

文章编号: 1001-3806(2015)03-0304-04

分布式光纤传感双通道调制光源设计与测试

张晓青^{1,2}, 贾豫东^{1,2}, 董建晶¹

(1. 北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院 测控技术与仪器系, 北京 100192; 2. 北京信息科技大学 光电测试技术北京市重点实验室, 北京 100101)

摘要: 为了满足布里渊光时域分析(BOTDA)光纤传感系统需要频差为布里渊频移的两种激光输出光源的需求, 采用布里渊环形腔频移和电光调制的方法设计了双通道光源系统。根据光源的脉冲宽度、重复频率、扫频量等参量, 对双通道调制光谱输出进行了仿真, 并采用现场可编程门阵列配合直接数字式频率合成器技术的方案建立了系统实验装置, 实现了脉冲探测光和扫频抽运光两种激光输出。脉冲探测光输出最小脉宽达 10ns, 扫频抽运光输出扫频范围达 0MHz ~ 90MHz, 扫描频率步进值为 30Hz, 时间步进为 1.6 μ s。结果表明, 该光源技术参量满足 BOTDA 系统的要求, 不需引入高频微波信号源等高速器件, 信号采集模块可采用 100MHz 以下光电探测器件实现, 降低了系统成本。

关键词: 光纤光学; 双通道调制光源; 脉冲光; 扫频光; 布里渊频移; 环形腔

中图分类号: TN253 文献标志码: A doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.03.004

Design and test of dual-channel light sources for distributed optical fiber sensing

ZHANG Xiaoqing^{1,2}, JIA Yudong^{1,2}, DONG Jianjing¹

(1. Department of Measurement and Control Technology and Instrumentation, School of Instrumentation Science & Opto-electronic Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China; 2. Beijing Key Laboratory for Optoelectric Measurement Technology, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100101, China)

Abstract: For the purpose that a fiber sensor system of Brillouin optical time-domain analysis (BOTDA) needs two light sources of Brillouin frequency shift, a dual-channel light source system was proposed by employing Brillouin ring cavity frequency shift and electro-optic modulation. According to several parameters, pulse width, repetition frequency rate and step of frequency sweeping, the output light spectrum of dual-channel modulation was simulated. Based on field programmable gate array (FPGA) and direct digital synthesizer (DDS) chip, experimental system was setup and both pulse detect light and sweep frequency pulse light could be output from the setup. The minimum pulse width of the detection pulse was 10ns, and the sweep frequency range reached 0MHz ~ 90MHz with a frequency sweep step of 30Hz and a time step of 1.6 μ s. Experimental results show that the dual channel light source can meet the demands of general BOTDA systems, without the necessity of some high speed devices, such as high frequency microwave signal source. Signal acquisition modules can adopt regular photoelectric detectors below 100MHz so as to reduce the system cost.

Key words: fiber optics; dual-channel modulation light source; pulse light; frequency sweep light; Brillouin frequency shift; ring cavity

引言

基于布里渊光时域分析 (Brillouin optical time-domain analysis, BOTDA) 的分布式光纤传感技术较其它布里渊传感技术检测信号强度更大、测量精度更高以及传感距离更长, 已成为该领域研究热点^[1]。但 BOTDA 光源需要频差约为布里渊频移的两种激光输出^[2], 造成了其光源系统的复杂性和高成本, 是制约其应用的关键问题。本文中提出并设计了基于布里渊

基金项目: 北京市教委科技计划面上资助项目 (KM201411232005); 光电测试技术北京市重点实验室资助项目 (GDKF2013002); 北京市青年拔尖人才培养计划资助项目 (CIT&TCD201404122)

作者简介: 张晓青 (1967-), 女, 副教授, 现主要从事光纤传感技术及先进信号处理的研究。

E-mail: zxqbim@163.com

收稿日期: 2014-04-22; 收到修改稿日期: 2014-05-16

频移环形腔的双通道调制光源系统,实现脉冲探测光和扫频抽运光双通道光输出,从而避免采用双激光器、声光调制器、微波信号源(大于 10GHz)等器件^[3-6],实现低频相干信号检测,可有效降低系统成本,提高系统的普遍适用性。

1 BOTDA 双通道调制光源系统设计

1.1 基本结构

BOTDA 双通道调制光源系统基本结构如图 1 所示,由脉冲探测光与扫频抽运光两个通道组成,采用单只激光器耦合分光,利用光纤布里渊频移环实现布里渊频移。由于电光强度调制器受环境及自身工作特性的影响会出现工作点漂移现象^[7-8],为消除其影响,加入基于抖动信号的调制器偏压控制电路。

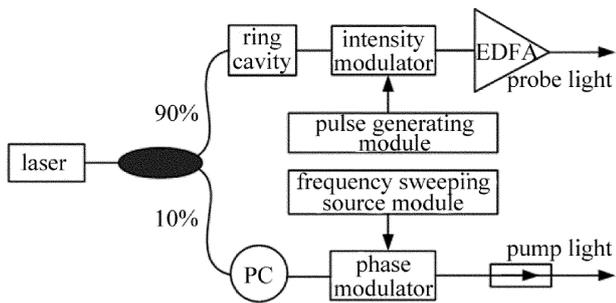


Fig. 1 Configuration of dual-channel modulated light source

1.2 脉冲探测光通道

激光器发出偏振光,经 90/10 偏振耦合器分成两部分。其中,90% 部分通过布里渊光纤环形频移器产生约为 1kHz 窄线宽的布里渊频移光(频率低于入射光 1550nm,频移量约 11.2GHz,对应的波长量约为 0.1nm),该布里渊频移光由电光强度调制器调制得到系统所需脉冲光,该脉冲光的各种参量,如脉宽、重复频率等均由加载在电光调制器的电脉冲控制。脉冲宽度直接影响 BOTDA 传感系统的空间分辨率,如光脉冲宽度为 10ns 或 20ns,理论上 BOTDA 传感系统的空间分辨力分别为 1m 或 2m。一般地,脉冲越窄,空间分辨力越高。脉冲重复频率和传感系统的测量范围有关,应根据测量长度来确定脉冲重复频率。若测量距离是 10km,光纤中的光速为 2×10^5 km/s,可算得 $f \leq 10$ kHz。该通道的调制脉冲光进入掺铒光纤放大器(erbium-doped fiber amplifier, EDFA)进行功率放大,然后作为探测光进入传感光纤,以实现长距离光纤的背向散射光测量。当电光强度调制器工作在线性调制区域时,脉冲信号将不失真地调制到光波上。调制后的脉冲光表现为梳状光谱,如图 2 所示。

改变强度调制器上下两臂的偏置电压分别为 4V 和 10V,使其偏离调制器的线性工作区,则会造成输出

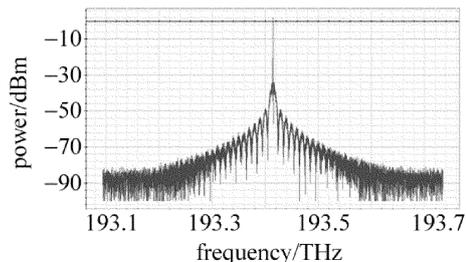


Fig. 2 Output light spectrum of pulse intensity modulation

脉冲光功率明显地降低。所以测量调制器的半波电压并设置最佳偏置电压,使系统工作在线性调制区,是电光强度调制的关键步骤。

1.3 扫频抽运光通道

从激光器分出的 10% 光信号由电光相位调制器(electro-optical phase modulator, EOPM)调制产生扫频光,该信号经过光隔离器后作为抽运光进入传感光纤,光隔离器只允许抽运光单向通过,以防止测量光路中抽运扫频光产生的后向传输光、脉冲探测光的散射光对光源输出功率稳定性产生不良影响。其频率扫描偏移量由加载在 EOPM 上的扫频电信号控制,在 EOPM 之前需加偏振控制器(polarization controller, PC)进行偏振态的控制以获得最大的输出信号以及稳定的传输特性。若设置连续光源中心波长 1550nm(频率 194.415THz),抽运功率 10dBm(10mW),激光线宽 1MHz,仿真得到的光谱如图 3 所示。为更好地观察波形,设定频率为 $f_s = 10$ GHz 的正弦信号进入相位调制器,通过光谱仪检测输出光谱。输出光谱如图 4 所示。

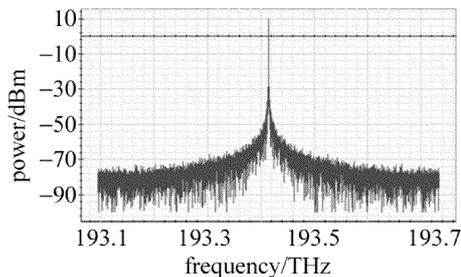


Fig. 3 Laser spectrum

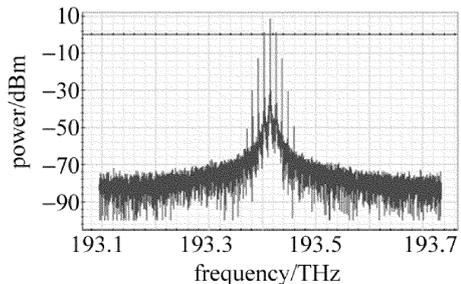


Fig. 4 Light spectrum after phase modulation

与图 3 比较,图 4 中的相位调制产生了一系列的边带,这些边带之间的频率间隔为 f_s ,而且各边带的幅度和载波之间有特定的关系(由调频波各阶贝塞尔函数决定)。在实际系统中,需要通过调节及控制调制

电压以及输入光信号功率以获得最佳的调制深度,使得1阶贝塞尔函数所对应的1阶光强作为所需要的频移光。另外,实际应用时扫频量还需要根据温度或应变导致的布里渊频移改变量来设定^[9-10]。

2 光源测试与分析

2.1 布里渊频移光测试

考虑到成本,实验中传感光纤采用通信用普通单模光纤,为了使损耗降低,采用1550nm中心波长激光器,选取9km长单模光纤进行布里渊频移器实验研究。在环境温度为20℃的情况下,实测中心波长为1551.28nm,输出功率为13dBm(20mW)的分布式反馈(distributed feedback,DFB)激光器经过光衰减器进入环形腔。调节可调谐光耦合器的耦合系数为 $\kappa=0.5$,通过衰减器改变进入环形腔的光功率。当加大进入环形腔的光功率到2.3mW时,斯托克斯光功率发生突然性增大,且其它波长的散射光急剧衰减,此时光谱上只表现为布里渊斯托克斯光,且斯托克斯光功率随着入腔光功率的增加而逐渐增加,激光器输出功率与频移器输出功率呈线性增长趋势。实验中得到此时的光光平均转换效率约为45%,频移器阈值为2.3mW。与不加环形腔的阈值测试相比,频移器有了大约4倍的降低,这说明腔型结构的反馈机制能大幅降低受激布里渊散射阈值。图5为激光器输出功率为13dBm(20mW)情况下,激光器与频移输出光谱对比图,可以看到布里渊斯托克斯频移量约为0.1nm。

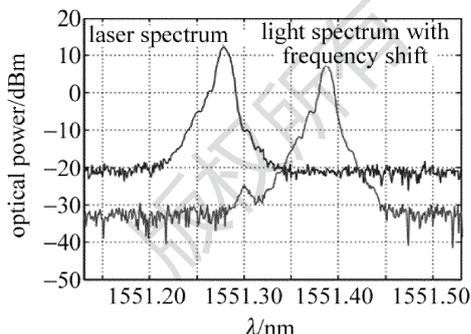


Fig. 5 Comparison between laser spectrum and light spectrum with frequency shift

改变光耦合器的耦合系数 κ 从0.1开始一直到0.9,每次改变量为0.1,按照前面的实验步骤,记录数据,得到频移器阈值、光光转换效率与耦合器耦合比的曲线关系图,如图6所示。

从图6可以看到,所设计的9km环形腔频移器在 $\kappa \leq 0.4$ 时,阈值功率随着 κ 的增大而急剧减小,而在 $\kappa \geq 0.4$ 之后频移器的阈值功率几乎没有变化,约为2.3mW。结果表明,频移器腔内的受激布里渊散射随着 κ 的增加而增强,到达 $\kappa=0.4$ 之后,受激布里渊散

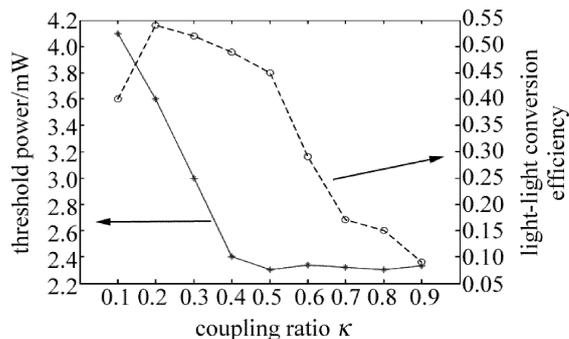


Fig. 6 Relationship between coupling ratio and threshold power, coupling ratio and conversion efficiency

射效应一直处于较强状态。结合频移器光光转换效率与耦合器耦合比关系,可得到9km单模光纤构成的环形腔频移器的最佳工作状态,此时,耦合器耦合比为0.4,光光转换效率为49%。

2.2 脉冲探测光测试

在脉冲探测光通道,激光脉冲输出由电脉冲驱动源控制电光强度调制器得到,电光强度调制器选用10Gbit/s高速电光调制器,根据实测电光强度调制器的半波电压,给调制器加上3V直流偏置电压,使调制器工作在线性调制区。在示波器上观察电脉冲和光脉冲的调节一致性,如图7所示。在图7中,示波器上显示的CH1通道(上方的脉冲)为光电探测器探测到的波形,CH2通道(下方的脉冲)为加载到调制器上的信号源波形,两组波形的重复频率都是100kHz。

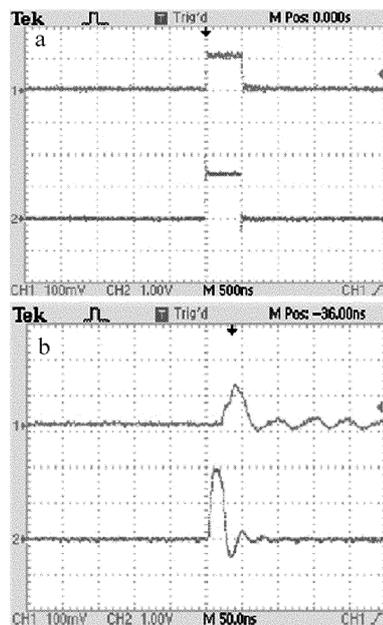


Fig. 7 Comparison between input light and output light of intensity modulator with different pulse width
a—modulating pulse width of 500ns b—modulating pulse width of 20ns

图7a中信号的脉冲宽度为500ns,图7b中信号的脉冲宽度为20ns,通过调节电脉冲驱动信号的宽度,

实现了光脉冲宽度的调节,两组脉冲一致性好,符合快速光纤测量系统的要求。当脉冲信号驱动源脉宽调节到 10ns 及以下时,调制后的信号出现比较大的展宽和功率减小。造成这种情况的主要原因是由于窄脉宽情况下,信号功率本身减小,电光强度调制器的调制速度也产生了一定的滞后,致使调制后的信号出现展宽。另外,电脉冲驱动源的重复频率可调范围设计为 30Hz ~ 100kHz,从而得到光脉冲信号的重复频率可调范围也为 30Hz ~ 100kHz,多次实验表明,调制前后信号一致性好,波形稳定。

2.3 扫频抽运光测试

利用所选电光相位调制器的独立双路特性,将其中一路加入调制信号源,另一路不做调制,两路输出通过 2 × 1 光纤耦合器,利用光相干原理,对两路光进行拍频,实现相位调制信号的检测。根据 5.8V 的半波电压,调节信号源的电压为 2.9V,使调制器工作在线性区中点,得到实验测试结果如图 8 所示,图中的扫描频率偏移量约为 1MHz,上方曲线是现场可编程门阵列扫频信号驱动源波形,下方是调制后检测出的 1 阶边带频率偏移量的信号波形。

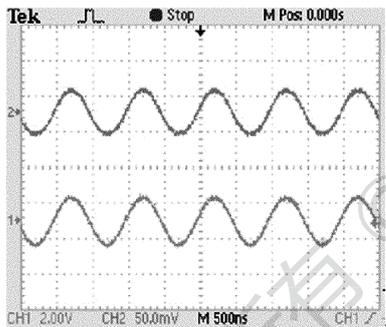


Fig. 8 Phase modulation signal with frequency of 1MHz

在扫频光输出通道,扫频驱动源基于现场可编程门阵列和数字频率合成技术进行设计,选择相应的频率控制字,使频率步进值为 30Hz^[11],输出的部分频率值与实测频率值如表 1 所示。

Table 1 Test results of sweeping frequency of drive source

design frequency/Hz	output frequency/kHz
30	0.030
90	0.090
1020	1.020
9000	8.998
90000	89.998
900000	899.997
1000020	1 000.017
9000000	8 999.996
90000000	89 999.996

电光相位调制可以改变光波的频率,并通过确定

半波电压,调节信号源幅度(即调制电压),使其最大程度地抑制高阶边带而得到 1 阶边带调制光,从而得到理想的相位调制光输出。扫频设计范围是 0MHz ~ 90MHz,实验表明,用通用的低频光电探测器件能完成该范围内相位调制光的相干检测。

3 结论

基于布里渊环形腔频移器、电光强度调制器以及电光相位调制器的 BOTDA 双通道调制光源系统(包括脉冲探测光和抽运扫频光两个通道),可以得到频差为布里渊频移的两路光输出,脉冲探测光通道具有窄线宽的布里渊频移光谱输出,光脉冲宽度低至 10ns,抽运扫频光的扫频范围为 0MHz ~ 90MHz,扫频步进值为 30Hz,这些主要技术指标满足 BOTDA 系统对光源的指标要求。实验结果表明,该光源适用于 BOTDA 系统,结构简单、激光输出参量可灵活配置、提高了系统稳定性和适用性、降低了系统成本。

参考文献

- [1] BAO X Y, CHEN L. Recent progress in optical fiber sensors based on Brillouin scattering at university of Ottawa [J]. *Photonic Sensors*, 2011, 1(2): 102-117.
- [2] GALINDEZ-JAMIOY C A, L' OPEZ-HIGUERA J M. Brillouin distributed fiber sensors an overview and applications [J]. *Journal of Sensors*, 2012, 2012: 204121.
- [3] SONG M P. The technique of Brillouin scattering-distributed optical fiber sensing based on microwave electrooptical modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(8): 1111-1114 (in Chinese).
- [4] CHEN F C, HU J C, ZHANG C T, *et al.* Distributed Brillouin optical fiber temperature sensor based on high frequency microwave technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(6): 1-5 (in Chinese).
- [5] URRICELQUI J, ZORNOZA A, SAGUES M, *et al.* Dynamic BOTDA measurements based on Brillouin phase-shift and RF demodulation [J]. *Optics Express*, 2012, 20(24): 26942-26949.
- [6] JIANG S, CHANG J, ZHANG S, *et al.* A method for eliminating the impact of microwave sweeper power fluctuation in BOTDA system [J]. *Photonics Sensors*, 2014, 4(1): 86-91.
- [7] LI X, ZHAO S H, LI Y J, *et al.* An automatic bias control method applied to all bias points of electro-optic modulator [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(4): 473-477 (in Chinese).
- [8] REN T T, XU C, ZHENG S L, *et al.* Effect of dither tone-based electro-optic modulator bias control on radio-frequency signal [J]. *Laser Journal*, 2013, 37(6): 773-776 (in Chinese).
- [9] HU J H, ZHANG D W, TAO C X, *et al.* Research and development of distributed optic fiber sensors based on Brillouin scattering [J]. *Laser Journal*, 2011, 32(6): 1-3 (in Chinese).
- [10] HUANG M S, ZENG L, TAO B Q, *et al.* Parameter calculation of distributed optical fiber strain sensor based on Brillouin scattering [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 1999, 20(2): 137-140 (in Chinese).
- [11] DONG J J, ZHANG X Q. Design of broadband frequency-sweep signal generator based on FPGA and AD9854 [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2013, 32(11): 65-69 (in Chinese).