

瑞利布里渊光时域分析系统传感性能的提升方法

李永倩, 张立欣*, 李晓娟, 杨润润

华北电力大学电子与通信工程系, 河北 保定 071003

摘要 将多波长激光光源技术引入瑞利布里渊光时域分析系统, 其中抑制载波的微波调制多波长脉冲基底 1 阶边带会在传感光纤中产生多波长背向瑞利散射; 将该散射光作为探测光与多波长传感脉冲发生受激布里渊散射 (SBS) 作用, 可有效地提高光纤 SBS 阈值和 SBS 作用效率, 进而提高系统信噪比和布里渊频移的测量精度。分析了相位调制器产生多波长激光光源的原理以及利用电光强度调制器产生作为探测光的多波长斯托克斯和反斯托克斯激励光的原理, 建模分析了多波长瑞利布里渊光时域分析系统原理, 给出了系统信噪比与波长数关系的表达式; 搭建了单波长和三波长光纤 SBS 阈值测量系统及瑞利布里渊光时域分析系统, 测量了光纤的 SBS 阈值和系统性能。实验结果表明, 当单波长与三波长瑞利布里渊光时域分析系统的传感脉冲宽度为 100 ns, 峰值功率为 100 mW, 单个波长的脉冲基底功率约为 1.3 mW, 传感光纤长度为 2.4 km 时, 三波长较单波长系统的光纤 SBS 阈值和信噪比分别提高了 3 倍和 2.83 倍, 在 2 km 光纤内布里渊频移波动由 33.4 MHz 降至 15.6 MHz。

关键词 光纤光学; 布里渊光时域分析; 信噪比; 单端结构; 瑞利散射; 受激布里渊散射阈值

中图分类号 TN247 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0106001

Performance Improvement Method of Rayleigh Brillouin Optical Time Domain Analysis System

Li Yongqian, Zhang Lixin, Li Xiaojuan, Yang Runrun

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

Abstract The technique of multi-wavelength laser source is introduced into Rayleigh Brillouin optical time domain analysis system, in which multi-wavelength Rayleigh back-scattering generated by the 1st-order side-band of suppressed carrier microwave-modulated multi-wavelength pulse base is used as probe light to interact with the multi-wavelength sensing pulse through stimulated Brillouin scattering (SBS). The interaction can effectively improve the fiber SBS threshold, SBS interaction efficiency, and measurement precision of signal-to-noise ratio and Brillouin frequency shift. The generation principle of the multi-wavelength laser source by phase modulator and the exciting source of multi-wavelength Stokes light and anti-Stokes light used as probe light in the system by electro-optic intensity modulator is analyzed. The multi-wavelength Rayleigh Brillouin optical time domain analysis system is characterized by modeling analysis, in which the relationship between the signal-to-noise ratio and the wavelength number is achieved. Then a fiber SBS threshold measurement system and a Rayleigh Brillouin optical time domain analysis system using single-wavelength and three-wavelength laser sources are designed and the fiber SBS threshold and the system performance are tested. Experimental results show that when the fiber length is 2.4 km, the sensing pulse is with a width of 100 ns and a power of 100 mW, and the pulse base is with a power about 1.3 mW for each wavelength component in the single-wavelength and the three-wavelength systems, the fiber SBS threshold and signal-to-noise ratio in three-wavelength sensing system are approximately to be as high as 3 times and 2.83 times than that in single-wavelength sensing system, respectively. And within 2 km fiber length, the Brillouin frequency shift fluctuation decreases from 33.4 MHz in single-wavelength sensing system to 15.6 MHz in three-wavelength sensing system.

收稿日期: 2016-06-20; **收到修改稿日期:** 2016-08-22

基金项目: 河北省自然科学基金(F2014502098)、国家自然科学基金(61377088)、中央高校基本科研业务费专项基金(2016XS104)

作者简介: 李永倩(1958—), 男, 博士, 教授, 主要从事光通信与光传感技术方面的研究。E-mail: liyq@ncepu.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: zhanglxmail@126.com

Key words fiber optics; Brillouin optical time domain analysis; signal-to-noise ratio; single-end structure; Rayleigh scattering; stimulated Brillouin scattering threshold

OCIS codes 060.2370; 290.5900; 290.5870

1 引言

基于布里渊光时域分析(BOTDA)的分布式光纤传感技术具有接收信号强、测量精度高、定位准确和传感距离长等优点^[1-2],被广泛应用于电力线缆、设备、油气管道、建筑及水利等大型工程结构的健康诊断、故障监测及定位等领域。其中,基于光纤瑞利散射的 BOTDA 系统^[3]具有使用单光源、单端工作、非破坏性测量等独特优点,在上述领域的在线监测中具有很好的应用潜力。

1996年,Nikles等^[4]将光纤末端的菲涅耳反射作为探测光与抽运光脉冲相互作用产生受激布里渊散射(SBS),实现了单端结构的分布式温度和应变测量,从而开启了利用单端结构 BOTDA 技术实现分布式温度/应变传感的研究。2009年,Cui等^[5]同样利用光纤末端菲涅耳反射的微波调制脉冲基底光作为探测光实现了单端结构的分布式温度/应变测量;2011年,Cui等^[3]又提出瑞利 BOTDA 温度传感系统,利用微波调制脉冲基底在传感光纤中产生的瑞利散射作为探测光与抽运光发生 SBS 作用,实现了 3 m 空间分辨率、1 °C 温度精度的测量。2012年,本课题组为了解决空间分辨率和测量精度之间的矛盾,提出基于预激发声波的脉冲预抽运瑞利 BOTDA 温度/应变测量方法,通过将脉冲预抽运技术引入瑞利 BOTDA 系统,不仅可使空间分辨率和测量精度同时得到提高,还可大大减小非本地效应对系统性能的影响^[6]。2013年,Zhang等^[7]提出将光纤末端反射的 BOTDA 和相干光时域反射相结合的单端入射外差检测技术,在 24 km 光纤上实现了 5 m 空间分辨率、1 °C 温度分辨率、12 dB 动态范围的测量。2014年,王菊等^[8]利用置于光纤末端的布拉格光栅的反射光作为探测光实现了基于布里渊损耗的分布式测量。

在上述单端结构的 BOTDA 系统中,瑞利 BOTDA 系统是一种非破坏性单端结构的传感系统,在传感光纤发生断裂时依旧能够进行检测。但是由于作为探测光的瑞利散射光功率比入射光功率低 3~5 个数量级,因此相对于双端 BOTDA 系统,瑞利 BOTDA 系统的探测光功率较小,导致 SBS 作用较小,因而其存在信号小、噪声大的问题。

将多波长激光光源技术引入到瑞利 BOTDA 传感系统,提出一种提高瑞利 BOTDA 系统传感性能的方法。分析了多波长激光光源及斯托克斯和反斯托克斯激励光的产生原理,在对多波长瑞利 BOTDA 系统建模的基础上,分析了多波长激光光源对瑞利 BOTDA 系统性能的改善情况;设计并搭建了多波长光纤 SBS 阈值测量系统及多波长瑞利 BOTDA 传感系统,对单波长及三波长传感系统的光纤 SBS 阈值、单波长及三波长瑞利 BOTDA 系统的布里渊功率、信噪比(SNR, R_{SN})、布里渊中心频移波动进行了对比。

2 理论分析

2.1 多波长激光光源的产生

为了获得系统所需的多波长抽运激光光源,可以利用相位调制器(PM)或者电光强度调制器(EOIM),通过射频信号对单纵模激光器的输出光进行相位调制或强度调制来实现。与 EOIM 相比,PM 无需直流偏置,在相同调制电压下所能达到的调制深度大,有利于获得幅度平坦的宽谱频率梳,因而常被用来产生多波长激光光源。

根据 PM 的工作原理,设在 PM 射频端施加的调制信号为 $u(t) = U \cos(\omega_m t)$, U 为调制信号幅值, ω_m 为调制信号频率,则 PM 输出光信号可以表示为^[9]

$$E_{\theta m}(t) = E_0 \cos[\omega_0 t + \theta(t)], \quad (1)$$

式中 E_0 为 PM 输入光的电场强度, ω_0 为 PM 输入光的频率, $\theta(t) = U \sin(\omega_m t)$ 为调制信号产生的输入光的相位变化。

将(1)式按第一类贝塞尔(Bessel)函数展开可得

$$E_{\theta m}(t) = E_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(C) \cos(\omega_0 t + n\omega_m t), \quad (2)$$

式中 $C = \pi U / V_{\pi}$ 为 PM 的调制深度, V_{π} 为 PM 的半波电压, $J_n(C)$ 为第一类 n 阶 Bessel 函数。

由(2)式可知,改变调制信号幅值 U 可以改变不同频率分量的大小,改变调制信号频率 ω_m 可以改变各频率分量的间隔,适当选择调制深度 C 可以获得幅值平坦的多波长激光光源。

2.2 斯托克斯和反斯托克斯激励光的产生

在瑞利 BOTDA 系统中,与抽运光脉冲产生 SBS 作用的探测光是经微波强度调制的脉冲基底 1 阶边带产生的瑞利散射光,其中微波调制信号的频率在光纤布里渊频移附近可调。为了获得系统所需的探测光的激励信号,可以利用基于马赫-曾德尔干涉仪的 EOIM 对输入光波进行抑制载波的双边带强度调制来实现,其中上边带用于激励作为反斯托克斯光的瑞利散射,下边带用于激励作为斯托克斯光的瑞利散射。设施加在 EOIM 直流偏置端的直流电压为 V_{DC} ,施加在 EOIM 射频端的微波调制信号的幅值和频率分别为 U' 和 ω'_m ,则 EOIM 输出信号光的电场强度可以表示为^[10]

$$E_{IM}(t) = E'_0 \cos(\omega'_0 t) \cos[C' \cos(\omega'_m t) + \phi_{DC}], \quad (3)$$

式中 E'_0 为 EOIM 输入光的电场强度, ω'_0 为 EOIM 输入光的频率, $C' = \pi U' / (2V'_{\pi})$ 为 EOIM 的调制深度, U' 为微波调制信号幅值, ω'_m 为微波调制信号频率, $\phi_{DC} = \pi V_{DC} / (2V'_{\pi})$ 是由直流偏置电压导致的相位, V'_{π} 为 EOIM 的半波电压。

将(3)式按第一类 Bessel 函数展开可得

$$E_{IM}(t) = E'_0 \cos \omega'_0 t \left\{ [J_0(C') + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(C') \cos(2n\omega'_m t)] \cos \phi_{DC} - \left[2 \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n J_{2n+1}(C') \cos(2n+1)\omega'_m t \right] \sin \phi_{DC} \right\}. \quad (4)$$

由(4)式可知,当直流偏置电压 $V_{DC} = V'_{\pi}$ 时,可实现抑制载波的双边带调制;改变微波调制信号幅值 U' 可以改变不同频率分量的大小;当将抑制载波的双边带光信号作为脉冲基底注入光纤时,上边带和下边带产生的瑞利散射光都作为探测光与抽运光脉冲发生 SBS 作用,因而可有效提高 SBS 作用效率,增加探测光强度。

2.3 多波长瑞利 BOTDA 系统建模

图 1 为多波长瑞利 BOTDA 系统原理示意图,微波调制多波长脉冲基底光和多波长传感脉冲光依次进入传感光纤,其中微波调制多波长脉冲基底光的 1 阶边带产生的多波长背向瑞利散射光作为探测光,未经微波调制的多波长脉冲光作为抽运光,两者在传感光纤中发生 SBS 作用。其中 I_p^0 为多波长脉冲抽运光在传感光纤 $z=0$ 处的光强, I_b^0 为微波调制多波长脉冲基底 1 阶边带在传感光纤 $z=0$ 处的光强, I_R 为微波调制多波长脉冲基底 1 阶边带在传感光纤中产生的多波长背向瑞利散射光的光强。

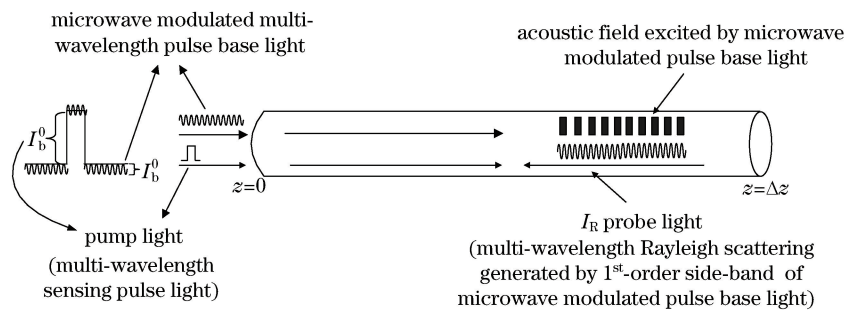


图 1 多波长瑞利 BOTDA 系统原理示意图

Fig. 1 Schematic of multi-wavelength Rayleigh BOTDA system

在多波长瑞利 BOTDA 直接检测系统中,其能量转移示意图如图 2 所示,反斯托克斯光中的 N 个波长的光分别向与其对应的频率相差布里渊频移的抽运光转移能量,抽运光再向与其对应的频率相差布里渊频移的斯托克斯光转移能量,最后通过检测 N 个波长的斯托克斯光即可获得多波长布里渊增益谱,图中 ν_i 为第 i 个波长对应的频率, ν_B 为布里渊频移。

多波长传感脉冲光和微波调制多波长脉冲基底 1 阶边带产生的多波长瑞利散射光之间的 SBS 作用可以由稳态耦合波方程组描述为^[11]

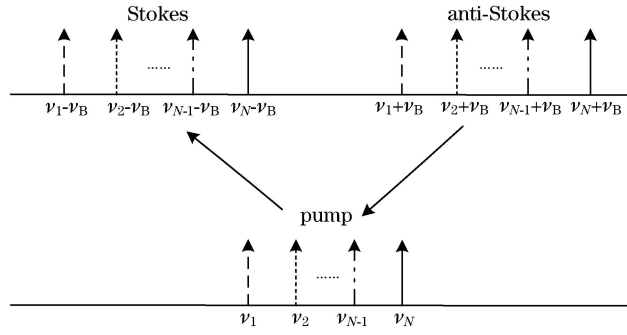


图 2 多波长瑞利 BOTDA 系统能量转移示意图

Fig. 2 Schematic of energy transfer in multi-wavelength Rayleigh BOTDA system

$$d \sum_{m=1}^N I_{pm} / dz = -g \sum_{m=1}^N I_{Rm} \sum_{m=1}^N I_{pm} - \alpha \sum_{m=1}^N I_{pm}, \quad (5)$$

$$d \sum_{m=1}^N I_{Rm} / dz = -g \sum_{m=1}^N I_{Rm} \sum_{m=1}^N I_{pm} + \alpha \sum_{m=1}^N I_{Rm}, \quad (6)$$

式中 I_{pm} 为第 m 个波长的传感脉冲光强, I_{Rm} 为经微波调制的第 m 个波长的脉冲基底 1 阶边带产生的瑞利散射光的光强, α 为光纤衰减系数, g 为布里渊增益系数。

求解(5)式和(6)式可得传感脉冲光强为^[12]

$$\sum_{m=1}^N I_{pm}(z) = I_p^0 \exp(-\alpha z) G(z, \nu), \quad (7)$$

式中

$$G(z, \nu) = \exp \left[\int_0^z -g(z', \nu) \sum_{m=1}^N I_{Rm} dz' \right]. \quad (8)$$

设传感光纤长度为 L , 则微波调制多波长脉冲基底 1 阶边带产生的在光纤上某点 z 处的瑞利散射光强是在 $[z, L]$ 范围内各点处产生的瑞利散射光强的叠加, 可以表示为^[11]

$$\sum_{m=1}^N I_{Rm}(z) = \frac{\alpha_s S}{2\alpha} I_b^0 \{ \exp(-\alpha z) - \exp[-\alpha(2L - z)] \}, \quad (9)$$

式中 α_s 为瑞利散射系数, S 为背向瑞利散射光捕获系数。将(9)式代入(8)式可得

$$G(z, \nu) = \exp \left\{ \int_0^z \frac{-g(z', \nu) \alpha_s S I_b^0}{2\alpha} \cdot \{ \exp(-\alpha z') - \exp[-\alpha(2L - z')] \} dz' \right\}. \quad (10)$$

在瑞利 BOTDA 传感系统中, 传感光纤中发生的 SBS 作用会引发瑞利散射光功率的波动, 因此在传感光纤始端 $z=0$ 处检测到的 t 时刻时的散射功率为^[12]

$$\sum_{m=1}^N P_{Rm}(t, \nu) \approx \frac{\alpha_s S A_{\text{eff}}}{2\alpha} I_b^0 [1 - \exp(-2\alpha L)] \cdot \exp \left[\int_{\Delta z + tv_g/2}^{tv_g/2} -g(z', \nu) \sum_{m=1}^N I_{pm}(z', \nu) dz' \right], \quad (11)$$

式中 A_{eff} 为纤芯的有效面积, v_g 为光在光纤中传播的群速度, Δz 为空间分辨率对应的光纤长度。根据(11)式可得多波长瑞利 BOTDA 直接检测系统光电检测器的输出光电流为

$$i_{\text{multi}}(t) = R \sum_{m=1}^N P_{Rm}, \quad (12)$$

式中 R 为光电检测器的响应度, P_{Rm} 为在传感光纤始端检测到的微波调制脉冲基底 1 阶边带中第 m 个波长的瑞利散射功率。

在多波长瑞利 BOTDA 系统中, 光电检测器检测到的是携带 SBS 信息的 N 个波长的背向瑞利散射信号功率之和 $\sum_{m=1}^N P_{Rm}$, 而在单波长瑞利 BOTDA 系统中光电检测器检测到的是单个波长的背向瑞利散射信号功率 P_R , 因此单波长直接检测系统中光电检测器的输出光电流为

$$i_{\text{single}}(t) = R P_R. \quad (13)$$

根据(12)式和(13)式可知,相对于单波长瑞利 BOTDA 系统,多波长瑞利 BOTDA 系统可有效地提高信号功率、系统信噪比,并延长传感距离。

2.4 系统信噪比

瑞利 BOTDA 传感系统中的噪声主要包含热噪声、散粒噪声、相对强度噪声和相干瑞利噪声,分别由噪声电流均方值 i_T^2 、 i_S^2 、 i_R^2 和 i_C^2 表示。由于探测光功率很小,相对强度噪声可以忽略,因此系统所包含的噪声电流均方值可以表示为

$$i_N^2 = i_T^2 + i_S^2 + i_C^2. \quad (14)$$

单波长瑞利 BOTDA 系统的信噪比可以表示为^[13]

$$R_{SNs} = \frac{P_{os}}{P_{ns}} = \frac{i_{single}^2(t)}{i_N^2} = \frac{R^2 P_R^2}{4kT\Delta\nu'/R_L + 2q(i + i_d)\Delta\nu' + (R^2 P_R^2 \Delta\nu)/[8\pi(\Delta\nu^2 + \Delta f^2)]}, \quad (15)$$

式中 P_{os} 、 P_{ns} 分别为单波长瑞利 BOTDA 系统信号功率和噪声功率, $i_{single}^2(t)$ 为信号电流均方值, k 为玻尔兹曼常数, T 为绝对温度, $\Delta\nu'$ 为光电检测器的带宽, R_L 为负载电阻, q 为电子电荷, $i = \langle i_{single}(t) \rangle$ 为单波长瑞利 BOTDA 系统平均信号光电流, i_d 为光电检测器的暗电流, $\Delta\nu$ 为激光器线宽。

假设各波长分量对应的瑞利散射功率相等,则多波长瑞利 BOTDA 系统的信噪比可以表示为^[14-15]

$$R_{SNm} = \frac{P_{om}}{P_{nm}} = \frac{i_{multi}^2(t)}{i_N'^2} = \frac{R^2 \left(\sum_{m=1}^N P_{Rm} \right)^2}{4kT\Delta\nu'/R_L + 2Nq(i_m + i_d)\Delta\nu' + N[R^2 P_m^2 \Delta\nu]/[8\pi(\Delta\nu^2 + \Delta\nu'^2)]}, \quad (16)$$

式中 P_{om} 、 P_{nm} 分别为多波长瑞利 BOTDA 系统信号功率和噪声功率, $i_{multi}^2(t)$ 为信号电流均方值, $i_m = \langle i_{multi}(t) \rangle / N$ 为多波长瑞利 BOTDA 系统平均信号光电流, $P_m = \sum_{m=1}^N P_{Rm} / N$ 为多波长瑞利 BOTDA 系统的平均散射功率。

在多波长瑞利 BOTDA 系统中,假设各波长间隔远大于布里渊增益谱谱宽, P_R 和 P_{Rm} ($m=1, 2, \dots, N$) 取 100 nW, 则根据(15)、(16)式和表 1 的仿真参数可以得到如图 3 所示的信噪比与波长数的关系曲线。由图 3 可知, R_{SNm} 随波长数的增加而增大, 当波长数为 3 时多波长系统的信噪比较单波长系统的信噪比提高约 4.8 dB, 当波长数为 40 时提高约 16 dB。

表 1 仿真参量

Table 1 Simulation parameters

| Parameter | K / (J/K) | T / K | R_L / Ω | q / C | $\Delta\nu'$ / MHz |
|-----------|------------------------|------------|------------------|-----------------------|--------------------|
| Value | 1.38×10^{-23} | 300 | 50 | 1.6×10^{-19} | 80 |
| Parameter | P_{Rm} / nW | P_R / nW | R / (A/W) | i_d / μ A | $\Delta\nu$ / MHz |
| Value | 100 | 100 | 1 | 2 | 1.86 |

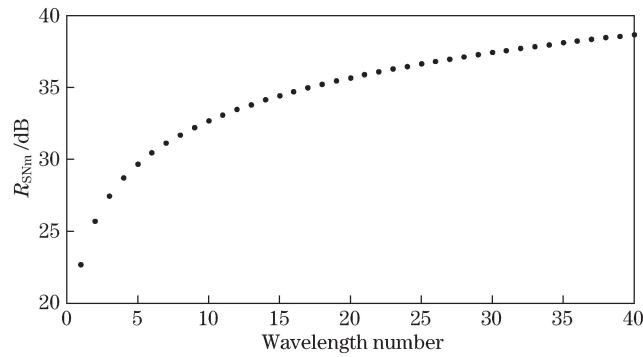


图 3 信噪比与波长数的关系

Fig. 3 R_{SNm} versus wavelength number

3 实验及结果分析

由(2)式和 Bessel 函数与调制深度的关系可知,当 PM 的调制深度 C 为 1.433 时,调相波的 0 阶基带和 1 阶边带功率近似相等,可获得功率近似相等的三个波长的激光光源;当 EOIM 的直流偏置电压为半电压时,可产生抑制载波的斯托克斯和反斯托克斯光的激励光信号。为了验证多波长激光光源对瑞利 BOTDA 系统性能的改善,采用三波长瑞利 BOTDA 传感系统进行测试,并在实验系统中分别采用 PM 和 EOIM 产生的三波长激光光源和斯托克斯、反斯托克斯激励光信号。

3.1 SBS 阈值

低功率的输入光无法提高信号功率,但高功率的输入光会使系统发生单端 SBS 效应,从而使传感距离受限,因此,在保证不发生单端 SBS 效应的前提下尽可能提高入纤功率是增加传感距离的必要条件,而多波长激光光源技术则是提高系统 SBS 阈值、增加传感距离的有效方法。

用于测量光纤 SBS 阈值的实验系统如图 4 所示,图中光源为中心波长 1550.12 nm、线宽 1.86 MHz 的窄带激光器。当光源的输出直接由掺铒光纤放大器(EDFA)放大并由光栅滤波器滤除自发辐射噪声后进入被测光纤(FUT)时,构成单波长光纤 SBS 阈值测量系统;当光源的输出先经过微波信号发生器驱动的 PM 再接入 EDFA 及后续光路时,构成三波长光纤 SBS 阈值测量系统。其中微波信号发生器输出频率为 1 GHz,功率为 20 dBm,此时 PM 输出的 0 阶基带和 1 阶边带功率近似相等。分别用光功率计 1 和 2 测量光纤的输入光功率和背向散射功率,可以得到如图 5 所示的单波长和三波长入射光对应的光纤背向散射功率与输入光功率的关系曲线。

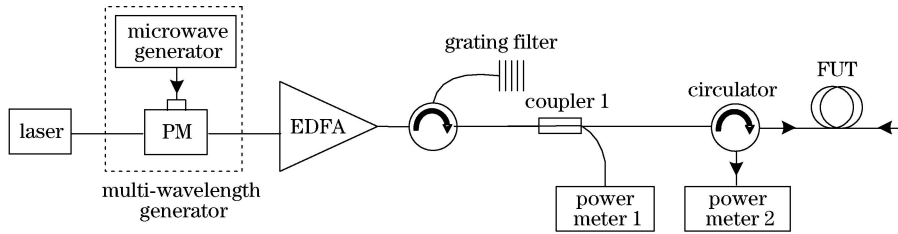


图 4 光纤 SBS 阈值测量实验系统

Fig. 4 Experimental setup for fiber SBS threshold measurement

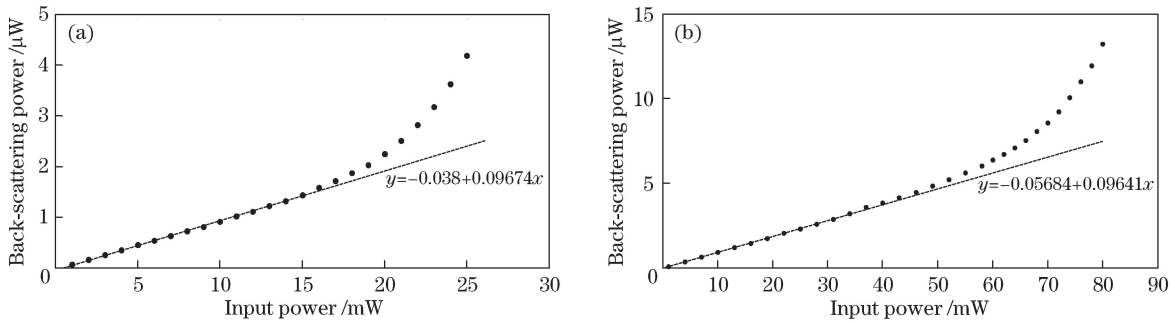


图 5 单波长和三波长入射光对应的背向散射功率与输入光功率的关系。(a) 单波长入射光;(b) 三波长入射光
Fig. 5 Back-scattering power versus input power with single-wavelength incident light and three-wavelength incident light.

(a) Single-wavelength incident light; (b) three-wavelength incident light

根据光纤 SBS 阈值定义,当背向散射功率随入射功率的增加而快速增长时的输入光功率为 SBS 阈值^[16]。由图 5(a)和(b)可以看出,背向散射功率先随输入光功率的增加呈线性缓慢增长,之后转变为非线性快速增长,如果将发生非线性增长时的输入光功率值作为光纤的 SBS 阈值,则根据实验结果可知,单波长入射时光纤的 SBS 阈值约为 16 mW,三波长入射时光纤的 SBS 阈值约为 48 mW。由此可知,在相同实验条件下,三波长入射时光纤的 SBS 阈值约为单波长入射时的 3 倍。

3.2 系统性能

采用图 6 所示的单波长/三波长瑞利 BOTDA 传感实验系统对两种系统的性能进行了测试。

将中心波长为 1550.12 nm、线宽为 1.86 MHz 的激光器光源的输出接入由微波信号发生器 1 驱动的

PM,当微波信号发生器 1 的输出频率为 1 GHz、功率为 20 dBm 时,可以获得由 0 阶基带和 1 阶边带组成的功率近似相等、频率间隔为 1 GHz 的三波长激光光源。PM 的输出经耦合器 1 分成两路,一路经频率在光纤布里渊频移附近可调的微波信号发生器 2 驱动的 EOIM1 进行抑制载波的双边带调制,该双边带信号用作脉冲基底光在光纤中产生频率等于斯托克斯和反斯托克斯光频率的瑞利散射作为系统的多波长探测光;一路经脉冲发生器驱动的 EOIM2 进行脉冲调制,产生脉宽为 100 ns 的光脉冲用作系统的多波长脉冲抽运光;两路光信号经耦合器 2 合成后由掺铒光纤放大器放大,并由中心波长为 1550.151 nm、带宽为 0.25 nm 的光栅滤波器 1 滤除自发辐射噪声,然后经环行器并由扰偏器(PS)扰偏后进入待测光纤。多波长探测光与抽运光在传感光纤中发生 SBS 作用,然后经中心波长为 1550.362 nm、带宽为 0.364 nm 的光栅滤波器 2 滤除载波分量和反斯托克斯分量后进入光电探测器(PD),PD 对携带 SBS 信息的作为斯托克斯分量的多波长瑞利散射光信号进行直接强度检测,再由示波器(OSC)进行数据采集和显示。实验中待测光纤选用长度为 2.4 km 的标准单模通信光纤 G.652,为了通过叠加平均提高系统的信噪比、减小测量时间,选择抽运光脉冲的重复频率为 37 kHz。由于实验中 PD 仅需响应不同波长探测光的功率变化情况,而抽运光脉冲宽度为 100 ns,故选用工作频带为 250 Hz~80 MHz 的高响应度 PD 进行探测光的光电转换。由于抽运光脉冲的重复频率为 37 kHz,远大于 PD 的下截止频率,故 PD 的工作频带可以满足沿光纤布里渊散射谱的测量要求。

单波长瑞利 BOTDA 传感系统性能的测试可通过关闭图 6 所示系统的微波信号发生器 1 来实现,系统的抽运光脉冲峰值功率为 100 mW,脉冲基底功率为 1.27 mW;三波长瑞利 BOTDA 传感系统中每个波长的抽运光脉冲峰值功率为 100 mW,脉冲基底功率为 1.28 mW。

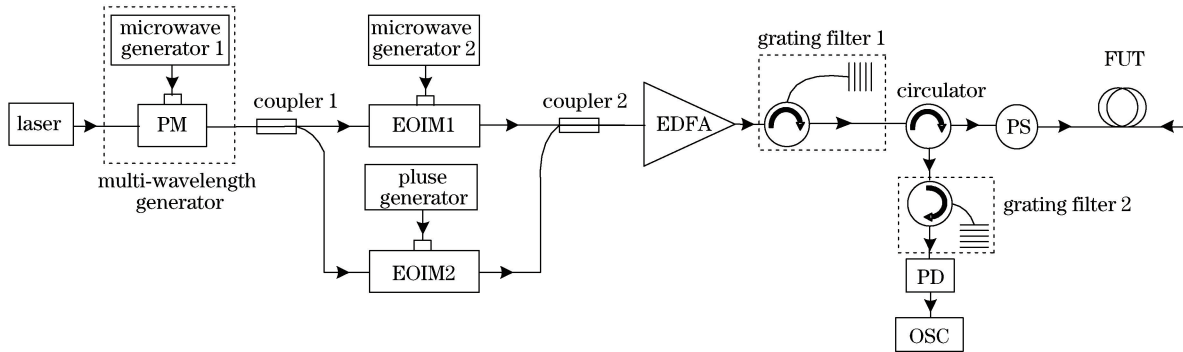


图 6 单波长/三波长瑞利 BOTDA 传感实验系统

Fig. 6 Experimental setup for single-wavelength/three-wavelength Rayleigh BOTDA sensing system

在 10.81~10.92 GHz 范围内以 5 MHz 为步长改变微波信号发生器 2 的频率,以便对光纤不同位置处的布里渊散射谱进行扫描测量。每次测量对探测光的时域波形进行 65536 次叠加平均,可以得到如图 7 所示的单波长和三波长瑞利 BOTDA 系统在布里渊中心频移处的布里渊散射功率分布曲线。在离光纤末端 100 m 处,对 100 m 光纤上的布里渊散射功率进行线性拟合,并计算数据的均方根误差,得到三波长瑞利 BOTDA 系统的布里渊功率较单波长瑞利 BOTDA 系统提升 3 dB,均方根误差减小约 1.52 dB,表明三波长瑞利 BOTDA 系统的信噪比较单波长瑞利 BOTDA 系统信噪比^[17]提高了 4.52 dB,约为单波长系统的 2.83 倍。这与由(15)、(16)式计算得到的三波长瑞利 BOTDA 系统信噪比较单波长的信噪比提高约 3 倍的理论结果基本一致。

由第 2.3 和 2.4 节中的理论分析可知,瑞利 BOTDA 系统的探测光为微波调制脉冲基底 1 阶边带的瑞利散射光,因此在传感光纤末端的瑞利散射功率和系统信噪比很低,根据布里渊频移测量精度 $\delta\nu_B$ 与布里渊谱宽 $\Delta\nu_B$ 和系统信噪比 R_{SN} 的关系式: $\delta\nu_B = \Delta\nu_B / [\sqrt{2} (R_{SN})^{1/4}]$ 可知,在传感光纤末端的布里渊频移测量精度会迅速降低。通过对光纤不同位置的布里渊散射谱的测量数据进行洛伦兹拟合,并将布里渊散射谱最大值对应的微波信号发生器 2 的输出频率作为布里渊频移,可以得到如图 8 所示的单波长和三波长瑞利 BOTDA 系统布里渊频移分布曲线。由图 8(a)和(c)可知,单波长瑞利 BOTDA 系统在整条 2.4 km 的待测光纤上的布里渊频移波动为 103 MHz,而在 2 km 光纤内的布里渊频移波动仅为 33.4 MHz。整条光纤上的布里渊频移波动远大于 2 km 光纤内的布里渊频移波动的原因主要为:进入传感光纤的传感脉冲及脉冲基

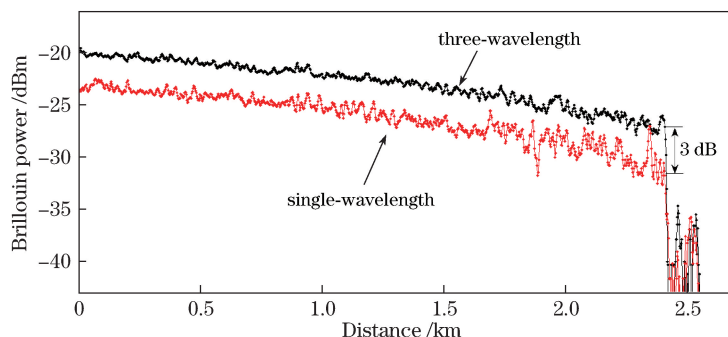


图 7 单波长和三波长瑞利 BOTDA 系统中布里渊功率分布

Fig. 7 Brillouin power distribution in single-wavelength and three-wavelength Rayleigh BOTDA systems

底功率较小,系统信噪比低,无法实现长距离的传感。为了提高系统信噪比,需增大传感脉冲及脉冲基底功率,而高功率的输入光会导致光纤单端 SBS 效应的发生。由图 8(b)和(d)可知,虽然在多波长瑞利 BOTDA 系统中传感光纤末端也有较大的布里渊频移波动,但这种波动远小于单波长瑞利 BOTDA 系统,多波长瑞利 BOTDA 系统在整条光纤上的布里渊频移波动为 19.9 MHz,而在 2 km 光纤内的布里渊频移波动为 15.6 MHz。由此可见,多波长激光光源技术可有效提高光纤 SBS 阈值、系统信噪比和布里渊频移测量精度。

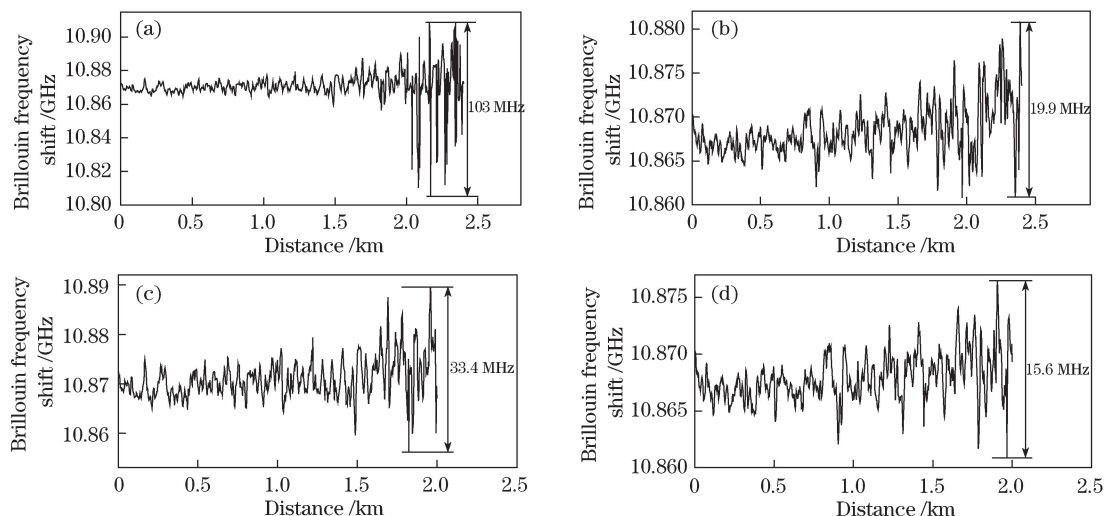


图 8 单波长和三波长瑞利 BOTDA 系统中布里渊频移分布。(a) 单波长系统,2.4 km 光纤;
(b) 三波长系统,2.4 km 光纤;(c) 单波长系统,2 km 光纤内;(d) 三波长系统,2 km 光纤内

Fig. 8 Distribution of Brillouin frequency shift in single-wavelength and three-wavelength Rayleigh BOTDA systems.

(a) Single-wavelength system, 2.4 km fiber length; (b) three-wavelength system, 2.4 km fiber length;
(c) single-wavelength system, within 2 km fiber length; (d) three-wavelength system, within 2 km fiber length

4 结 论

瑞利 BOTDA 系统将微波调制脉冲基底 1 阶边带产生的背向瑞利散射光作为探测光,可实现单端结构、非破坏性的分布式测量,但系统存在信号小、噪声大的问题。本文将多波长激光光源技术引入到瑞利 BOTDA 系统,分析了多波长激光光源提高瑞利 BOTDA 系统光纤 SBS 阈值和系统信噪比的原理,设计并搭建了单波长和三波长光纤 SBS 阈值测量系统及瑞利 BOTDA 传感系统,分别对光纤 SBS 阈值测量系统的 SBS 阈值和瑞利 BOTDA 系统的性能进行了测试。结果表明,三波长系统较单波长系统的光纤 SBS 阈值提高了 3 倍;在三波长瑞利 BOTDA 系统中每个波长的抽运光、脉冲基底光功率与单波长瑞利 BOTDA 系统相同的条件下,三波长系统较单波长系统信噪比提高 2.83 倍,在 2 km 光纤长度内布里渊频移波动从单波长系统的 33.4 MHz 降低为 15.6 MHz。该研究结果表明,多波长激光光源技术可有效地提高瑞利 BOTDA 系统的性能,并为实现非破坏性的单端 BOTDA 长距离传感提供了理论和实验依据。

参 考 文 献

- [1] Hu J, Xia L, Yang L, *et al.* Strain-induced vibration and temperature sensing BOTDA system combined frequency sweeping and slope-assisted techniques[J]. *Optics Express*, 2016, 24(12): 13610-13620.
- [2] Cao Shan, He Xiangge, Zhang Min. Vector theory of simultaneous gain and loss stimulated Brillouin scattering and its simulation[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(8): 0808001.
曹 珊, 何向阁, 张 敏. 增益损耗型受激布里渊散射的矢量模型与仿真[J]. *中国激光*, 2015, 42(8): 0808001.
- [3] Cui Q, Pamukcu S, Lin A, *et al.* Distributed temperature sensing system based on Rayleigh scattering BOTDA[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, 11(2): 399-403.
- [4] Nikles M, Thévenaz L, Robert P A. Simple distributed fiber sensor based on Brillouin gain spectrum analysis[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(10): 758-760.
- [5] Cui Q, Pamukcu S, Xiao W, *et al.* Distributed fiber sensor based on modulated pulse base reflection and Brillouin gain spectrum analysis[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(30): 5823-5828.
- [6] 李永倩, 安 琪. 一种脉冲预泵浦瑞利 BOTDA 温度与应变的测量方法: 102998025A[P]. 2013-03-27.
- [7] Zhang X P, Hu J H, Zhang Y X. A hybrid single-end-access BOTDA and COTDR sensing system using heterodyne detection[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(12): 1954-1959.
- [8] Wang Jü, Liu Yin, Zhang Weijuan, *et al.* Study on single-ended distributed optic-fiber sensing system based on Brillouin loss[J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(7): 772-776.
王 菊, 刘 银, 张伟娟, 等. 基于布里渊损耗的单端分布式光纤传感系统研究[J]. *激光与红外*, 2014, 44(7): 772-776.
- [9] Xiang Duanyan, Liu Lanfang, Chen Gang, *et al.* Optical waveguide phase modulation technology for generating multi-wavelength optical source[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, 33(2): 73-75.
向端燕, 刘兰芳, 陈 刚, 等. 光波导位相调制技术产生多波长光源[J]. *光电工程*, 2006, 33(2): 73-75.
- [10] Li Yongqian, 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.
- [11] Wang Hu. Research on the key technology of Rayleigh BOTDA system[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2013.
王 虎. 瑞利 BOTDA 系统关键技术研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2013.
- [12] Minardo A, Bernini R, Zeni L, *et al.* A reconstruction technique for long-range stimulated Brillouin scattering distributed fibre-optic sensors: experimental results[J]. *Measurement Science and Technology*, 2005, 16(4): 900-908.
- [13] Wood T H, Linke R A, Kasper B L, *et al.* Observation of coherent Rayleigh noise in single-source bidirectional optical fiber systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1988, 6(2): 346-352.
- [14] Li C L, Lu Y G, Zhang X P, *et al.* SNR enhancement in Brillouin optical time domain reflectometer using multi-wavelength coherent detection[J]. *Electronics Letters*, 2012, 48(18): 1139-1141.
- [15] De Souza K. Significance of coherent Rayleigh noise in fibre-optic distributed temperature sensing based on spontaneous Brillouin scattering[J]. *Measurement Science and Technology*, 2006, 17(5): 1065-1069.
- [16] Mao X P, Tkach R W, Chraplyvy A R, *et al.* Stimulated Brillouin threshold dependence on fiber type and uniformity [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1992, 4(1): 66-69.
- [17] Luo Yuan, Yan Lianshan, Shao Liyang, *et al.* Golay-differential pulse hybrid coding technology based on Brillouin optical time domain analysis sensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(8): 0806002.
罗 源, 闫连山, 邵理阳, 等. 基于布里渊光时域分析传感系统的格雷-差分脉冲混合编码技术[J]. *光学学报*, 2016, 36(8): 0806002.