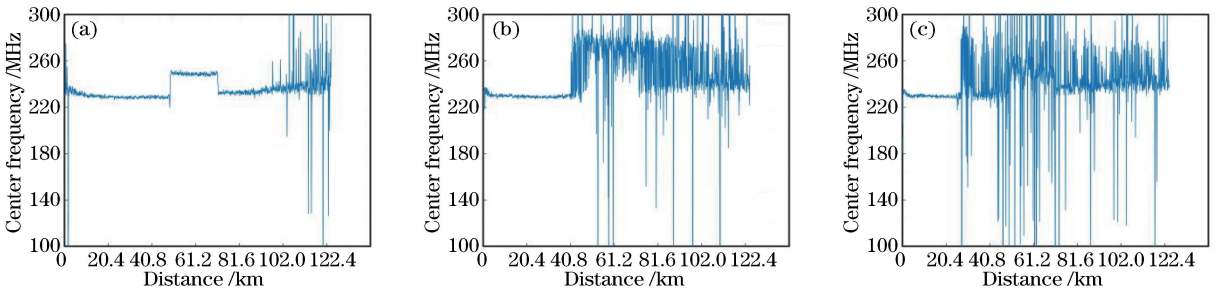


图7 不同脉冲光功率下洛伦兹拟合后的光纤沿轴线中心频率。(a)  $P=5\text{ mW}$ ; (b)  $P=10\text{ mW}$ ; (c)  $P=15\text{ mW}$   
Fig. 7 Center frequency as a function of sensing distance after Lorentzian fitting under different pulsed optical powers.  
(a)  $P=5\text{ mW}$ ; (b)  $P=10\text{ mW}$ ; (c)  $P=15\text{ mW}$

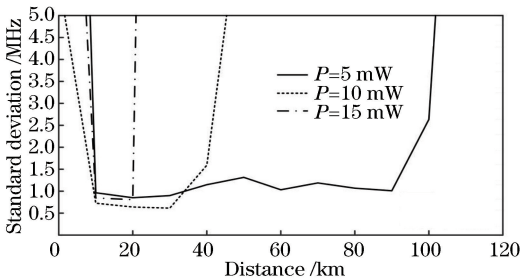


图8 不同脉冲光功率下光纤沿轴线各处的标准差  
Fig. 8 Standard deviation along fiber under different pulsed optical powers

为了对传感距离和非线性效应进行定量分析,在传感光纤上每隔10 km取1 km光纤的测量数据

进行标准差分析,结果如图8所示。在光纤最开始的10 km,由于此时光纤中的脉冲光还很微弱,3种脉冲光发射功率都表现出较大的标准差,但这种情况下表现出来的较大测量误差可以通过提高脉冲光发射功率而得到显著改善,因此并不限制最终的传感距离。在10 km之后,3种脉冲发射功率则表现出不同的标准差特性:当脉冲光发射功率为5 mW时,标准差在10~90 km处都较小,在100 km处也仅有2.5 MHz左右;当脉冲光发射功率为10 mW时,标准差在10~30 km处较小,30 km以后标准差随着距离的增加而迅速增大;当脉冲光发射功率为15 mW时,标准差在10~20 km处较小,在光纤

的其他位置标准差都较大。从这些结果可以看出,采用了分布式拉曼放大技术后,传感距离并不能简单地通过提高脉冲光发射功率来延长。光纤的非线性效应将成为限制系统传感距离的最终因素。

## 5 结 论

研究了基于分布式光纤拉曼放大的长距离快速BOTDR系统。实验结果表明:采用宽带接收方案的BOTDR系统能实现快速的测量,而拉曼放大则显著延长了传感距离;在长距离的温度传感实验中,拉曼放大的BOTDR系统能达到100 km左右的传感距离,且在50 km处达到1.2 °C的温度测量精度,并能够在10 s内完成测量,实现快速传感;此外,实验还表明最终限制传感距离的因素是光纤中的受激布里渊散射和调制不稳定性这两种非线性效应。

## 参 考 文 献

- [1] Adachi S. Distributed optical fiber sensors and their applications [C] // 2008 SICE Annual Conference, August 20-22, 2008, Chofu, Japan. New York: IEEE, 2008: 329-333.
- [2] Rao Y J. Recent progress in ultra-long distributed fiber-optic sensing[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(7): 074207.  
饶云江. 长距离分布式光纤传感技术研究进展[J]. 物理学报, 2017, 66(7): 074207.
- [3] Shimizu K, Horiguchi T, Koyamada Y, *et al.* Coherent self-heterodyne detection of spontaneously Brillouin-scattered light waves in a single-mode fiber [J]. Optics Letters, 1993, 18(3): 185-187.
- [4] Shang Q F, Hu Y T, Liu W. Feature extraction of Brillouin scattering spectrum based on cross-correlation convolution and high-order centroid calculation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(11): 1106011.  
尚秋峰, 胡雨婷, 刘薇. 基于互相关卷积与高阶矩质心计算的布里渊散射谱特征提取[J]. 中国激光, 2017, 44(11): 1106011.
- [5] Maughan S M, Kee H H, Newson T P. 57-km single-ended spontaneous Brillouin-based distributed fiber temperature sensor using microwave coherent detection[J]. Optics Letters, 2001, 26(6): 331-333.
- [6] Wang J J, Li Y Q. Review of methods for improving performance of Brillouin optical time-domain analysis system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(11): 110003.  
王健健, 李永倩. 布里渊光时域分析系统性能提高方法综述[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(11): 110003.
- [7] Horiguchi T, Shimizu K, Kurashima T, *et al.* Development of a distributed sensing technique using Brillouin scattering [J]. Journal of Lightwave Technology, 1995, 13(7): 1296-1302.
- [8] Alahbabi M, Cho Y T, Newson T P. Comparison of the methods for discriminating temperature and strain in spontaneous Brillouin-based distributed sensors [J]. Optics Letters, 2004, 29(1): 26-28.
- [9] Alahbabi M N, Cho Y T, Newson T P, *et al.* Influence of modulation instability on distributed optical fiber sensors based on spontaneous Brillouin scattering [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2004, 21(6): 1156-1160.
- [10] Alahbabi M N, Cho Y T, Newson T P. 100 km distributed temperature sensor based on coherent detection of spontaneous Brillouin backscatter [J]. Measurement Science and Technology, 2004, 15(8): 1544-1547.
- [11] Chang T Y, Kosciwa 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.
- [12] Shen Y C, Song M P, Zhang X M, *et al.* Brillouin scattering in long optical fiber [J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(8): 931-934.  
沈一春, 宋牟平, 章献民, 等. 长距离光纤布里渊散射研究[J]. 光子学报, 2004, 33(8): 931-934.
- [14] Tiwari U, Thyagarajan K, Shenoy M R. Simulation and experimental characterization of Raman/EDFA hybrid amplifier with enhanced performance [J]. Optics Communications, 2009, 282(8): 1563-1566.
- [15] Cho Y T, Newson T P. Brillouin-based distributed fibre temperature sensor at 1.53  $\mu\text{m}$  using Raman amplification [C] // 2002 15th Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest, May 10-10, 2002, Portland, OR, USA. New York: IEEE, 2002: 305-308.
- [16] Cho Y T, Alahbabi M, Gunning M J, *et al.* 50-km single-ended spontaneous-Brillouin-based distributed-temperature sensor exploiting pulsed Raman amplification [J]. Optics Letters, 2003, 28(18): 1651-1653.
- [17] Cho Y T, Alahbabi M N, Gunning M J, *et al.* Enhanced performance of long range Brillouin intensity based temperature sensors using remote Raman amplification [J]. Measurement Science and

- Technology, 2004, 15(8): 1548-1552.
- [18] 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.
- [19] Lalam N, Ng W P, Dai X, *et al.* Sensing range improvement of Brillouin optical time domain reflectometry (BOTDR) using inline erbium-doped fibre amplifier[C]//2017 IEEE SENSORS, October 29-November 1, 2017, Glasgow, UK. New York: IEEE, 2017: 8233878.
- [20] 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.
- [21] Soller B J, Gifford D K, Wolfe M S, *et al.* High resolution optical frequency domain reflectometry for characterization of components and assemblies [J]. Optics Express, 2005, 13(2): 666-674.
- [22] Liang H. Research of Brillouin distributed optical fiber sensor based on coded pulses [D]. Nanjing: Nanjing University, 2011.  
梁浩. 基于序列编码探测脉冲的布里渊光纤传感器的研究[D]. 南京: 南京大学, 2011.
- [23] Kurashima T, Horiguchi T, Ohno H, *et al.* Strain and temperature characteristics of Brillouin spectra in optical fibers for distributed sensing techniques[C]//24th European Conference on Optical Communication, September 20-24, 1998, Madrid, Spain. New York: IEEE, 1998, 1: 149-150.
- [24] Agrawal G. Nonlinear fiber optics[M]. New York: Academic Press, 2005.
- [25] Li W, Liu W M, Zhou L M, *et al.* Separation of Brillouin stokes scattering and anti-stokes scattering based on orthogonal coherent receiving [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(7): 0706003.  
李威, 刘伟民, 周黎明, 等. 基于正交相干接收的布里渊斯托克斯与反斯托克斯散射光分离技术[J]. 中国激光, 2018, 45(7): 0706003.