

doi:10.3788/gzxb20154406.0606002

基于超高分辨率光谱分析的周期光信号 相对相位测量方法

陈宇晨,柯昌剑,杨松宝,罗志祥,刘德明

(华中科技大学 下一代互联网接入系统国家工程实验室, 武汉 430074)

摘要:提出了一种基于超高分辨率光谱分析实现周期性光信号频域中相位分布的测量方法.在已测得待测信号超高分辨率光谱的情况下,利用马赫泽德调制器载波抑制效应调制激光器产生双泵浦,激发非线性光纤中的受激布里渊散射效应形成有源双滤波器.用泵浦激光器在测量波长范围内进行连续扫描,得到包含待测信号相位信息的拍频信号,经数据采集和处理后得到待测信号频域上的相对相位信息.实验给出了速率为 5Gb/s,字长为 31bit 的周期性光信号在频域上的相对相位分布信息,证明了这种有源双滤波器的频率响应特性可以满足相位测试的需要.

关键词:电子科学与技术;相位测量;光谱分析;信号处理;光信号;受激布里渊散射;载波抑制

中图分类号:TN913.7

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)06-0606002-5

Method for Measuring Relative Phase of Periodical Signal Based on Ultra-high Resolution Optical Spectrum Analysis

CHEN Yu-chen, KE Chang-jian, YANG Song-bao, LUO Zhi-xiang, LIU De-ming

(National Engineering Laboratory for Next Generation Internet Access,
Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: A method to measure the relative phase distribution of the signal with repetitive pattern was proposed based on ultra-high resolution optical spectrum analysis. After achieved the optical spectrum, the pump with carrier suppression of the Mach-Zehnder modulator was modulated to create a dual-pumping stimulated Brillouin scattering, as dual-channel active filter. By continuously scanning through the wavelength range under test, data acquisition and processing, the relative phase distribution of modulated optical signal was got. The frequency response results show that the dual-channel filter is suitable for phase measuring, and the relative phase distribution in frequency domain of a 5 Gb/s, 31 bits optical signal with repetitive pattern modulated using this technique was obtained.

Key words: Electronic science and technology; Phase measurement; Optical spectrum analysis; Signal processing; Optical signals; Stimulated Brillouin scattering; Carrier suppression

OCIS Codes: 060.4080;060.4370; 060.4510; 070.4790

0 引言

光谱特征是评价光通信器件与光通信系统性能的重要参量之一.对信号光谱进行超高分辨率分析所得到的精细参量,为研究光通信系统与光通信器件的内变化规律以及优化其性能提供了新的途径.由字长

较短的伪随机比特序列(Pseudo Random Binary Sequence, PRBS)形成的光信号可视为具有一定的周期性,因而其精细光谱中会出现周期性结构.根据时频域的对应关系,如果能够获得与周期性光谱结构对应的相对相位值,就有望通过傅里叶逆变换得到该信号在时域中的变化规律^[1-2].

基金项目:国家重大科学仪器设备开发专项(No. 2013YQ16048703)、国家自然科学基金(No. 61475053)和国家高技术研究发展计划项目(No. 2013AA013403)资助

第一作者:陈宇晨(1988-),男,硕士研究生,主要研究方向为光纤通信技术和非线性光纤光学. Email: cyc@hust.edu.cn

导师(通讯作者):柯昌剑(1977-),男,教授,博士,主要研究方向为非线性光纤光学及其应用. Email: cjk@mail.hust.edu.cn

收稿日期:2014-12-10; **录用日期:**2015-03-25

<http://www.photon.ac.cn>

传统体光栅结构的光谱仪仅能达到 1 GHz 左右光谱分辨率^[3],而只有采用相干检测装置^[4]和利用光纤中受激布里渊散射效应(Stimulated Brillouin Scattering, SBS)实现分辨率高达 10 MHz 量级的光谱分析^[5],才能够获得信号的精细结构。

本文提出一种基于超高分辨率光谱分析实现获取周期性光信号频域中相位分布的测量方法:在已测得信号高分辨率光谱的情况下,利用马赫泽德调制器(Mach-Zehnder Modulator, MZM)载波抑制效应,调制激光器产生双泵浦,进而激发高非线性光纤中的受激布里渊散射效应形成有源双滤波器;通过对精细光谱的连续扫描,经数据采集和处理后获取待测信号频域上的相对相位信息。

1 理论分析

SBS 是光纤中一种常见的非线性效应。通过优化光纤的材料选择和结构设计,可利用 SBS 效应构造一种带宽极窄的有源光学滤波器^[6-7]。如果待测信号光与泵浦光从相反的方向进入光纤,并且频率落在 SBS 作用带宽内,信号光功率会被放大^[8]。携带有强度或相位信息的待测信号电场表达式为

$$E_s(t) = A(t) \exp i[2\pi f_0 t + \varphi(t)] \quad (1)$$

假设其为周期性信号,则式(1)用傅里叶级数展开后可得

$$E_s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} E_k(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} A_k i[2\pi(f_0 + k\Delta f)t + \varphi_k] \quad (2)$$

Δf 为频域上的周期性间隔,式(2)可以理解为周期性待测信号在光谱域上由无穷多个离散的频率成分组成。这些相邻的频率成分频谱间隔均为 Δf , A_k 为第 k 个频率成分的振幅, φ_k 为第 k 个频率成分的相位^[9]。通过构建的基于 SBS 的高准确度光谱测量方法,可以得到待测光信号的强度谱,获得 A_k 值大小。

然后通过测量两个相邻频率成分(第 k 和 $k+1$ 个)的相对相位差的方法,获得待测信号中每一个频率成分的相位 φ_k 。如图 1 所示,同时用两个泵浦频率激发光纤中的 SBS 效应。当待测信号被选中的相邻两个频率成分,分别落在两个泵浦同时激发的 SBS 增益带宽

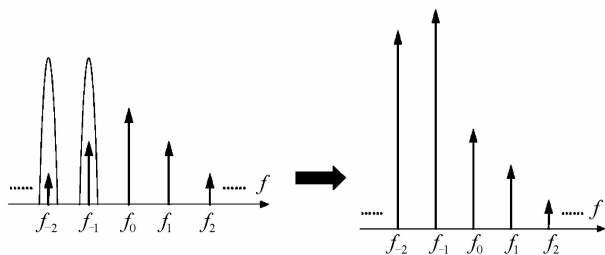


图 1 双泵浦激发 SBS 效应用于相对相位测量

Fig. 1 Schematic of relative phase measurement by dual pumping source for SBS generation simultaneously

内时,它们会被显著放大,而其它未落入 SBS 作用带宽内的频率成分可近似忽略^[10]。则经过双通道有源滤波作用后的待测信号的光场可以近似表示为

$$E_{k,k+1} = G_B(A_k) \exp i[2\pi(f_0 + k\Delta f)t + \varphi_k + \varphi_k^B] + G_B(A_{k+1}) \exp i[2\pi(f_0 + (k+1)\Delta f)t + \varphi_{k+1} + \varphi_{k+1}^B] \quad (3)$$

式中 G_B 为 SBS 效应带来的增益, φ_k^B 、 φ_{k+1}^B 为待测信号在 SBS 增益谱最大值处引入的相移。待测信号光进入平方率光电探测器后,两个相邻频率成分会产生拍频,探测器输出的拍频电流大小可近似为

$$I_{\text{det}}(t) = KG_B(A_k)G_B(A_{k+1}) \cos(2\pi\Delta f t + \varphi_{k,k+1} + \varphi_{k+1}^B - \varphi_k^B) \quad (4)$$

式中 K 为探测器响应度, $\varphi_{k,k+1} = \varphi_{k+1} - \varphi_k$, 定义为两个相邻频率成分相位差。可以发现拍频电信号近似为余弦函数,由于 SBS 增益系数可以看做一个恒定的系数,则拍频信号的幅度主要与两个相邻频率成分的振幅有关,而拍频信号的频率为待测信号的相邻两个频率成分的频率间隔 Δf , 拍频信号的相位项则由两部分组成,一部分是两个相邻频率成分相位差 $\varphi_{k,k+1}$,另一部分为两个相邻频率引入的布里渊相移的相位差 $\varphi_{k+1}^B - \varphi_k^B$ 。

由理论可知 $\varphi_{k+1}^B - \varphi_k^B$ 可近似为常量^[11]。则综合式(3)、(4)可知, φ_k 的测量可等效成 $\varphi_{k,k+1}$ 的测量,即用相位检测的方法测量拍频电信号的相对相位,就可以取得每一个 $\varphi_{k,k+1}$ 的值。可取一个频率成分的相位值为初始相位,这里为了方便计算和推导,一般取 $k=0$ 时, $\varphi_0=0$,然后将得到的每相邻两个频率成分的相位差进行累加或累减便可以得到

1) 当 $k > 0$ 时

$$\varphi_1 = \varphi_0 + \varphi_{0,1} = \varphi_{0,1}$$

$$\varphi_2 = \varphi_1 + \varphi_{1,2} = \varphi_{0,1} + \varphi_{1,2}$$

⋮

$$\varphi_k = \varphi_{k-1} + \varphi_{k-1,k} = \sum_{n=1}^k \varphi_{n-1,n}$$

2) 同理,当 $k < 0$ 时

$$\varphi_k = \varphi_{k+1} - \varphi_{k,k+1} = - \sum_{n=-1}^k \varphi_{n,n+1}$$

如此便可以得到待测信号所有频率成分的相对相位值。

2 实验装置

图 2 为实验原理框图。待测信号(Signal Under Test, SUT)由误码仪产生,比特率为 B bit/s,信号码元字长为 N 。可调谐激光器(Tunable Laser Source, TLS)产生的泵浦光,可在需要波长范围内连续扫描。为保证激发的 SBS 双滤波器两个通道之间的频率间隔满足相位测量的要求,需将待测信号的时钟进行分频,分频数为字长的两倍,利用分频以后的时钟信号驱动马赫泽德调制器(MZM)对泵浦光进行调制,使得泵浦

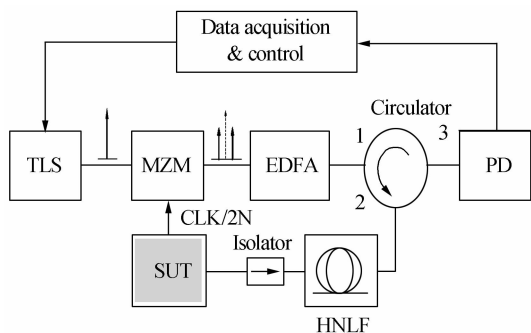


图2 周期光信号相对相位测量实验原理框图

Fig.2 Experimental setup of relative phase measurement for periodical optical signals

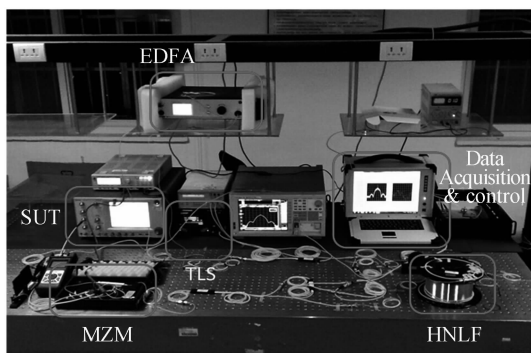


图3 周期光信号相对相位测量装置照片

Fig.3 The photo of relative phase measurement device for periodical optical signals

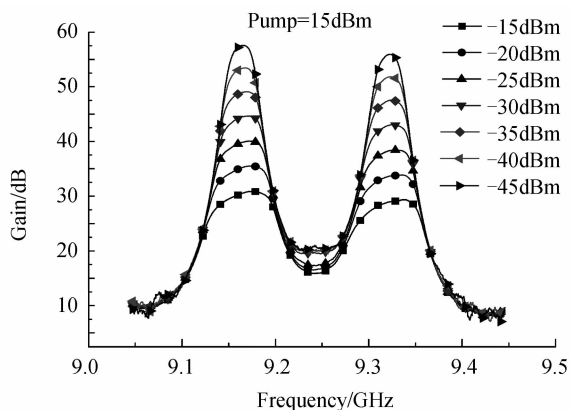
光的调制频率恰好为待测信号频率间隔的一半,即 $f_m = \Delta f/2$,实验装置照片实物如图3所示。

通过调节 MZM 的偏置电压使得泵浦光载波和高阶调制边带被有效抑制,仅有两个一阶边带强度达到可激发 SBS 的阈值.将载波抑制后的泵浦光输入掺铒光纤放大器(Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA)进行功率助推,然后由环形器进入高非线性光纤(High Non-linear Fiber, HNLF)后,待测信号与泵浦光发生相互作用,便能形成频率间隔为 Δf 的双通道有源滤波器.经过扫描,双通道滤波后的信号成分被光电探测

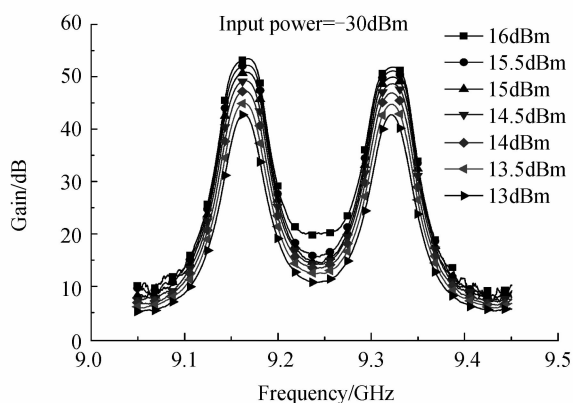
器(Photodetector, PD)接收.其产生的拍频电信号再被数据采集系统采集后转化为数字信号,进入计算机进行处理,经过相位检测分析后,便可得到待测信号频域(光谱域)所有频率(波长)成分对应的相对相位值。

3 结果讨论

首先对基于 SBS 的双通道有源滤波器的频响特性进行了实验研究^[11],图4为频率间隔为 160 MHz 的双通道有源滤波器在不同泵浦功率和不同输入功率下的频率响应测试实验结果.图4(a)所示为泵浦功率保持 15 dBm 不变情况下,改变输入信号功率得到的一组幅频响应曲线.可以发现,基于 SBS 的双通道滤波器幅频响应特性与滤波器需提取的待测信号精细光谱中对应频率的功率大小密切相关.当泵浦功率一定时,待测信号精细光谱中对应频率的功率越小,则 SBS 增益越大,并且越接近于洛伦兹线型,滤波器单通道的 -3 dB 带宽也越窄.图4(b)所示为输入信号功率保持 -30 dBm 不变情况下,改变泵浦功率得到的幅频响应曲线,SBS 增益随着泵浦功率增加也会趋近饱和,-3 dB 带宽也会展宽,同时带外噪音也会增加.因此由图4(a)和(b)可以发现为了保证 10 MHz 左右滤波器带宽,同时取得线性放大效果,待测信号光谱上每个频率成分的输入光功率应小于 -30 dBm,泵浦功率也不应超过 15 dBm.图4(c)和(d)分别对应了与图4(a)和(b)条件下基于SBS的双通道滤波器的相频响应.相频响应测试结果显示,基于SBS的双通道有源滤波器随着信号功率的变化,相频响应曲线斜率会有轻微变化,同时随着泵浦功率的变化,相频响应曲线会有整体的平移变化,但两个通道的相频响应变化一致性较好.因此相邻两个频率成分通过SBS效应引入的布里渊相移 $\varphi_{k+1}^B - \varphi_k^B$ 可视作常量,这也与基于式(4)相位计算的理论基础一致。



(a) Amplitude-frequency response at different input power



(b) Amplitude-frequency response at different pump power

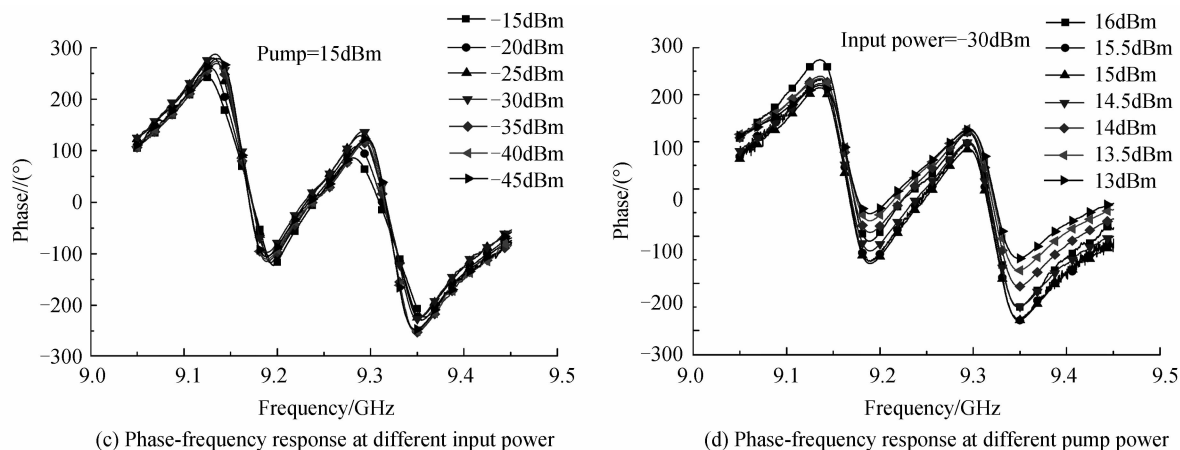


图4 基于SBS的双通道滤波器频率响应特性

Fig. 4 Frequency response of dual-channel filter based SBS

相对相位测量实验中利用自建的超高分辨率光谱测量装置^[12]对载波波长为1 550.3 nm,码元传输速率为5 Gb/s, PRBS-5(字长为 $2^5 - 1 = 31\text{bit}$)的NRZ-DPSK信号精细光谱进行了测试分析,其周期性光谱结构的频率间隔 $\Delta f = 161.29\text{ MHz}$.加载到MZM的分频后的时钟频率 $f_m = 80.65\text{ MHz}$,则通过MZM载波抑制调制后泵浦光的两个一阶边带频率间隔也为161.29 MHz,保证了双通道滤波器频率间隔与待测信号一致.当TLS开始波长连续扫描,待测信号中的两个频率成分落在布里渊频移带宽内,便会激发双通道SBS效应,当双通道有源滤波器扫描信号精细光谱时,光电探测器输出与之对应的,频率为161.29MHz的拍频余弦信号.相位检测算法的详细流程图如图5所示.

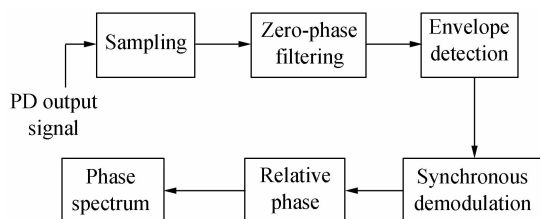


图5 相对相位提取流程图

Fig. 5 Flow chart for relative phase extraction

如图6所示,激光器单次扫描后直接采样得到PD的输出信号,由数据采集卡采样后转化为数字信号(采样速率为2.5 GS/s,采样位数为10 bit).通过宽度100 kHz的零相位带通滤波减小噪声得到包络受到调制的拍频信号,其中每个包络内的信号都包含了一个对应离散光谱成分的相位信息.经过包络检测^[13],找到每个包络的极值点.包络的极值点即代表了待测信号的相邻两个离散光谱成分落入SBS增益谱最高点时采集的信号,包络的变化由SBS增益谱的线型与激光

器的扫描速度共同决定,在这里近似认为激光器的扫描频率远低于拍频信号的频率.

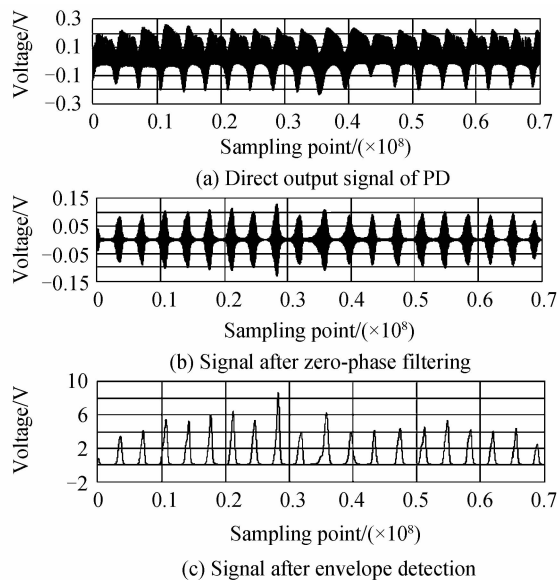


图6 光电探测器输出拍频信号经过滤波与包络检测
Fig. 6 Output beat-frequency signal after filtering and envelope detection

因此包络变化相对于拍频信号161.29 MHz的频率可视为慢变化,包络极值附近的拍频信号可近似为振幅恒定不变的余弦信号.从而提取各包络极值附近的采样点,进行同步解调^[14-15],实现各包络与基准相位的相对相位差 $\varphi_{k,k+1}$ 的提取,最后通过累加即可生成与光功率谱相对应的相对相位谱.如图7所示,实线为待测信号载波附近0.2 nm波长范围内的光功率谱,离散的圆点为实测与之对应离散谱线的相对相位.通过进一步优化参量,可使相对相位的测量误差控制在 $\pm 2^\circ$ 以内.

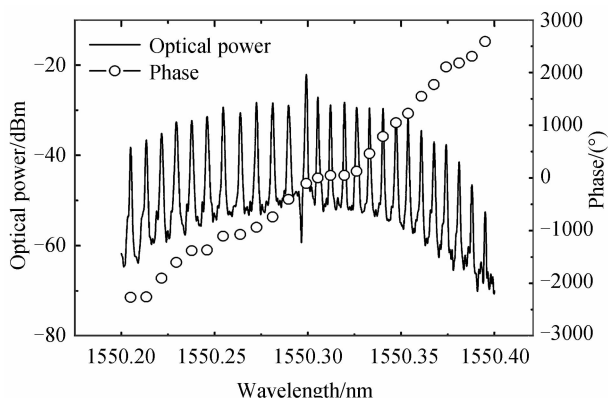


图7 测量得到的周期光信号(DPSK)超高分辨率光谱与对应谱线的相位分布

Fig.7 Measured ultra-high resolution optical spectrum of periodical optical signal (DPSK) and its relative phase distribution

4 结论

本文提出一种基于SBS超高分辨率光谱分析技术,利用MZM的载波抑制效果构造出有源双通道光滤波器,实现周期性光信号频域中相位分布的测量方法。基于该方法可获得周期性光信号的功率谱和相位谱。由于待测信号的离散谱线间隔是由信号传输速率和周期性信号的码元长度共同决定,因此采用相对较低速率带宽的探测器测量分析较高速率的光信号,结合傅里叶逆变换,可反演分析得到周期性光信号的强度与相位在时域中的变化规律。这在光传输系统性能分析和光通信器件测试等领域,具有巨大的应用潜力。

参考文献

- [1] DEBEAU J, KOWALSKI B, BOITTIN R. Simple method for the complete characterization of an optical pulse[J]. *Optics Letters*, 1998, **23**(22): 1784-1786.
- [2] IACONIS C, WALMSLEY I. Spectral phase interferometry for direct electric-field reconstruction of ultrashort optical pulses[J]. *Optics Letters*, 1998, **23**(10): 792-794.
- [3] HUI Rong-qing, O'SULLIVAN M. Fiber optic measurement techniques[M]. Academic Press, 2009.
- [4] SZAFRANIEC B, LEE A, LAW J, et al. Swept coherent optical spectrum analysis[J]. *Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2004, **53**(1): 203-215.
- [5] BANEY D, SZAFRANIEC B, MOTAMEDI A. Coherent optical spectrum analyzer[J]. *Photonics Technology Letters*,

2002, **14**(3): 355-357.

- [6] DOMINGO J, PELAYO J, VILLUENDAS F, et al. Very high resolution optical spectrometry by stimulated Brillouin scattering[J]. *Photonics Technology Letters*, 2005, **17**(4): 855-857.
- [7] YENIAY A, DELAVALUX J, TOULOUSE J. Spontaneous and stimulated Brillouin scattering gain spectra in optical fibers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2002, **20**(8): 1425-1431.
- [8] AGRAWAL G. Nonlinear fiber optics, fourth edition & application of nonlinear fiber optics, second edition[M]. JIA Dong-fang, YU Zhen-hong, WANG Zhao-ying, transl. Publishing House of Electronics Industry, 2010: 245-253. AGRAWAL G. 非线性光纤光学原理及应用(第二版)[M]. 贾东方, 余震虹, 王肇颖, 译. 北京: 电子工业出版社, 2010: 245-253.
- [9] KWAKERNAAK M, SCHREIECK R, NEIGER A, et al. Spectral phase measurement of mode-locked diode laser pulses by beating sidebands generated by electrooptical mixing[J]. *Photonics Technology Letters*, 2000, **12**(12): 1677-1679.
- [10] VILAFRANCA A, LASOBRAS J. Complex spectrum analysis of modulated optical signals using stimulated Brillouin scattering[J]. *Photonics Technology Letters*, 2008, **20**(23): 1938-1940.
- [11] LOAYSSA A, HERNANDEZ R. Characterization of stimulated Brillouin scattering spectra by use of optical single-sideband modulation[J]. *Optics Letters*, 2004, **29**(6): 638-640.
- [12] PAN Deng, KE Chang-jian, ZHOU Xin, et al. Dynamic range improvement through balanced detection for SBS-based high resolution OSAs [C]. 19th Optoelectronics and Communications Conference (OECC) and the 39th Australian Conference on Optical Fibre Technology (ACOFT), Barton, Engineers Australia, 2014: 741-742.
- [13] ZHANG Xu-xing, ZHU Yi-sheng. Signal envelope extraction method: from Hilbert transform to wavelet transform[J]. *Journal of Electronics*, 1997, **19**(1): 120-123. 张绪省, 朱贻盛, 等. 信号包络提取方法: 从希尔伯特变换到小波变换[J]. *电子与信息学报*, 1997, **19**(1): 120-123.
- [14] JIA Fang-xiu, DING Zhen-liang, YUAN Feng. New phase difference measurement based on digital synchronous demodulation[J]. *Instrument Technology and Sensor*, 2009 (4): 78-80. 贾方秀, 丁振良, 袁峰. 基于数字同步解调原理的相位差测量新方法[J]. *仪表技术与传感器*, 2009(4): 78-80.
- [15] OPPENHEIM A, WILLSKY A, HAMID NAWAB S. 信号与系统(第二版)[M]. 刘树棠, 译. 西安: 西安交通大学出版社, 2007: 422-425.