

基于双向拉曼放大的布里渊光时域分析系统*

张超^{1)†} 饶云江¹⁾²⁾ 贾新鸿¹⁾ 苒亮¹⁾ 冉曾令¹⁾

1) (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)

2) (重庆大学光电工程学院, 光电技术与系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

(2010 年 1 月 11 日收到; 2010 年 1 月 29 日收到修改稿)

报道了一种基于双向拉曼放大的布里渊光时域分析系统 (Brillouin optical time domain analyzer, BOTDA). 利用双向拉曼抽运对信号光进行拉曼放大以补偿光纤损耗及布里渊抽运波的消耗, 从而使光纤后端的测量分辨率得到改善, 测量分辨率在整段传感光纤趋于一致, 同时避免了调制不稳定性引起的频谱扩展, 克服了传统 BOTDA 存在的信号强度指数下降的弊端, 使传感精度得到进一步提高. 实验实现了 50 km 传感距离, 温度分辨率达 0.6 °C, 空间分辨率为 50 m. 实验测量并分析了基于双向拉曼放大的 BOTDA 信噪比和光功率分布特性.

关键词: 分布式光纤传感, 受激拉曼放大, 布里渊增益, 布里渊光时域分析

PACC: 4265, 4265B, 4281C

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, 由于它可以感知光纤传输路径上应变、温度的连续空间分布和随时间变化的信息^[1,2], 因而在电网、桥梁、水坝、管道、油井等重大结构与设备的安全检测方面得到了非常重要的应用.

基于布里渊散射的分布式光纤传感技术在温度、应变测量上所达到的测量精度、测量范围以及空间分辨率均高于其它分布式传感技术, 因此这种技术在目前得到广泛关注. 一般分为布里渊光时域反射计 (BOTDR) 及布里渊光时域分析仪 (BOTDA) 两种. 前者利用自发布里渊散射现象, 可进行单端测量, 但探测信号较弱, 探测距离受限; 后者则利用受激布里渊散射现象, 探测信号较强, 传感距离较远.

目前已报道的 BOTDA 最远测量距离为 100 km^[3], 空间分辨率小于 20 m, 温度分辨率小于 1 °C^[4], 但是在其光纤后端的测量分辨率得不到保证, 因为传统的 BOTDA 一般采用集中式放大技术, 即布里渊泵浦波进入光纤前用掺饵光纤放大器 (EDFA) 将脉冲功率进行预放大, 此技术具有下列缺点:

1) 由于布里渊抽运波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的消耗, 强度急剧下降, 严重影响光纤后端的测量分辨率^[5].

2) 为避免调制不稳定性引起的频谱扩展^[6], 布里渊抽运波的峰值功率不能过高, 从而使传感距离进一步受到限制.

拉曼放大技术由于能够灵活控制增益带宽和增益波段而引起人们广泛的重视^[7], 并在长距离光纤传输系统中得到广泛应用^[8-12]. 本文提出了一种基于双向拉曼放大的长距离 BOTDA, 即利用双向拉曼泵浦对信号光进行放大, 以提高整段传感光纤上布里渊探测波的分布均匀性, 有效克服传统 BOTDA 存在的问题, 在延伸传感距离的同时, 整段传感光纤的温度/应变分辨率不会有明显的变化.

2. 原 理

BOTDA 利用光纤中的受激布里渊散射 (SBS) 是信号光和探测光通过声波进行的非线性相互作用, 其作用表现为布里渊增益^[13]. 布里渊增益取决于信号光和探测光之间的频率差和光纤的布里渊频移^[14], 当信号光和探测光之间的频率差与布里渊频移一致时, SBS 最强.

* 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

布里渊频移 ν_B 是温度 T 和应变 ε 的函数

$$\nu_B(\varepsilon) = \nu_B(0)[1 + C_\varepsilon \varepsilon], \quad (1)$$

$$\nu_B(T) = \nu_B(T_r)[1 + C_T(T - T_r)]. \quad (2)$$

T_r 为参考温度, C_ε, C_T 分别为应力和温度的比例系数.

从(1),(2)式可以看出, 布里渊频移包含了温度及应变的传感信息, 只要测得频移, 就可以得到沿光纤一维分布的连续温度或应变信息.

3. 实验系统装置

实验系统装置如图 1 所示. 两个功率和波长 (1480 nm) 相同的抽运光源 (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放大.

由可调谐激光器发出的激光先经过隔离器进行隔离保护, 然后经耦合器进行光功率分配. 一束光作为信号光, 经带宽为 10 GHz 的电光调制器移频 (利用微波发生器驱动) 后产生两个边带, 其中的下边带作为布里渊信号光, 再经过掺饵光纤放大器 (EDFA) 和光隔离器输入到光纤的一端, 隔离器的作用是减少信号光对调制器和光源的影响; 另一束光作为抽运光, 经声光调制器 (BRIMROSE-3FP) 后产生矩形脉冲串, 再经 (GA2411), EDFA 输入到光纤的另一端. 扰偏器的作用是减小 SBS 编振相关性引起的散射曲线不规则起伏.

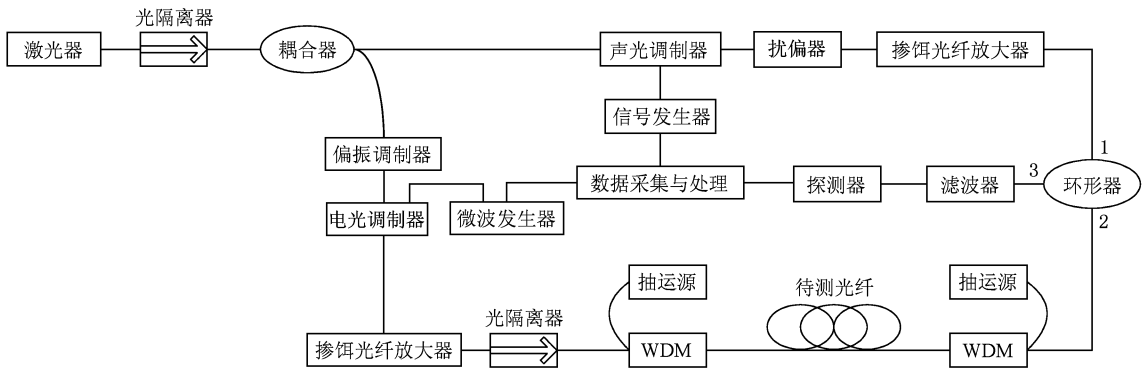


图 1 实验装置图

在图 1 的传感系统中, 信号光和抽运光分别从 50 km 的单模光纤两端入纤, 当两束光的频率差和某处的布里渊频移一致时, 由于 SBS 作用, 高功率的抽运光把一部分能量传给信号光, 信号光在此处被放大. 通过数据处理系统对微波发生器进行控制, 扫描微波的输出频率, 即可探测到布里渊频移-空间-布里渊增益的关系曲线. 最后经洛伦兹曲线拟合后, 找出每一空间点的峰值布里渊频移, 即可得出应变或温度沿光纤的分布.

4. 实验结果及分析

图 2, 图 3 分别为无拉曼放大和加入双向拉曼放大后所探测到的信号.

由图 2, 图 3 可以看出, 加入双向拉曼放大后, 布里渊增益在光纤末端没有降低, 信号整体功率分布均匀, 整段分辨率趋于一致, 信号的信噪比约为 30 dB. 而没有加入拉曼放大, 布里渊增益呈指数衰减趋势. 两者相比, 信噪比提高约 14 dB.

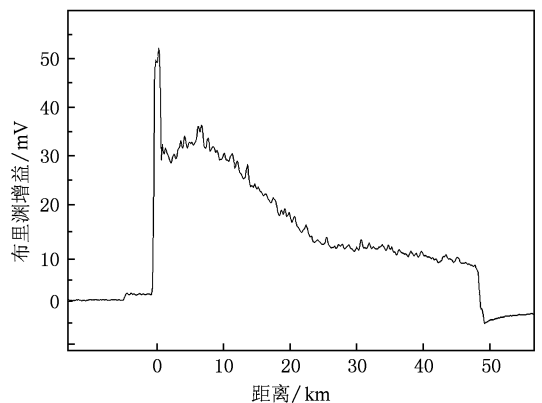


图 2 无拉曼放大

实验中驱动声光调制器的信号占空比为 0.1%, 重复频率 1000 Hz. 当占空比变为 0.05% 时, 信号的信噪比没有明显变小, 因此本系统可达到 50 m 的空间分辨率.

图 4 为频移-时间(空间)-增益的关系曲线. 可以看出, 对微波调制控制进行频率扫描时, 无温度

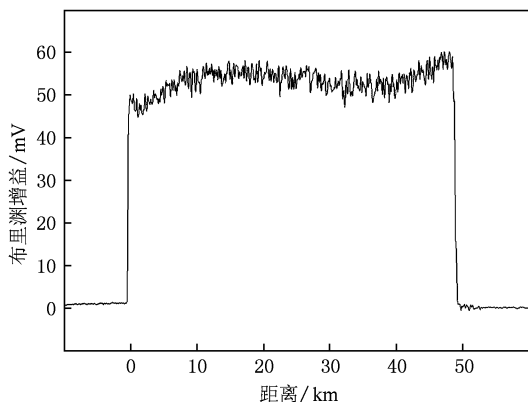


图3 加入拉曼放大

变化的光纤各处布里渊频移峰值基本相等, 测量点处光纤的布里渊频移峰值产生了偏移, 偏移的幅度与此处光纤的温度变化有关. 由图可知, 在 49.8 km 附近的测量点有明显的布里渊频移. 布里渊增益曲线呈现洛伦兹型分布.

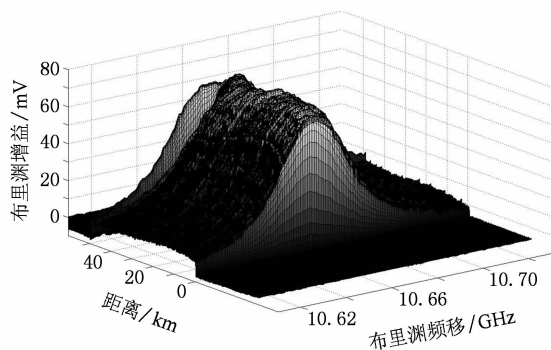


图4 频移-时间(空间)-增益的关系曲线

图5为经洛伦兹拟合后, 峰值布里渊频移沿光纤的分布. 图6为图5后端49 km附近放大图. 由图6可知, 在49.8 km测量点处, 布里渊频率随温度的变化会有不同程度的移动. 由于实验所用内圈光纤所受应力要高于外圈光纤, 所以在图5中可以明显看出, 随着距离的增加, 布里渊频移有小幅增大的趋势. 由图6可知, 当温度不断升高时, 测量点处光纤相对其它各处的光纤布里渊频移逐渐增大, 由图6所示曲线可计算得出温度分辨率为 $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$.

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 $30\text{--}60\text{ }^{\circ}\text{C}$, 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 $R^2 = 0.9991$, 线性度很好, 完全符合实际温度传感的要求.

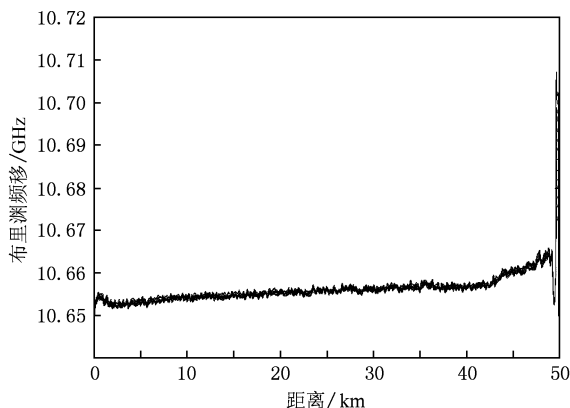


图5 峰值布里渊频移沿光纤的分布

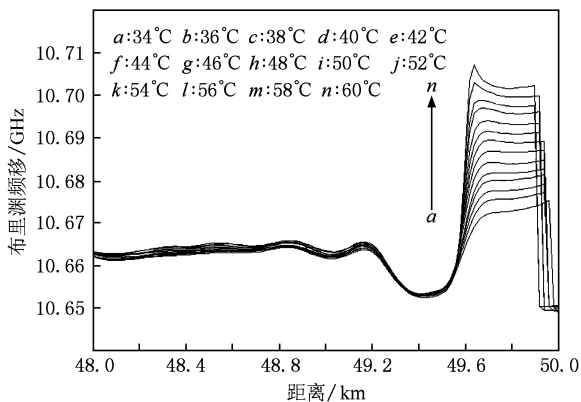


图6 峰值布里渊频移在测量点附近的分布

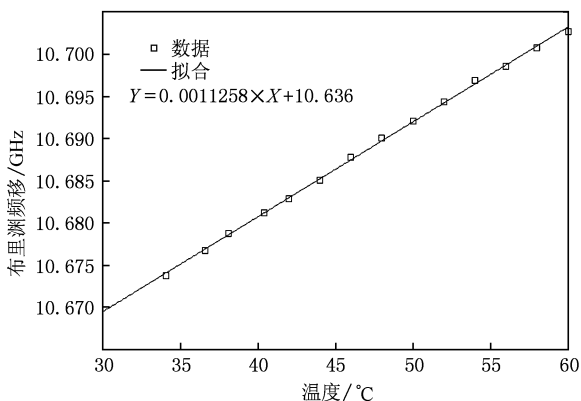


图7 测量点处布里渊频移随温度的变化曲线

5. 结 论

本文报道了一种基于双向分布式拉曼放大的BOTDA. 利用双向拉曼抽运光对信号光进行拉曼放大, 温度传感距离达50 km, 温度分辨率达 $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,

空间分辨率为 50 m. 光纤后端的测量分辨率明显得到改善, 探测信号整体平稳, 布里渊频移随温度变化的线性度非常好, 完全符合实际温度传感的要

求. 该系统保证了整段光纤的温度分辨率, 克服了传统 BOTDA 光纤后端信号急剧下降的弊端, 对分布式光纤传感系统的研究具有较高的参考价值.

-
- [1] Horiguchi T, Shimizu K, Kurashima T, Tateda M, Koyamada Y 1995 *J. Lightwave Technol.* **13** 1296
- [2] Shimizu K, Horiguchi T, Koyamada Y, Kurashima T 1993 *Opt. Lett.* **18** 185
- [3] Alahbabi M N, Cho Y T, Newson T P 2004 *Meas. Sci. Technol.* **15** 1544
- [4] Alahbabi M N, Cho Y T, Wait P C, Hartog A H, Newson T P 2004 *J. Opt. Soc. Am. B* **21** 1156
- [5] Smith J, Brown A, DeMerchant M, Bao X 1999 *Appl. Opt.* **38** 5372
- [6] Soto M A, Bolognini G, Pasquale F D 2008 *Opt. Express* **16** 19097
- [7] Islam M N 2002 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **8** 548
- [8] Gupta G C, Wang L L, Mizuhara O, Tench R E, Dang N N, Tabaddor P, Judy A 2003 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **15** 996
- [9] Rasmussen C, Fjelde T, Bennike J, Liu F, Dey S, Mikkelsen B, Mamyshev P, Serbe P, Wagt P, Akasaka Y, Harris D, Gapontsev D, Ivshin V, Hall P R 2004 *J. Lightwave Technol.* **22** 203
- [10] Ma Y H, Xie S Z, Chen M H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 123 (in Chinese) [马永红、谢世钟、陈明华 2005 物理学报 **54** 123]
- [11] Tong Z, Wei H, Jian S S 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1873 (in Chinese) [童治、魏淮、简水生 2006 物理学报 **55** 1873]
- [12] 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]
- [13] Bernini R, Minardo A, Zeni L 2002 *Proc. IEEE Sensors* **1214** 1006
- [14] Naruse H, Tateda M, Ohnoet H 2002 *The 15th Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest*, Portland, May 6—10, 2002 p309

Brillouin optical time domain analyzer based on bi-directional Raman amplification *

Zhang Chao^{1)†} Rao Yun-Jiang^{1,2)} Jia Xin-Hong¹⁾ Chang Liang¹⁾ Ran Zeng-Ling¹⁾

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

2) (*Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems, Ministry of Education, College of optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China*)

(Received 11 January 2010; revised manuscript received 29 January 2010)

Abstract

We report a Brillouin optical time domain analyzer (BOTDA) based on bi-directional Raman amplification in this paper. With the bi-directional Raman amplification, the loss of the optical fiber and the depletion of Brillouin pump light can be compensated for efficiently, hence the measurement resolution is improved at the end of the optical fiber significantly. The detected signal is stable along the whole length of the sensing fiber, free from the spectral broadening caused by the modulation instability and the problem of unevenness of detected signals of the conventional BOTDA. The Raman amplification is very useful for enhancing the measurement accuracy. With the bi-directional Raman pump, a temperature resolution of 0.6 °C was achieved over a sensing distance of 50 km with a 50 m spatial resolution. The signal-to-noise ratio and the optical signal power distribution characteristics of the system have been studied by experiment.

Keywords: distributed optical fiber sensing, stimulated Raman amplification, Brillouin gain, Brillouin optical time domain analyzer

PACC: 4265, 4265B, 4281C

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2007AA01Z245).

† E-mail: zhangchao19870408@163.com