

一种新型瑞利 BOTDA 系统的研究

尚秋峰,毛 训,张立欣,刘 薇

(华北电力大学 电子与通信工程系,河北 保定 071003)

摘要: 搭建了一种新型的基于瑞利散射的布里渊光时域分析 (Rayleigh Brillouin optical time domain analysis, RBOTDA) 传感系统。该系统工作在单端,能克服传统 BOTDA 双端接入的缺点;采用两个 EOM 并联的结构产生含有连续基底光的脉冲光,探测光由基底连续光的瑞利散射提供,避免了多种受激布里渊散射(stimulated Brillouin scattering, SBS)作用带来的干扰,信噪比更高,传感距离更长;采用双边带探测方法,有效减少泵浦脉冲的损耗与非本地效应。建模解析了该系统中的 SBS 作用过程,并实验验证了系统的可行性。结果表明,布里渊增益谱完好地贴合洛伦兹曲线,非本地效应得到了有效的抑制;在 2.4km 光纤上,室温 25℃下泵浦脉宽 50ns 时,布里渊频移为 10.867GHz,布里渊线宽约为 40.21 MHz。

关键词: 瑞利布里渊光时域分析; 单端; 受激布里渊散射; 瑞利散射

中图分类号: TP212 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0120001

Research on a novel Rayleigh BOTDA system

Shang Qiufeng, Mao Xun, Zhang Lixin, Liu Wei

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

Abstract: A new type of distributed sensor system based on Rayleigh scattering Brillouin Optical Time Domain Analysis (RBOTDA) was proposed. This system was realized in one end access fiber, which can improve the shortcomings of two end access in conventional BOTDA. Parallel structure with two EOM were used to generate pulsed light with continuous base wave. Probe light was provided by the Rayleigh scattering of the base continuous light. This avoids the interference of a variety of Stimulated Brillouin Scattering (SBS) effect and brings the higher signal to noise ratio and longer sensing distance. The dual sideband probe scheme turns the system to be highly robust against pump pulse depletion and non-local effect. The SBS function mechanism of the system was analyzed and the feasibility of the proposed method was demonstrated experimentally. The results show that the Brillouin gain spectra fit Lorentz Curve perfectly and non-local effect is suppressed effectively. The Brillouin frequency shift is 10.867 GHz and the Brillouin linewidth is about 40.21 MHz with 50 ns pulse width on the 2.4 km optical fiber at the temperature of 25℃.

Key words: Brillouin optical time domain analysis; one end access; stimulated Brillouin scattering; Rayleigh scattering

收稿日期:2016-05-10; 修订日期:2016-06-20

基金项目:河北省自然科学基金(F2014502098);国家自然科学基金(61377088, 51407074)

作者简介:尚秋峰(1968-),女,教授,博士,主要从事光电子与光传感方面的研究。Email: lindashqf@126.com

0 引言

在传统 BOTDA 系统中,需在传感光纤两端分别入射脉冲光和连续光实现传感,近 20 年来,已得到了广泛的应用,但双端入射极大地限制了 BOTDA 的应用场合,如果传感光纤在某处断裂将不能获取传感信号。海底光缆、输电线路和大型钢筋混凝土结构等的温度及应变检测,都使单端入射成为需求。

海底光缆监测通常采用 BOTDR 系统^[1],BOTDR 系统虽然能实现单端测量,但探测到的是自发布里渊散射光,自发布里渊散射的强度极其微弱,检测难度大,从而限制了传感距离。而 BOTDA 传感系统利用的是连续探测光和传感脉冲光之间的受激布里渊散射,接收的是较强的连续探测光,因此降低了检测难度,信噪比整体上高于 BOTDR,其动态范围宽,传感距离也能够得到有效的延伸,可实现高精度长距离的分布式传感。

在传统的单端 BOTDA 系统中,探测光由传感光纤末端的菲涅尔反射^[2]或者脉冲光的瑞利散射提供^[3]。2011 年,Cui Q 提出了一种基于瑞利散射的 BOTDA 温度传感系统^[3],用微波调制脉冲基底产生的一阶边带的瑞利散射光作为探测光,产生比 BOTDR 传感装置强度高很多的信号,有效地降低了系统的偏振敏感性,但由于采用一个 EOM 同时产生连续光与脉冲光,EOM 的漏光作为脉冲基底,基底连续光的功率较小,且系统中存在非本地效应^[4],使得信噪比低,传感距离只有几百米。为了延长传感距离,特别是光纤末端的光信号会大大减少,提高传感器的信噪比成为必要。文中搭建了一种新型的 RBOTDA 系统,采用两个 EOM 并联的结构产生含基底连续光的脉冲光,探测光由基底连续光产生的一阶双边带的瑞利散射提供,避免了多种 SBS 作用带来的干扰,改善系统的信噪比,提高系统的传感距离。

1 新型的 RBOTDA 系统

1.1 系统结构

在传统单端 BOTDA 基础上,提出了一种新型的 RBOTDA 系统如图 1(a)所示。

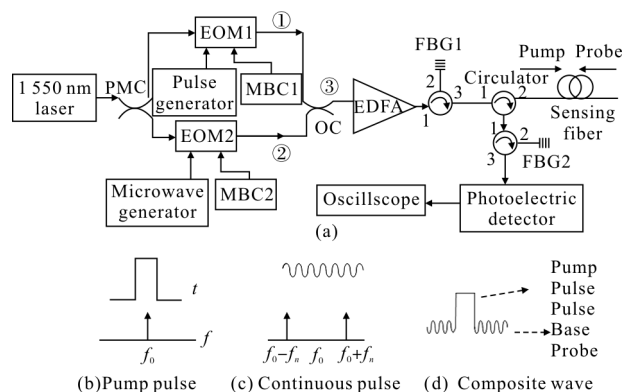


图 1 新型的 RBOTDA 系统

Fig.1 Novel RBOTDA system

激光器输出的光经保偏耦合器 (PMC) 分成两路,上支路①的光信号通过由脉冲信号源和偏压控制器 1(MBC1)驱动的电光调制器 1(EOM1)调制成脉冲光,其输出的泵浦脉冲的时域波形如图 1(b) 所示。调制后的光脉冲进入 50/50 的光耦合器(OC)。

下支路②的光经电光调制器 2(EOM2)调制后得到抑制载波的对称一阶双边带,其输出的连续探测光的时域频域如图 1(c)所示。偏压控制器 2(MBC2)控制 EOM 工作在传输曲线的谷点,一阶边带的频率由微波信号源决定。两调制边带通过光耦合器(OC)与上支路的泵浦脉冲光合成为含有基底连续光的脉冲光,合成后主路③的合成波形如图 1(d)所示,脉冲基底为下支路 EOM2 调制后的一阶连续光,脉冲为上支路 EOM1 调制的。OC 合成后的光信号经掺铒光纤放大器(EDFA)后经光栅 1(FBG1)滤除放大的自发辐射噪声。之后,信号进入光环形器的第一光口,由环形器的第二光口进入传感测试光纤。

在该系统中,探测光信号为脉冲基底连续光的一阶双边带产生的后向瑞利散射光,包括斯托克斯光和反斯托克斯光,即进入传感测试光纤前无需加光栅滤除探测光中的上边带或者下边带,两个边带由环形器同时被注入到传感光纤中与相向传输的传感脉冲基带信号发生 SBS 后,返回入射端携带受激布里渊散射信息的探测光经光栅 2(FBG2)滤除布里渊损耗边带即反斯托克斯边带,增益信号通过光电检测器在示波器上观测信号。

上述系统中,经过 PMC 两路分光后的上支路通过脉冲调制产生 0 阶脉冲光;下支路中,通过偏压控制器 MBC1 将 EOM1 锁定在传输曲线的谷点,光信

号被微波调制为仅含有一阶双边带的连续光^[5],通过耦合器合成为含有一阶脉冲基底的脉冲光。进入传感光纤后,脉冲基底的一阶后向瑞利散射光作为探测光与脉冲光发生 SBS 作用。脉冲光和探测光之间的能量转移过程如图 2 所示,脉冲光和探测光在传感光纤中相遇时,反斯托克斯光通过与脉冲光发生 SBS 作用将能量转移给泵浦脉冲,反斯托克斯光能量 E_{AS} 减小称为损耗型;同时,泵浦脉冲通过与斯托克斯光发生 SBS 作用将能量转移给斯托克斯光,斯托克斯光能量 E_S 增加称为增益型。这一过程完成后,泵浦脉冲光的能量 E_{P0} 几乎保持不变。

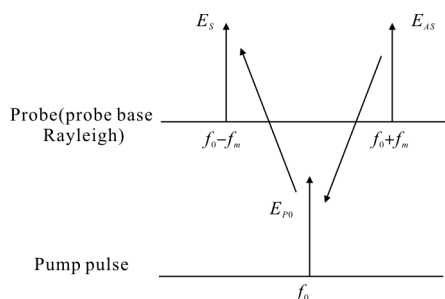


图 2 SBS 能量转移过程

Fig.2 SBS energy transfer process

采用两个 EOM 并联的结构,使得传感系统只存在图 2 所示的两种 SBS 作用,避免了其他 SBS 作用带来的干扰,这两种 SBS 同时作用可有效抑制泵浦脉冲光的损耗,减少非本地效应。

1.2 系统 SBS 建模

该系统中,脉冲基底产生的后向瑞利散射信号作为探测光,传感脉冲作为泵浦光,相向传播的两束光之间 SBS 作用的稳态耦合波方程可表示为^[6]:

$$\begin{cases} \frac{dP_p}{dz} = \pm \frac{g_B}{A_{\text{eff}}} P_S P_p - \alpha P_p \\ \frac{dP_S}{dz} = \pm \frac{g_B}{A_{\text{eff}}} P_S P_p - \alpha P_S \end{cases} \quad (1)$$

式中:“±”为布里渊损耗和布里渊增益两种情况; P_S 和 P_p 分别为脉冲基底在光纤散射点 z 处产生的斯托克斯光功率(或反斯托克斯光功率)和传感脉冲光功率; g_B 为布里渊增益系数; A_{eff} 为光纤有效面积; α 为光纤损耗系数。

采用受激布里渊稳态方程的瞬态分析方法对脉冲基底产生的斯托克斯光与传感脉冲的受激布里渊增益作用过程进行解析,假设光纤入射端的泵浦脉

冲功率为 $P_p(0)$,经 EOM 微波信号调制后的脉冲基底的一阶瑞利散射斯托克斯边带在光纤始端的功率为 $P_{\text{base}}(0)$ 。假设由布里渊作用引起的探测光的光强变化很小可忽略,探测光仅受光纤衰减的影响,泵浦光从 $z=0$ 处入射,根据 OTDR 原理^[7],脉冲基底一阶边带产生的瑞利散射光在光纤位置 z 处的光功率总和为:

$$P_S(z) = \frac{\alpha_S S}{2\alpha} P_{\text{base}}(0) [\exp(-\alpha z) - \exp(-\alpha(2l-z))] \quad (2)$$

式中: α_S 为瑞利散射系数,为 $3.2 \times 10^{-2}/\text{km}$; S 为后向瑞利散射光捕获系数,为 1.5×10^{-3} 。由公式(2)可知,脉冲基底一阶边带产生的后向瑞利散射光功率沿着光纤长度衰减,在光纤始端光功率最大。

由 SBS 的稳态耦合波方程式(1)可解得,脉冲光能量为脉冲光在布里渊过程中的能量累加过程为^[8]:

$$P_p(z, \nu) = P_p(0) \exp(-\alpha z) \exp \left\{ \int_0^z -g_B(z', \nu) P_S(z', \nu) dz' \right\} \quad (3)$$

式中: $g_B(z, \nu)$ 为布里渊增益谱; $g_B(z, \nu) = \gamma g_0 \left[1 + \left(\frac{\nu - \nu_B(z)}{\Delta \nu_B} \right)^2 \right]$; γ 为依赖于脉冲光和连续光偏振态的偏振因子; g_0 为峰值增益系数; ν 为脉冲光与瑞利散射探测光的频差; $\nu_B(z)$ 为依赖于光纤上温度与应变的布里渊频移; $\Delta \nu_B$ 为布里渊增益谱的布里渊半线宽。

$$\text{令 } G(z, \nu) = \exp \left\{ \int_0^z -g(z', \nu) P_S(z', \nu) dz' \right\}$$

则:

$$P_p(z, \nu) = P_p(0) \exp(-\alpha z) G(z, \nu) \quad (4)$$

$G(z, \nu)$ 表示脉冲光在 SBS 作用中经历的被放大或损耗的过程。

RBOTDA 中,泵浦脉冲与连续探测光发生受激布里渊散射作用。假设为布里渊增益结构,即泵浦频率高于探测光频率,在某一频差下,从泵浦光转移给探测光的能量即检测端的瑞利散射光功率变化量为:

$$\Delta P_S(z) = P_S(z) [\exp(g_B P_p(z) \Delta z) - 1] \quad (5)$$

由于 $\Delta P_S(z) \ll P_S(z)$,公式(5)可简化为:

$$\Delta P_S(z) = g_B P_S(z) P_p(z) \Delta z = \frac{g_B \alpha_S S}{2\alpha} P_{\text{base}}(0) P_p(0) \quad (6)$$

式中: g_B 为布里渊增益谱 $g_B(z, \nu)$ 上某一频率 ν 下对应的布里渊增益系数; P_p 为脉冲泵浦光功率; P_S 为斯托克斯光功率; Δz 为脉宽。

对于增益型 RBOTDA 系统而言,泵浦脉冲光能量损耗了,光纤某位置 z 处由 SBS 作用引起的脉冲光的衰减与从脉冲光入射端到该位置 z 之间每个点的布里渊作用相关,因此,本地 z 处的测量受非本地 $0 \sim z$ 之间各点的影响,从而引起系统误差。非本地部分即除 z 点以外的布里渊作用引起的泵浦光损耗使得本地布里渊增益谱变形,最终导致本地布里渊频移改变,这就是非本地效应。由公式(6)可得,非本地效应随着脉冲光的衰减而增加,传感距离增加带来的脉冲衰减和 SBS 作用带来的泵浦损耗都会引起非本地效应。

在该 RBOTDA 系统中,为减少由于泵浦损耗引起的非本地效应,采用双边带探测法。双边带探测光由斯托克斯光和反斯托克斯光组成,EOM 调制后这两束光在入射端有相同的强度,相对泵浦脉冲光有相同的频移量,泵浦光与斯托克斯光作用引起的泵浦衰减能被反斯托克斯光作用引起的泵浦增加而补偿^[9-10],从而减少系统的非本地效应。

2 实验及结果分析

为了验证文中所提系统的可行性及其优势,按照设计的系统方案搭建了如图 1 所示的 RBOTDA 实验系统。实验所用激光器为中心波长为 1550.12 nm,输出功率为 12.55 dBm 的分布反馈式半导体激光器;泵浦脉冲宽度为 100 ns,对应空间分辨率为 10 m,重复频率 38 kHz;传感光纤长度为 2.36 km;温度为室温 25 °C。进入传感光纤前,脉冲峰值为 23.8 dBm,连续光峰值为 6.2 dBm。

连续光经 EOM2 谷点调制后产生抑制载波的对称一阶双边带,用 Thorlabs 的光谱分析控制器、光电检测器与示波器搭建的简易系统观测出光谱如图 3 所示,只含有一阶边带,其中上边带波长为

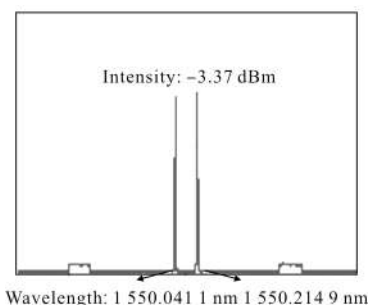


图 3 EOM2 调制后的光谱图

Fig.3 Spectrogram after EOM2 modulation

1550.0411 nm,下边带波长为 1550.2149 nm。

将微波信号源的频率调到 10.865 GHz,输出的探测信号在示波器上平均 65536 次后,得到的增益型布里渊信号如图 4 所示,图中时域信号的分布成线性衰减特性,说明泵浦损耗效应的影响可以忽略。

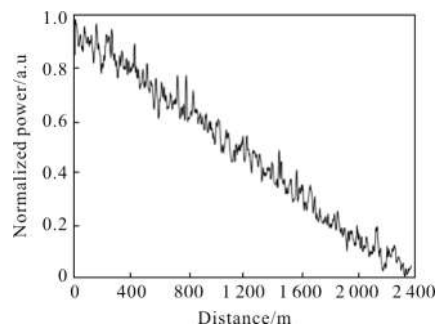


图 4 $f=10.865$ GHz 时探测到的增益型布里渊时域信号

Fig.4 Brillouin gain signal in time domain at $f=10.865$ GHz

布里渊增益谱具有洛伦兹频谱轮廓,逐渐改变加载于 EOM2 上微波信号源的频率,即改变双边带调制信号与泵浦脉冲光之间的频率差值,信号增益会发生相应的变化。通过从 10.8~10.92 GHz 之间每间隔 5 MHz 扫频一次,在测试光纤 0、1、2 km 处通过洛伦兹曲线拟合得到的布里渊增益谱如图 5 所示,由于采用双边带的探测方法,这三个位置的布里渊增益谱都呈现出完好的洛伦兹曲线形,没有出现变形扭曲或者多峰结构,这说明非本地效应在该系统中得到了有效的抑制。

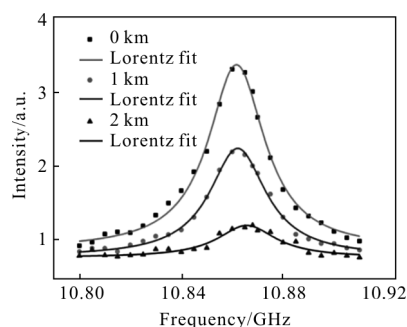


图 5 在光纤 0 km、1 km、2 km 处的布里渊增益频谱图

Fig.5 Brillouin gain spectra at 0 km,1 km and 2 km

探测光与泵浦光之间的频率差可以通过调节微波源频率完成,通过在频率范围为 10.8~10.91 GHz 之间步进 5 MHz 的扫频得出如图 6 所示的泵浦脉宽分别为 100 ns 与 50 ns 时的布里渊频谱图。泵浦脉宽 100 ns 时,洛伦兹拟合得出室温 25 °C 下布里渊频移

为 10.867 GHz, 谱宽为 28.52 MHz; 而泵浦脉宽 50 ns 时, 布里渊频移为 10.868 GHz, 谱宽为 40.21 MHz。因此, 脉冲宽度越宽, 布里渊频谱越窄, 频率分辨率越高。

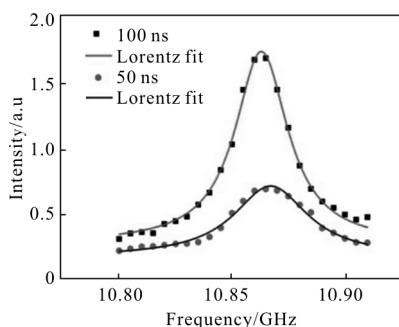


图 6 光纤始端脉宽 100 ns 与 50 ns 时布里渊频谱图

Fig.6 Brillouin spectra with 100 ns and 50 ns pulse width at the beginning of fiber

3 结 论

搭建了一种新型的 RBOTDA 传感系统。采用两个 EOM 并联的结构产生含基底的脉冲光, 探测光由基底连续光的瑞利散射提供。建模解析了该系统中的 SBS 作用过程, 理论和实验都验证了双边带探测方法对减少泵浦损耗与非本地效应的有效性。实验结果表明, 在 2.4 km 光纤上, 泵浦脉宽 100 ns 时, 布里渊线宽约为 28.52 MHz; 脉宽 50 ns 时, 布里渊线宽约为 40.21 MHz。脉宽越宽, 布里渊频谱越窄, 频率分辨率越高。接收到的布里渊信号噪声较小, 布里渊频谱能完好地贴合洛伦兹曲线, 非本地效应得到了有效的抑制, 增加了传感距离。文中的研究结果验证了该瑞利 BOTDA 系统的可行性, 为后续更进一步的传感研究提供依据。

参考文献:

[1] Lv Anqiang, Li Yongqian, Li Jing, et al. Distinguish measurement of temperature and strain of laid sensing optical fibers based on BOTDR [J]. *Infrared and Laser*

Engineering, 2015, 44(10): 2952-2958. (in Chinese)

吕安强, 李永倩, 李静, 等. BOTDR 的已敷设传感光纤温度和应变区分测量方法 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(10): 2952-2958.

[2] Xiao B G, Link H. Signal processing of a Brillouin scattering sensor system using reflector [C]// *Lasers and Electro-Optics - Pacific Rim*, 2007: 1-2.

[3] Cui Q, Pamukcu S, Lin A, et al. Distributed temperature sensing system based on Rayleigh scattering BOTDA [J]. *Sensors Journal IEEE*, 2011, 11(2): 399-403.

[4] Dominguez Lopez A, Angulo Vinuesa X, Lopez Gil A, et al. Non-local effects in dual-probe-sideband Brillouin optical time domain analysis [J]. *Optics Express*, 2015, 23(8): 10341-10352.

[5] 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. (in Chinese)

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.

[6] Bao X, Dhliwayo J, Heron N, et al. Experimental and theoretical studies on a distributed temperature sensor based on Brillouin scattering [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1995, 13(7): 1340-1348.

[7] Aoyama K, Nakagawa K, Itoh T. Optical time domain reflectometry in a single-mode fiber [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1981, 17(6): 862-868.

[8] DominguezLopez A, LopezGil A, MartinLopez S, et al. Signal-to-noise Ratio improvement in BOTDA using balanced detection [J]. *Photonics Technology Letters IEEE*, 2014, 26(4): 338-341.

[9] Thévenaz L, Mafang S F, Lin J. Effect of pulse depletion in a Brillouin optical time-domain analysis system [J]. *Optics Express*, 2013, 21(12): 14017-14035.

[10] Bernini R, Minardo A, Zeni L. Long-range distributed Brillouin fiber sensors by use of an unbalanced double sideband probe [J]. *Optics Express*, 2011, 19(24): 23845-23856.