

光脉冲编码对基于拉曼放大的布里渊光时域分析系统的影响*

张超† 饶云江 贾新鸿 邓坤 苕亮 冉曾令

(电子科技大学通信与信息工程学院, 光纤传感与通信教育部重点实验室, 成都 611731)

(2010年11月16日收到; 2011年1月11日收到修改稿)

报道了光脉冲编码对基于拉曼放大的布里渊光时域分析系统(BOTDA)的影响. 实验表明, 光脉冲编码能够在保证较高空间分辨率的同时减小布里渊频移的不确定性. 实验实现了 49.6 km 传感距离, 在整段传感光纤上温度分辨率 1 °C, 空间分辨率 2.5 m. 本文实验测量并分析了系统的信噪比和光功率分布特性.

关键词: 分布式光纤传感, 受激拉曼散射, 布里渊增益, 布里渊光时域分析系统(BOTDA)

PACS: 42.65Dr, 42.65Es, 42.81.Cn

1. 引言

分布式光纤传感器(DFS)是近年来各国大力发展的新型传感技术, 在石油管道、桥梁等设施的安全监控等方面有重要的应用. 基于布里渊的 DFS 主要有两种. 一种是布里渊光时域反射仪(BOTDR)^[1], 其优点是可以进行单端测量, 但探测信号较弱, 探测距离受限. 第二种是 BOTDA^[2-5], 探测信号较强, 传感距离较远.

近期对基于布里渊的 DFS 研究进展集中于提升系统的空间分辨率和温度分辨率. Li 等人使用差分脉冲对^[2,3]的编码技术, 利用不同脉宽的脉冲光, 在同一布里渊频率下, 将采集的时域波形相减, 从而获得布里渊增益. Rodríguez-Barrios 等人^[4]将拉曼放大^[5]应用于 BOTDA 中, 实现 75 km 传感距离和 3 MHz 的频率不确定, 使用二阶拉曼放大来进一步延伸传感的距离. Soto 等人使用光脉冲编码技术提高传感系统的信噪比, 实现传感距离 50 km, 小于 1 m 的空间分辨率, 2.2 °C 的温度分辨率^[6]. 近来本实验室对基于拉曼放大的 BOTDA 进行理论上的分析和实验验证, 实验实现了传感距离 50 km^[7,8], 温度分辨率为 0.6 °C, 空间分辨率为 50 m. 为提高系统的空间分辨率, 将光脉冲编码应用到基于拉曼放

大的 BOTDA, 实验实现传感距离 49.6 km, 空间分辨率 2.5 m, 温度分辨率 1 °C.

2. 原理

对于 BOTDA 来说, 布里渊频移^[6,7]不确定值 $\delta\nu_B$ 是由信噪比 SNR 决定的.

$$\delta\nu_B = \frac{\Delta\nu_B}{\sqrt{2}(\text{SNR})^{1/4}}, \quad (1)$$

$\Delta\nu_B$ 是布里渊频移的带宽, 设探测波从 ($Z = 0$) 一端进入光纤, 布里渊抽运波从另一端 ($Z = L$) 注入光纤. 待测的探测光的交流分量 ΔP_s ^[5,7] 可以表示为

$$\Delta P_s(t) = P_{s0} \exp(-\alpha L) \times \left[\exp \int_{z-\Delta z}^z g_B P_p(\xi) d\xi - 1 \right], \quad (2)$$

t 为时间, P_{s0} 是注入的探测波的光功率, α 是光纤损耗系数, L 是光纤的长度, $z = L - V_g t/2$ 是空间坐标, V_g 是群速度, $\Delta z = V_g \Delta t/2$ 是空间分辨率. g_B 是布里渊增益系数, P_p 是布里渊的抽运功率^[9].

获得较高的空间分辨率, 须使用较窄的脉宽. 但是由 (1), (2) 式可知, 较低的布里渊抽运能量会使 $\delta\nu_B$ 增大, 影响测量分辨率. 为保证较高的空间分辨率, 减小 $\delta\nu_B$, 必须提高探测波的光功率 P_{s0} 和峰值布里渊功率. 但 P_{s0} 又不能过大, 以免产生

* 国家高技术研究发展计划(批准号:2007AA01Z245)资助的课题.

† E-mail: zhangchao19870408@163.com

非本征效应. 因此, 峰值布里渊功率应小于 20 dBm 才能补偿由调制不稳定性引起的布里渊增益谱展宽.

基于拉曼放大的 BOTDA 呈现较为平坦的增益, 但为避免由于自发辐射引起的信噪比的急剧衰减, 必须将拉曼抽运的功率控制在一定范围内, 布里渊抽运波的峰值功率也不能过高, 以免限制传感距离的进一步延伸. 使用光脉冲编码可以改善系统的信噪比, 但是由于布里渊抽运功率仅在光纤前端较强, 而在光纤后端, 受光纤损耗及布里渊抽运波消耗的影响, 信号强度急剧下降, 严重影响光纤后端的测量分辨率. 在本文中, 将光脉冲编码应用到基于拉曼放大的 BOTDA, 实现较高空间分辨率下

的长距离光纤传感系统, 并获得较为平坦的增益, 并进行了温度性能的测试.

3. 实验系统装置

实验系统图如图 1 所示. 一个可调激光器输出波长 1550 nm, 功率为 10 dBm, 经过光隔离器保护后通过 90:10 的分束器分为两路, 90% 的一路作为抽运光, 经过声光调制器 (消光比 40dB, BRIMROSE-3FP) 进行调制, 由编码脉冲 (经过哈达玛变换) 对声光调制器进行驱动. 编码示意图如图 2 所示, 编码长度为 127 bit, 脉宽为 25 ns, 间隔时间为 75 ns, 相当于 2.5 m 的空间分辨率.

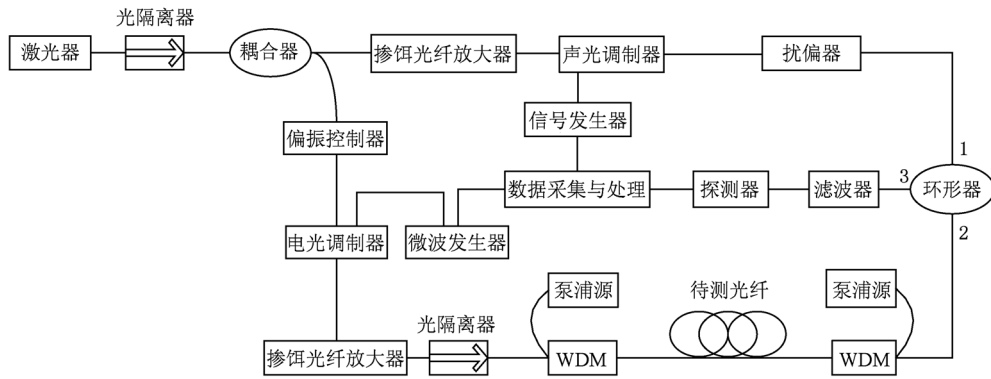


图 1 BOTDA 实验图

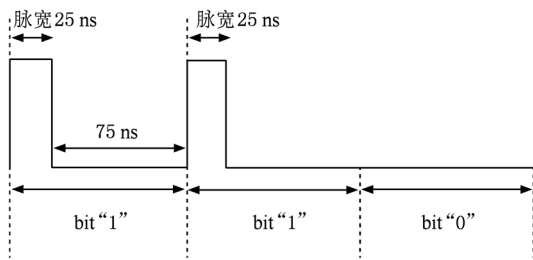


图 2 编码示意图

偏振度小于 5% 的扰偏器 (GA2411) 用来减小 SBS 偏振相关性引起的散射曲线不规则起伏. 10% 的一路作为信号光通过电光调制器, 电光调制器通过微波发生器进行驱动, 产生两个边带, 通过调节电光调制器的偏置电压 (3V) 抑制载波. 两个功率和波长 (1480 nm) 相同的抽运抽运光源 (Keypsys-OI-RFL-1480-20FA), 通过 1480/1550 波分复用器 (WDM) 进入光纤对信号光进行双向拉曼放大. 被放大的信号光经过带宽小于 1 nm 的窄带滤波器后,

由光电探测器进行探测. 通过扫描微波发生器的频率, 得到布里渊增益谱, 运用快速哈达玛变换得到解码的探测信号. 为了避免由于掺铒光纤放大器 (EDFA) 和拉曼混合放大引起的编码脉冲的变形, 将 EDFA 置于 AOM 前, 输入 AOM 的布里渊抽运光保持 ~ 10 dBm, 探测信号光为 ~ -20 dBm 有利于抑制非本征效应.

4. 实验结果分析

传感距离为 49.6 km, 拉曼抽运功率为 490 mW 时, 把传感光纤末端约 300 m 的光纤放置于温度控制箱内, 箱内温度为 50 °C. 图 3 图 4 显示了应用双向拉曼放大和 127 bit 光脉冲编码, 布里渊频率为 10.800 GHz 解码的探测信号.

仅加入双向拉曼放大时, 由于布里渊抽运脉冲较窄, 信号的信噪比明显较低, 可通过光脉冲编码得到改善. 编码的增益通过 $(L + 1) / (2\sqrt{L})$ 计算得

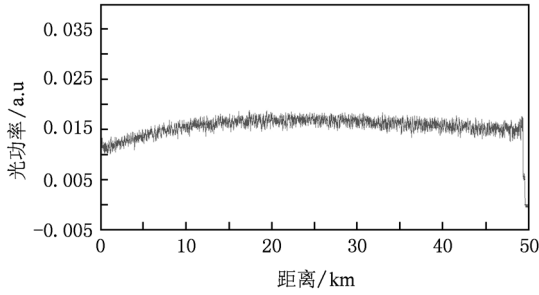


图3 探测信号

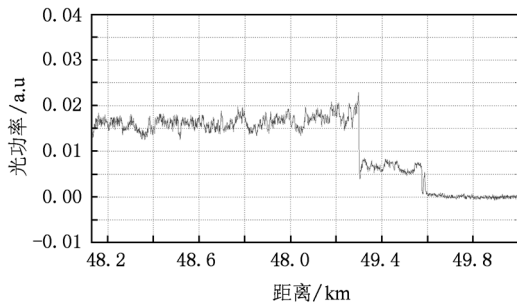


图4 探测信号放大图

到, L 为编码长度^[10-12]. 当 $L = 127$ 时, 编码增益约为 5.7 dB, 和实验较为符合. 编码增益和编码位数的关系如图 5 所示, 对比可知, 由于加入了拉曼放大, 信噪比在整段光纤趋于均衡.

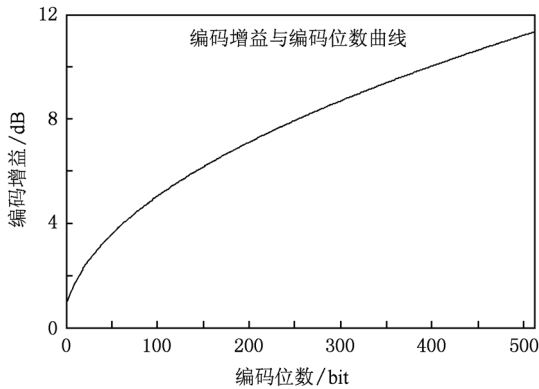


图5 编码增益与编码位数关系图

图 6 为加入和未加入光脉冲编码时得到的洛伦兹拟合曲线. 由图 6 可得, 在 49.306 km 处有明显 25 MHz 的布里渊频移(室温约为 25 °C). 通过计算布里渊频谱的标准差可知, 仅加入拉曼放大时, 频率分辨率为约为 3 MHz, 对应约 3 °C 的温度分辨率. 使用脉冲编码后, 温度分辨率减小为 1 °C, 整段光纤

的信噪比得到明显的提高.

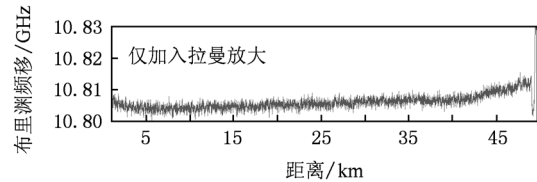
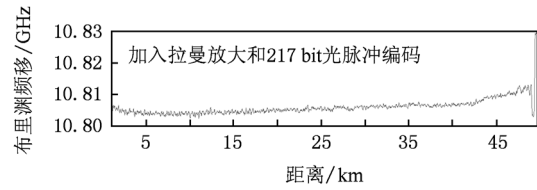


图6 洛伦兹拟合曲线对比图

图 7 为测量点处布里渊频移随温度的变化曲线. 实验所测温度范围为 30—80 °C, 由图 7 可知, 布里渊频移随温度变化呈现线性变化, 线性系数 $R^2 = 0.99982$, 线性度很好, 完全符合实际温度传感的要求.

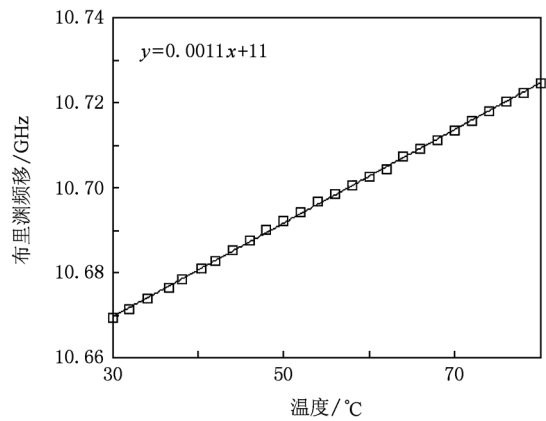


图7 测量点处布里渊频移随温度的变化曲线

图 8 为空间分辨率示意图, 加热段光纤起始段约为 49.3 km, 布里渊频率在 2.5 m 的空间距离内

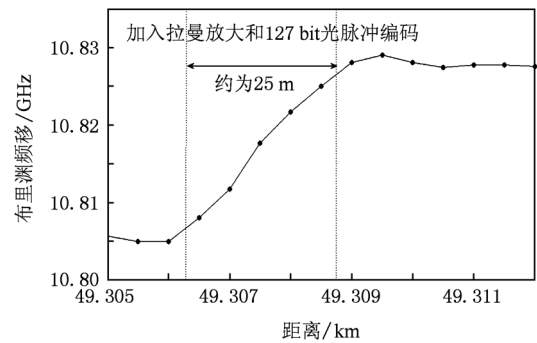


图8 空间分辨率示意图

产生了明显的频移(约为 25 MHz),因此本系统能够实现 2.5 m 的空间分辨率.

5. 结 论

综上所述,将 127 bit 光脉冲编码运用到基于

拉曼放大的 BOTDA 中,能够实现增益的平坦性和高精度的测量分辨率. 实验实现传感距离约 49.6 km,2.5 m 的空间分辨率和 1 °C 的温度分辨率. 进一步的研究工作将侧重于延长光脉冲编码长度提高测量分辨率,通过适当增大拉曼抽运功率可进一步延伸传感距离.

- [1] Alahbabi M N, Cho Y T, Wait P C, Hartog A H, Newson T P 2004 *J. Opt. Soc. Am. B* **21** 1156
- [2] Li W, Bao X Y, Li Y, Chen L 2008 *Opt. Express* **26** 21616
- [3] Alahbabi M N, Cho Y T, Wait P C, Hartog A H, Newson T P 2004 *J. Opt. Soc. Am. B* **21** 1156
- [4] Rodríguez B F, Martín L S, Carrasco S A, Corredera P, Ania-Castañón J D, Thévenaz L, González H M 2010 *J. Lightwave Technol.* **28** 2162
- [5] Yun P, Chi R H, Li Y G, Lv K C 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 4229 (in Chinese) [运 鹏、迟荣华、李乙钢、吕可诚 2004 物理学报 **53** 4229]
- [6] Martin-Lopez S, Alcon-Camas M, Rodriguez F, Corredera P, Ania-Castañón J D, Thévenaz L, Gonzalez-Herraez M 2010 *Opt. Express* **18** 18769
- [7] Zhang C, Rao Y J, Jia X H, Chang L, Ran Z L 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5523 (in Chinese) [张 超、饶云江、贾新鸿、苒 亮、冉曾令 2010 物理学报 **59** 5523]
- [8] Jia X H, Rao Y J, Chang L, Zhang C, Ran Z L 2010 *J. Lightwave Technol.* **28** 1624
- [9] Yang J, Lu Z W, He W M, Lu Y L 2006 *Chin. Phys.* **15** 126
- [10] Soto M A, Bolognini G, Pasquale F D 2010 *Opt. Express* **35** 259
- [11] Soto M A, Bolognini G, Pasquale F D 2010 *Opt. Express* **18** 14878
- [12] Soto M A, Bolognini G, Pasquale F D, Thévenaz L 2010 *Meas. Sci. Technol.* **21** 094024

Influence of optical simple pulse coding on the Brillouin optical time domain analyzer based on bi-directional Raman amplification*

Zhang Chao[†] Rao Yun-Jiang Jia Xin-Hong Deng Kun Chang Liang Ran Zeng-Ling

(Key Laboratory of Optical Fiber Sensing & Communications, Ministry of Education, School of Communication & Information Engineering, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 611731, China)

(Received 16 November 2010; revised manuscript received 1 January 2011)

Abstract

We report the influence of optical simple pulse coding on the Brillouin optical time domain analyzer (BOTDA) based on bi-directional Raman amplification. This method is proposed to reduce the frequency uncertainty in long-distance BOTDA under higher spatial resolution. The experimental characterization of 49.6 km temperature sensing with a measurement accuracy of ~ 1 °C under ~ 2.5 m spatial resolution over the whole length of sensing fiber is demonstrated. The signal-to-noise ratio (SNR) and the optical signal power distribution characteristics of the system are studied experimentally in this paper.

Keywords: distributed optical fiber sensing, stimulated Raman scattering, Brillouin gain, Brillouin optical time domain analyzer (BOTDA)

PACS: 42. 65. Dr, 42. 65. Es, 42. 81. Cn

* Project Supported by the High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 60537040).

[†] E-mail: zhangchao19870408@163.com