

受激布里渊相移功率依赖性理论与实验研究

李永倩 安 琪* 何玉钧 胡智奇

华北电力大学电子与通信工程系, 河北 保定 071003

摘要 建模并仿真了受激布里渊散射损耗相移谱的宽范围功率依赖特性;设计了基于外差抽运-斯托克斯技术的受激布里渊损耗相移谱测量系统,在抽运光功率 $5 \mu\text{W} \sim 15 \text{ mW}$ 和斯托克斯光功率 $3.5 \sim 110 \text{ mW}$ 范围内测量了 400 m 标准单模光纤的受激布里渊损耗相移谱;分析了实测受激布里渊损耗相移谱产生中心不对称性的机理。结果表明,受激布里渊损耗相移范围与斯托克斯光功率呈良好线性关系,基本不受抽运光功率影响;实测受激布里渊损耗相移谱中心不对称性主要由光纤色散以及非线性折射率引起的非线性效应共同作用产生。根据理论和实验结果,分析了受激布里渊散射相移谱功率依赖性在微波光子信号处理和分布式光纤传感中的应用,为基于受激布里渊散射相移原理的应用系统设计提供理论依据。

关键词 散射;受激布里渊散射;相移;外差检测;抽运-斯托克斯技术;微波光子信号处理;分布式光纤传感

中图分类号 TN25 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0906001

Theoretical and Experimental Study of Power Dependence of Stimulated Brillouin Scattering Phase Shift

Li Yongqian An Qi He Yujun Hu Zhiqi

*Department of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University,
Baoding, Hebei 071003, China*

Abstract The wide range for power dependence of phase shift spectrum of stimulated Brillouin scattering (SBS) is characterized through mathematical modeling and simulation; a phase shift measurement system of SBS loss based on heterodyne pump-Stokes technique is designed. The phase shift spectrum of 400 m standard single-mode fiber in SBS loss is measured in a pump wave power range of $5 \mu\text{W} \sim 15 \text{ mW}$ and a Stokes wave power range of $3.5 \sim 110 \text{ mW}$. The mechanism of measured center-asymmetric phase shift spectrum in SBS loss is analyzed. The results indicate that phase shift range of SBS loss has a good linear relationship with Stokes wave power and is almost independent of pump wave power. The measured center-asymmetric phase shift spectrum of SBS loss is mainly caused by fiber dispersion and nonlinear effect induced by nonlinear refractive index. According to the theoretical and experimental results, the applications of power dependence of SBS phase shift spectrum in microwave photonic signal processing and distributed optic-fiber sensing are analyzed, which provides theoretical basis for the design of application systems based on SBS phase shift.

Key words scattering; stimulated Brillouin scattering; phase shift; heterodyne detection; pump-Stokes technique; microwave photonic signal processing; distributed optic-fiber sensing

OCIS codes 060.2370; 290.5900; 070.1170

1 引 言

光纤受激布里渊散射(SBS)是 2 束相向传输且频率差为光纤布里渊频移的光波通过声波场的相互作用。在 SBS 作用过程中,2 束光发生能量转移,并产生相位变化^[1]。目前,SBS 幅度特性已得到深入的研究,

收稿日期: 2016-01-23; **收到修改稿日期:** 2016-06-01

基金项目: 国家自然科学基金(61377088)、河北省自然科学基金(F2014502098)、中央高校基本科研业务费专项资金(2015XS114)

作者简介: 李永倩(1958—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光通信与光传感方面的研究。

E-mail: liyongqian1958@163.com

* **通信联系人.** E-mail: an-qi.122@163.com

相关成果广泛应用于光纤特性描述^[2]、光纤激光器^[3-4]、光纤放大器^[5]和光纤传感器^[6-9]等领域。2000年,Loayssa A等^[10]基于SBS相移原理提出1种新型微波光子信号处理技术,实现了微波信号的宽带、低噪声相移调节。此后,基于SBS相移的微波光子信号处理技术得到了广泛应用。例如,基于SBS相移原理并结合幅度响应在1.5~31 GHz频率范围内实现 2π 的微波信号的超宽带连续相移调节^[11];基于布里渊载波相移的微波信号生成技术,利用SBS相移对光强调制器产生的双边带调制信号载波进行 $\pi/2$ 相移,生成可宽带调谐的二倍频微波信号^[12];利用SBS产生的慢光效应实现微波信号的宽带时延^[13];利用SBS的幅度和相移特性实现微波信号的宽带相位-幅度调制变换^[14]。2010年,Dossou M等^[15]提出1种矢量布里渊光时域分析仪(VBOTDA),通过测量SBS相移谱实现了高阶声波模式的测量,并且减小了传统布里渊光时域分析仪(BOTDA)系统的低频噪声。自此,基于SBS相移的分布式光纤传感器得到了迅速发展。2012年,Zornoza A等^[16]在BOTDA系统中采用自外差方案,实现了沿光纤布里渊相移谱的分布式测量和10.75 dB系统信噪比的提高。2014年,涂晓波等^[17]在VBOTDA系统中利用同相正交解调算法同时测量SBS幅度谱和相移谱,实验验证了2种谱的布里渊频移与温度的关系基本一致。在上述应用中,SBS相移谱的功率依赖性对基于SBS相移的应用系统的设计与实现至关重要,但目前尚无相关研究报道。为了有效、灵活地利用SBS相移特性,有必要对SBS相移谱的功率依赖特性进行全面研究。

本文通过解析SBS稳态耦合波方程建立SBS相移谱的数学模型,并对其功率依赖性进行仿真分析;利用基于外差抽运-斯托克斯技术的SBS相移测量系统,研究SBS相移谱在宽输入光功率范围内的特性;分析功率依赖性对基于SBS相移的应用系统设计的影响。

2 原 理

2.1 SBS相移谱及其功率依赖特性

抽运光和斯托克斯光由光纤2端注入,当2束光之间的频率差在布里渊散射谱范围内时2者发生SBS作用,抽运光向斯托克斯光转移能量,在斯托克斯光被放大的同时抽运光产生损耗。当抽运光和斯托克斯光为连续光时,2者的SBS作用可用下述稳态耦合波方程表示^[18]

$$\frac{dI_p}{dz} = -\alpha I_p - g I_s I_p, \quad (1)$$

$$\frac{dI_s}{dz} = \alpha I_s - g I_p I_s, \quad (2)$$

式中 I_p 是抽运光强度, I_s 是斯托克斯光强度, α 是光纤衰减系数, g 是SBS作用的复增益系数, z 是发生SBS作用的光纤位置。假设抽运光沿 $+z$ 方向传播,斯托克斯光沿 $-z$ 方向传播,在忽略抽运损耗、增益饱和以及光纤衰减的条件下,解析(1)、(2)式可得抽运光的慢变振幅近似为^[19]

$$E_p(z, \nu) = E_p(0, \nu) \cdot \exp(-g I_s z), \quad (3)$$

式中

$$g = g_B \frac{1}{1 + 2i(\Delta\nu)/\Delta\nu_B}, \quad (4)$$

式中 g_B 是布里渊增益峰值, $\Delta\nu_B$ 是布里渊谱宽, $\Delta\nu = \nu_s - \nu_p + \nu_B$ 是抽运光和斯托克斯光之间的频率差相对布里渊频移的失谐参量, ν_s 是斯托克斯光频率, ν_p 是抽运光频率, ν_B 是光纤的布里渊频移(BFS)。由(3)式可得抽运光的SBS传输函数为

$$H_{SBS} = \exp\left[-\frac{I_s \cdot z \cdot g_B}{1 + 2i(\Delta\nu)/\Delta\nu_B}\right] = \exp(g_{SBS}) \cdot \exp(i\varphi_{SBS}), \quad (5)$$

式中 g_{SBS} 和 φ_{SBS} 分别为SBS作用的幅度和相移响应。对于长度 Δz 的光纤,SBS相移可以表示为

$$\varphi_{SBS}(P_s, \Delta\nu) = \frac{P_s}{A_{eff}} \cdot \Delta z \cdot \frac{2 \cdot g_B \cdot \Delta\nu_B \cdot \Delta\nu}{4\Delta\nu^2 + \Delta\nu_B^2}, \quad (6)$$

式中 $P_s = I_s \cdot A_{eff}$ 为斯托克斯光功率, A_{eff} 为光纤纤芯有效作用面积。由(6)式可知,当光纤长度一定时,SBS相移主要决定于斯托克斯光功率和频率失谐参量,而不受抽运光功率的影响。

利用表 1 所示的典型光纤参数,改变频率失谐 $\Delta\nu$,可绘出如图 1 所示的 SBS 损耗相移谱。

表 1 典型光纤参数

Table 1 Typical optical fiber parameters

Parameter	$g_B / (\text{m/W})$	$\Delta\nu_B / \text{MHz}$	$\Delta z / \text{m}$	ν_B / GHz	$A_{\text{eff}} / \text{m}^2$
Value	5×10^{-11}	30	400	10.84	64×10^{-12}

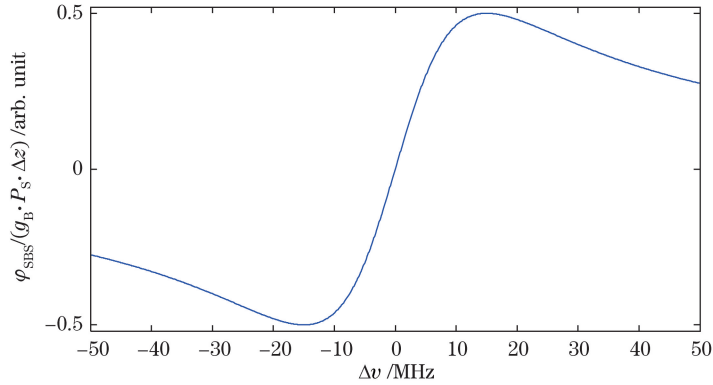


图 1 SBS 损耗相移谱

Fig. 1 Phase shift spectrum of SBS loss

图 1 中,纵坐标为 φ_{SBS} 对 g_B 、 P_s 和 Δz 的归一化值。由图 1 可知,当 $\Delta\nu$ 为 0,即抽运光与斯托克斯光的频率差为光纤的 BFS 时,SBS 相移为 0;SBS 相移谱是 1 条中心对称曲线,在对称中心两侧存在 1 个最大值和 1 个最小值;改变 $\Delta\nu$,可以改变 SBS 相移的数值和符号,SBS 相移在 BFS 附近近似呈线性变化。

令(6)式的导数为 0,可以求得当频率失谐量为布里渊谱宽的一半时,SBS 相移谱分别达到最大值和最小值,即当 $\Delta\nu = \Delta\nu_B/2$ 时,SBS 相移取最大值:

$$\max(\varphi_{\text{SBS}}) = \frac{P_s}{A_{\text{eff}}} \cdot \Delta z \cdot \frac{g_B}{2}, \quad (7)$$

当 $\Delta\nu = -\Delta\nu_B/2$ 时,SBS 相移取最小值:

$$\min(\varphi_{\text{SBS}}) = -\frac{P_s}{A_{\text{eff}}} \cdot \Delta z \cdot \frac{g_B}{2}. \quad (8)$$

由(7)、(8)式可知,2 者与斯托克斯光功率成正比,大小相等,符号相反。在 SBS 谱宽范围内,SBS 相移谱的相移范围可以由其最大值和最小值之差来表征,SBS 相移谱的相移范围与斯托克斯光功率的关系曲线如图 2 所示。由图可知,SBS 相移范围随斯托克斯光功率的增加而线性增加。

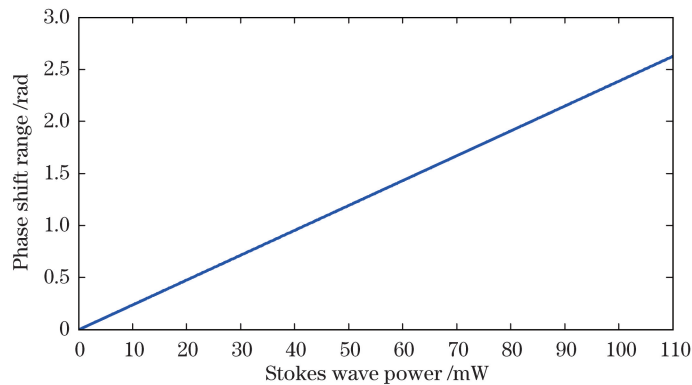


图 2 相移范围与斯托克斯光功率的关系

Fig. 2 Phase shift range versus Stokes wave power

2.2 外差抽运-斯托克斯技术

抽运-斯托克斯技术是目前应用最广泛的 1 种 SBS 功率谱测量技术,其原理为通过引入 1 个外部的斯托克斯光信号来探测抽运光产生的增益谱特性,并通过测量斯托克斯光功率随抽运光和斯托克斯光之间的频

率差的变化来实现。但是这种技术无法测量 SBS 相移。为了实现损耗型 SBS 相移谱的测量,需要在传统抽运-斯托克斯技术基础上引入 1 个相干本振光,同时将抽运光作为探测光,与本振光在光纤中同向传输。外差抽运-斯托克斯技术原理示意图如图 3 所示,斯托克斯光与相向传输的抽运光发生 SBS 作用;本振光与抽运光同向传输,二者的频率差 $\nu_0 \ll \nu_B$, 以保证本振光不与斯托克斯光发生 SBS 作用。

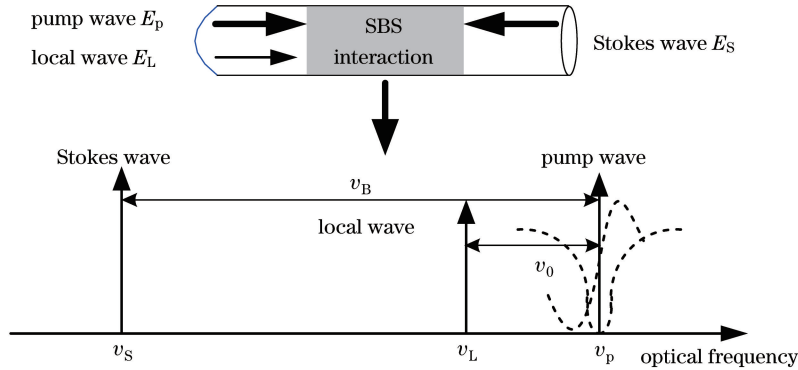


图 3 外差抽运-斯托克斯技术原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of heterodyne pump-Stokes technique

此时,经 SBS 损耗作用的抽运光与本振光的拍频信号可表示为

$$I(\nu_0) = RE_p E_L (1 - g_{SBS}) \cos(2\pi\nu_0 t - \varphi_{SBS}), \quad (9)$$

式中 E_p 和 E_L 分别为抽运光和本振光的光场幅度, R 为光电检测器的响应度。由(9)式可知,拍频信号中包含 SBS 作用的幅度和相移信息,通过测量 $I(\nu_0)$ 可以获得 SBS 损耗的幅度和相移响应,从而解决了传统抽运-斯托克斯技术仅能检测幅度响应而不能检测相移响应的问题。同时,为了利用示波器实现 SBS 相移的测量,引入 1 个参考信号

$$I_R(\nu_0) = \cos(2\pi\nu_0 t), \quad (10)$$

由(9)、(10)式可知,拍频信号和参考信号之间的相位差即为 SBS 相移。

3 实验装置

设计了基于外差抽运-斯托克斯技术的 SBS 损耗相移谱及其功率依赖性测量系统,如图 4 所示。为了减小激光器线宽对相移测量的影响,系统选用线宽为 10.3 kHz、中心波长为 1550 nm 的高相干性窄谱激光器光源,光源输出的连续光由保偏耦合器(PM coupler)分为 2 路,上支路经掺铒光纤放大器 1(EDFA1)放大,由环行器 1 和光栅 1(Bragg grating1)组成的光滤波器 1 滤除放大自发辐射(ASE)噪声,再由扰偏频率为 700 kHz 的扰偏器(PS)扰偏后作为斯托克斯光经环行器 3 进入测试光纤。PS 以很快的速度扰乱斯托克斯光的偏振态,减小因斯托克斯光与抽运光偏振态不一致导致的 SBS 作用的起伏。下支路由微波信号源驱动的电光调制器(EOM)调制为抑制载波的双边带信号,经 EDFA2 放大后进入由环行器 2 和光栅 2 组成的光滤波器 2 滤除下边带和 ASE 噪声,然后作为抽运光进入马赫-曾德尔干涉仪(MZI)。MZI 的上臂中插入偏振控制器(PC)控制抽运光偏振态以保证本振光与抽运光之间的拍频信号最大;下臂由驱动频率为 200 MHz 的声光频移器(AOFS)下移频抽运光作为本振光。包含抽运光和本振光的 MZI 输出由耦合器 2 分为 2 路,一路进入测试光纤与相向传输的斯托克斯光发生 SBS 作用,由光电探测器 1(PD1)进行外差检测,提取频率为 200 MHz 的正弦拍频信号作为检测信号;另一路直接由 PD2 进行外差检测提取相同频率的正弦拍频信号作为参考信号。隔离器(ISO)用来保证 MZI 不受斯托克斯光影响。示波器(OSC)通道 1 采集进入光纤发生 SBS 作用的检测信号,通道 2 采集未进入光纤的参考信号,利用示波器检测 2 者的相位差即可实现 SBS 相移的测量;在光纤布里渊频移 10.844 GHz 附近改变微波信号源频率,可以调节抽运光和斯托克斯光的频率差,从而实现 SBS 损耗相移谱的测量;改变抽运光和斯托克斯光功率,可以实现 SBS 损耗相移谱功率依赖性的测量。实验中,为了减小 ASE 噪声对测量结果的影响,选取中心波长 1549.986 nm、带宽 0.298 nm 的光纤光栅 1 和中心波长 1549.967 nm、带宽 0.296 nm 的光纤光栅 2 可最大限度地滤除 ASE 噪声,并利用示波器

对采集的信号进行 512 次的叠加平均。

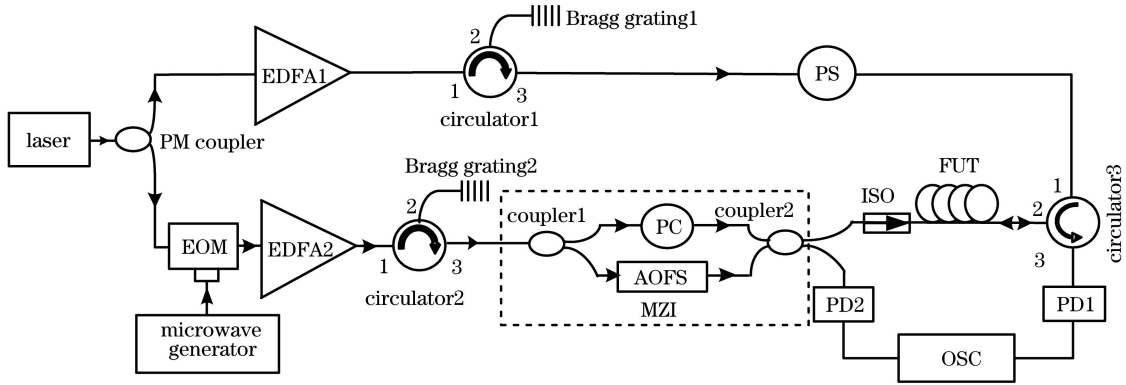


图 4 SBS 损耗相移谱及其功率依赖性测量系统

Fig. 4 Measurement system of SBS loss phase shift spectrum and its power dependence

4 实验结果及讨论

利用图 4 所示测量系统实现 SBS 损耗相移谱及其宽范围功率依赖性的测量。选取长度为 400 m 的普通单模通信光纤 G.652 作为测试光纤,并将其呈自然松弛状态放置,通过调节空调设置温度保持室温基本恒定;设置系统本振光功率 $500 \mu\text{W}$ 保持不变;固定 1 个抽运光功率和 1 个斯托克斯光功率值,通过调节微波信号源,使其频率在 $10.792 \sim 10.888 \text{ GHz}$ 范围内以 4 MHz 为步进改变频率失谐量;在每 1 个微波信号源频率下,PD1 检测进入光纤发生 SBS 损耗作用的抽运光和本振光的拍频信号作为检测信号,PD2 检测未进入光纤的抽运光和本振光的拍频信号作为参考信号,示波器采集 PD1 和 PD2 的输出波形及 2 者的相位差,获得 1 组 SBS 相移谱;按上述方法对每个设定的抽运-斯托克斯光功率下的 SBS 相移谱进行 3 次测量,求 3 次测量数据的平均值,并利用最小均方根拟合算法对实验数据进行拟合,绘出的不同抽运-斯托克斯功率下的 SBS 损耗相移谱如图 5 所示,图中不同形状的符号表示实际测量值,线表示利用最小均方根算法对实验数据进行拟合得到的拟合曲线。由图 5 可见,当抽运光和斯托克斯光功率固定时,改变抽运光与斯托克斯光之间的频率差,SBS 相移的大小和符号也发生相应的变化,测得的相移谱与仿真得到的相移谱形状一致。由图 5 (a)可见,当抽运光功率固定时,随着斯托克斯光功率的增加,SBS 相移增大;除 90 mW 斯托克斯光功率对应的相移谱外,其他斯托克斯光功率下测得的 SBS 相移谱都相交于同一点,此时 SBS 相移为 0 对应的抽运光与斯托克斯光频率差即为光纤的 BFS。 90 mW 斯托克斯光功率时的 SBS 相移曲线与其他曲线不相交于同一点,这可能是由于测量时室温变化产生的测量误差。由图 5(a)、(b)可知,测试光纤的 BFS 为 10.844 GHz ,其不受抽运光和斯托克斯光功率的影响。

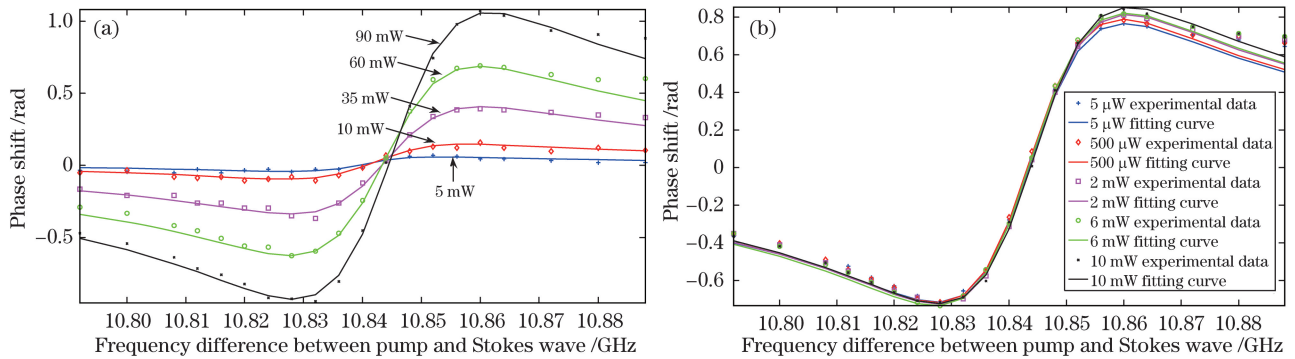


图 5 不同输入光功率时测量的 SBS 损耗相移谱。(a)抽运光功率固定 $5 \mu\text{W}$ 且斯托克斯光功率不同;

(b)斯托克斯光功率固定 70 mW 且抽运光功率不同

Fig. 5 Measured phase shift spectra of SBS loss at various incident wave powers. (a) pump wave power is $5 \mu\text{W}$ and Stokes wave powers are different; (b) Stokes wave power is 70 mW and pump wave powers are different

由图 5 所示曲线可以看出,测得的 SBS 相移谱最大值和最小值不关于中心点(10.844, 0)对称,相移谱最大值的数值大于最小值的数值;斯托克斯光和抽运光功率越大,偏差也越大。这种偏差主要产生于光纤色散和非线性折射率引起的非线性效应的影响。实验中,抽运光与本振光在光纤中同向传输,经外差检测后的差频信号相位除 SBS 相移外还包含因光纤色散产生的相位差:

$$\Delta\varphi_{\text{dis}} = \varphi_p - \varphi_L = 2\pi\left(\frac{n_p}{\lambda_p} - \frac{n_L}{\lambda_L}\right) \cdot z, \quad (11)$$

式中 φ_p 和 φ_L 分别为抽运光和本振光在光纤中传输时产生的相移, λ_p 和 λ_L 分别为抽运光和本振光的波长, n_p 和 n_L 分别为抽运光和本振光对应的光纤折射率。由(11)式可知,由于 2 束光波长不同,光纤折射率也不同,因此 $\Delta\varphi \neq 0$, $\Delta\varphi$ 与 SBS 相移叠加使测得的 SBS 相移值与理论值存在一定的偏差。

此外,光纤作为 1 种非线性光学介质,入射光强度会引起光纤材料折射率的变化,它们的关系可以表示为^[20]

$$n = n_0 + \frac{n_2 P}{A_{\text{eff}}}, \quad (12)$$

式中 n_0 为线性折射率, n_2 为非线性折射率, P 为入射光功率。入射光功率变化造成的折射率扰动会引起自相位调制和交叉相位调制等非线性效应。自相位调制是光在光纤内传输时光信号强度随时间的变化对自身相位的作用;交叉相位调制是任一波长光信号的相位受其他波长光信号强度起伏的调制产生的,不仅与光波自身强度有关,而且与其他同时传输的光波的强度有关。自相位调制和交叉相位调制引起的非线性相移为^[20]

$$\Delta\varphi_{\text{non}} = \gamma L_{\text{eff}} [P_p + 2(P_s + P_L)], \quad (13)$$

式中 γ 为光纤的非线性系数, P_p 和 P_L 分别为抽运光和本振光功率。由(13)式可知斯托克斯光和抽运光功率越大,由光纤非线性折射率引起的非线性相移也越大,这与图 5 所示的实验结果相近。实验中本振光功率 P_L 不变,抽运光功率对 SBS 损耗相移影响很小,因此斯托克斯光功率引起的非线性相移起主要作用。同时,光纤中的非线性效应和色散效应之间会发生相互作用造成调制不稳定性现象的出现^[21],调制不稳定性、非线性效应和光纤色散共同对光信号相位产生影响。由上述分析可知,实验中 SBS 相移偏差主要由光纤中的色散和多种非线性效应共同作用产生,作用机理比较复杂,在实际应用中,需通过合理的检测方案设计、补偿算法或功率设置来减少这些因素对 SBS 相移谱测量的影响。

为了进一步阐明 SBS 损耗相移谱的宽范围功率依赖性,图 6 给出了 SBS 损耗相移范围与入射光功率的关系曲线。图 6(a)为不同抽运光功率时抽运光的 SBS 相移范围与斯托克斯光功率的关系,由图可见,SBS 相移范围随斯托克斯光功率的增加呈线性增长趋势;当斯托克斯光功率固定时,不同抽运光功率下的 SBS 相移有较小的差异,这种实际测量值与(7)、(8)式理论值的差别是由于上述理论值是在忽略抽运耗尽和增益饱和条件下得到的,因此图 6(a)给出的结果与理论值具有良好的一致性。图 6(b)为不同斯托克斯光功率时 SBS 相移范围与抽运光功率的关系,由图可知与斯托克斯光功率不同,抽运光功率基本不影响 SBS 的相移范围。图 6(b)再次说明实验结果与(7)、(8)式相吻合。

结合图 5 和图 6 可知,在抽运光与斯托克斯光的 SBS 作用过程中,抽运光的 SBS 相移决定于斯托克斯光功率和频率失谐参量,基本不受抽运光功率影响;在宽功率范围内,抽运光的 SBS 相移范围受斯托克斯光功率线性控制,通过增加斯托克斯光功率可以线性地放大 SBS 相移;其次,改变 2 束光的频率差可以改变 SBS 相移的大小及符号,通过将频率失谐参量设置为布里渊谱宽的半值点,可以获得最大的 SBS 相移。

5 应 用

5.1 微波光子信号处理

基于 SBS 损耗作用机理的微波光子信号处理技术可通过对光信号幅度和相位的窄带选择性处理实现对光信号携带信息的处理,其作用原理如图 7 所示。

作为抽运光的输入光信号进入 SBS 信号处理单元的光纤中,在光纤另一端引入频率较输入光信号近似低布里渊频移的作用光,改变作用光的频率和功率可实现对输入光信号的处理。由图 5 可知,改变作为斯托

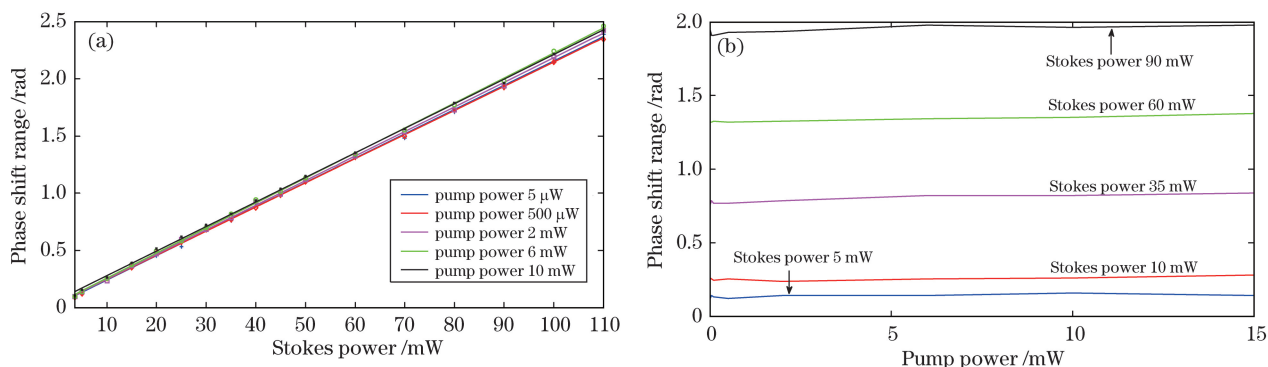


图 6 SBS 损耗相移范围与入射光功率的关系。(a)不同抽运光功率下相移范围与斯托克斯光功率的关系；
(b)不同斯托克斯光功率下相移范围与抽运光功率的关系

Fig. 6 Phase shift range of SBS loss versus incident wave power. (a) Phase shift range versus Stokes power at different pump powers; (b) phase shift range versus pump power at different Stokes powers

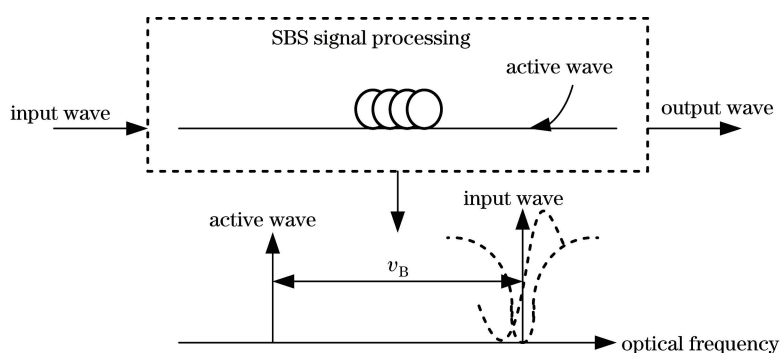


图 7 布里渊光子信号处理技术原理示意图

Fig. 7 Schematic diagram of Brillouin photonic signal processing technique

克斯光的作用光频率可以改变输入光信号相移的大小和符号。因此,在实际应用中,通过设置作用光的频率可实现对输入光相移大小和方向的调节;由图 6 可知,抽运光相移范围的大小在宽功率范围内随斯托克斯光功率线性变化,因此将作用光设置为斯托克斯光,输入光信号作为抽运光,并使频率失谐量等于布里渊谱宽的一半,则可通过增大作用光功率拓宽输入光信号的相移范围,并可通过 SBS 损耗作用对输入光信号的相位和幅度进行调整。因受条件限制,实验中可获得的最大抽运光功率为 110 mW,对应地,在 400 m 标准单模光纤上获得的最大 SBS 相移为 2.46 rad,实际应用中,通过选用较长的光纤和增大作用光功率可获得 $0 \sim 2\pi$ 的相移调节范围。实验结果表明,作为检测光的抽运光功率对 SBS 相移的影响很小,即在布里渊光子信号处理中输入光信号功率不影响作用光对其相移的调节,这一特点有利于减小输入光功率起伏带来的相移调节误差。

5.2 分布式光纤传感

在传统布里渊光时域分析传感系统中,利用相向传输的连续探测光和脉冲激励光之间的 SBS 作用,通过改变 2 束光的频率差得到在特定光频差下的探测光信号功率,然后由探测光信号功率的频谱分布得到沿传感光纤的布里渊频移分布,最后根据频移与温度或应变的关系,得到沿光纤分布的温度或应变信息。近年来出现的 VBOTDA 系统中,采用外差检测和相移检测技术实现传感,可有效降低光源频率漂移和抽运耗尽产生的非本地效应对系统性能的影响,展现了很好的应用前景。由图 5 可知,通过改变抽运光与斯托克斯光之间的频率差可实现 SBS 相移谱的中心对称扫描,使系统工作在光纤布里渊频移附近的线性区;其次,SBS 损耗相移受斯托克斯光功率的线性控制,基本不受抽运光功率的影响,因此将脉冲调制后的斯托克斯光作为激励光、连续抽运光作为探测光,可构成损耗型布里渊相移分布式传感系统。进行系统设计时,在保证不发生单端 SBS 作用的前提下,设置尽可能高的斯托克斯脉冲光功率可增大 SBS 相移,从而提高布里渊频移的测量精度;适当设置较高的抽运光功率可提高传感系统对抽运耗尽的容限,从而有利于提高检测信号的信噪

比和系统的测量精度。

6 结 论

通过建立抽运光的 SBS 传输函数模型,推导了 SBS 损耗相移的表达式,仿真分析了 SBS 损耗相移的功率依赖性;利用设计的基于外差抽运-斯托克斯技术的 SBS 损耗相移谱测量系统,测量了 SBS 损耗相移谱的宽范围功率特性,分析了实测 SBS 损耗相移谱产生中心不对称性的机理;探讨了 SBS 损耗相移谱功率依赖性在微波光子信号处理和分布式光纤传感系统设计中的应用。结果表明,SBS 损耗相移范围随斯托克斯光功率的增加呈线性增长的趋势,基本不受抽运光功率的影响;实测 SBS 损耗相移谱中心不对称性主要产生于光纤色散和非线性折射率引起的非线性效应,实际应用中需通过合理的检测方案设计、补偿算法或功率设置来消除这种影响。研究结果为基于 SBS 相移原理的应用系统设计提供了重要的理论依据。

参 考 文 献

- 1 Boyd R W. Nonlinear Optics[M]. New York: Academic Press, 2007: 429-472.
- 2 Horiguchi T, Tateda M. BOTDA-nondestructive measurement of single-mode optical fiber attenuation characteristics using Brillouin interaction: theory[J]. Journal of Lightwave Technology, 1989, 7(8): 1170-1176.
- 3 Chen M, Meng Z, Tu X B, *et al.* Low-noise, single-frequency, single-polarization Brillouin/erbium fiber laser[J]. Optics Letters, 2013, 38(12): 2041-2043.
- 4 Liu Yi, Yu Jinlong, Wang Hongjie, *et al.* Tunable multiwavelength Brillouin-erbium fiber laser based on feedback fiber loop[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0202003.
刘毅, 于晋龙, 王红杰, 等. 基于反馈光纤环的可调多波长布里渊掺铒光纤激光器[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0202003.
- 5 Kotov L V, Likhachev M E, Bubnov M M, *et al.* Record peak power single-frequency erbium-doped fiber amplifiers[C]. SPIE, 2015, 9344: 934408.
- 6 Soto M A, Bolognini G, Di Pasquale F. Long-range simplex-coded BOTDA sensor over 120 km distance employing optical preamplification[J]. Optics Letters, 2011, 36(2): 232-234.
- 7 Wang Xue, Lu Yuangang, Zhang Xuping, *et al.* Calculation method of strain and temperature coefficients for fibers with multimode acoustic waveguide structure[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(6): 0606003.
王雪, 路元刚, 张旭苹, 等. 多模声波导结构光纤的应变与温度系数计算方法[J]. 光学学报, 2015, 35(6): 0606003.
- 8 Li Yongqian, Li Xiaojuan, An Qi. New method to improve the performance of Brillouin optical time domain reflectometer system[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0106003.
李永倩, 李晓娟, 安琪. 提高布里渊光时域反射系统传感性能的方法[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0106003.
- 9 Li Yongqian, Zhao Xu, Zhao Lijuan, *et al.* Brillouin scattering parameters of different modes in multimode optical fibers[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(3): 0319002.
李永倩, 赵旭, 赵丽娟, 等. 多模光纤不同模式布里渊散射参数[J]. 光子学报, 2015, 44(3): 0319002.
- 10 Loayssa A, Benito D, Garde M J. Optical carrier Brillouin processing of microwave photonic signals[J]. Optics Letters, 2000, 25(17): 1234-1236.
- 11 Pagani M, Marpaung D, Eggleton B J. Ultra-wideband microwave photonic phase shifter with configurable amplitude response[J]. Optics Letters, 2014, 39(20): 5854-5857.
- 12 Zheng Di, Pan Wei, Yan Lianshan, *et al.* Widely tunable frequency-doubling microwaves generated using Brillouin-assisted carrier phase shift[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(15): 154214.
郑狄, 潘炜, 闫连山, 等. 基于布里渊载波相移的宽带可调谐二倍频微波信号生成[J]. 物理学报, 2014, 63(15): 154214.
- 13 Chin S, Thévenaz L, Sancho J, *et al.* Broadband true time delay for microwave signal processing, using slow light based on stimulated Brillouin scattering in optical fibers[J]. Optics Express, 2010, 18(21): 22599-22613.
- 14 Li W, Zhu N H, Wang L X, *et al.* Broadband phase-to-intensity modulation conversion for microwave photonics processing using Brillouin-assisted carrier phase shift[J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(24): 3616-3621.
- 15 Dossou M, Bacquet D, Szriftgiser P. Vector Brillouin optical time-domain analyzer for high-order acoustic modes[J]. Optics Letters, 2010, 35(22): 3850-3852.
- 16 Zornoza A, Sagues M, Loayssa A. Self-heterodyne detection for SNR improvement and distributed phase-shift

- measurements in BOTDA[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(8): 1066-1072.
- 17 Tu X B, Sun Q, Chen W, *et al.* Vector Brillouin optical time-domain analysis with heterodyne detection and IQ demodulation algorithm[J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(2): 6800908.
- 18 Govind P A. Nonlinear fiber optics[M]. New York: Academic Press, 1989.
- 19 Okawachi Y, Bigelow M S, Sharping J E, *et al.* Tunable all-optical delays via Brillouin slow light in an optical fiber[J]. Physical Review Letters, 2005, 94(15): 153902.
- 20 Gu Wanyi, Huang Yongqing, Chen Xue, *et al.* Optical fiber communications[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2011: 33-34.
顾畹仪, 黄永清, 陈 雪, 等. 光纤通信[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011: 33-34.
- 21 Govind P A. Nonlinear fiber optics[M]. New York: Academic Press, 2008.