

增益型受激布里渊相移谱宽范围功率特性

李永倩, 安 琪, 李晓娟, 张立欣

(华北电力大学 电子与通信工程系, 河北 保定 071003)

摘 要: 相移谱的功率依赖特性对矢量布里渊光时域分析系统的优化设计具有重要意义。对增益型受激布里渊散射(SBS)相移谱进行了建模分析;搭建了外差 pump-Stokes 系统,在 5~90 mW 泵浦光功率和 5 μ W~9 mW 斯托克斯光功率范围内测量了 400 m 标准单模光纤的增益型 SBS 相移谱;分析了 Stokes 光功率影响增益型 SBS 相移的机理。结果表明:当固定 Stokes 光功率时,增益型 SBS 相移范围与泵浦光功率成良好线性关系;因泵浦耗尽作用的影响,导致当 Stokes 光功率由 5 μ W 上升至 8 mW 时,增益型 SBS 相移范围的泵浦光功率灵敏度由 1.448($^{\circ}$)/mW 下降至 1.156($^{\circ}$)/mW。根据理论和实验结果,对增益型 VBOTDA 系统进行了优化设计分析,为其在长距离和高精度传感领域的发展奠定了基础。

关键词: 受激布里渊散射; 相移谱; 外差检测; 矢量布里渊光时域分析

中图分类号: TN25 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0106001

Wide power range characteristics of phase shift spectrum of stimulated Brillouin gain

Li Yongqian, An Qi, Li Xiaojuan, Zhang Lixin

(Department of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: The power dependence of phase shift spectrum is very important for the optimization design of vector Brillouin optical time domain analysis (VBOTDA) system. The phase shift spectrum of stimulated Brillouin scattering (SBS) gain was analyzed by mathematical modeling; the phase shift spectrum of SBS gain in 400 m long standard single-mode fiber was measured in a pump wave power range of 5–90 mW and a Stokes wave power range of 5 μ W–9 mW by a heterodyne pump–Stokes system; the mechanism of Stokes wave power dependence of SBS gain phase shift was analyzed. The results indicated that the phase shift range of SBS gain had a good linear relationship with pump wave power for a fixed Stokes wave power; the pump power sensitivity of phase shift range of SBS gain decreased from 1.448 ($^{\circ}$)/mW to 1.156 ($^{\circ}$)/mW with the increase of Stokes power from 5 μ W to 8 mW due to pump depletion. According to the theoretical and experimental results, the optimization design of VBOTDA system based on SBS gain was discussed, which provides a basis for the development of SBS gain based VBOTDA system in the field of long distance and high precision sensing.

Key words: stimulated Brillouin scattering; phase shift spectrum; heterodyne detection; vector Brillouin optical time domain analysis

收稿日期: 2016-05-10; 修订日期: 2016-06-20

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, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光通信与光传感技术方面的研究。Email: liyongqian1958@163.com

0 引言

受激布里渊散射(SBS)是光纤中主要的非线性效应之一。当两束相向传输、频率差在布里渊散射谱范围内的光信号在光纤中发生 SBS 作用时,高频光向低频光转移能量,二者的相位也发生变化^[1]。SBS 效应因其对入射光功率和相位的改变作用,在诸多领域得到了广泛的应用。其中基于 SBS 原理的布里渊光时域分析(BOTDA)传感器因其对温度和应变的高精度、长距离测量^[2-6],受到了国内外学者的广泛关注。传统 BOTDA 系统利用连续探测光和脉冲激励光之间的 SBS 能量转移作用,通过直接检测沿光纤传输的探测光信号的功率谱获得光纤布里渊频移,利用布里渊频移与温度/应变的关系实现沿光纤的温度/应变测量。但传统 BOTDA 系统无法获取探测光相位,因此无法利用 SBS 作用的相移响应进行传感。2010 年, M. Dossou 等人提出一种矢量布里渊光时域分析(VBOTDA)系统,成功测得 SBS 相移谱^[7]。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, A. Zornoza 等人提出了基于自外差和射频同步解调技术的 BOTDA 系统,实现了沿光纤 SBS 相移谱的分布式测量^[8],提高了系统信噪比和测量精度,拓展了传感距离。2014 年,涂晓波等人利用基于正交解调算法的 VBOTDA 系统,同时测量 SBS 幅度谱和相移谱,测得两种谱的布里渊频移的温度依赖关系分别为 1.166 MHz/°C 和 1.159 MHz/°C^[9],证明了 SBS 相移谱在分布式光纤传感应用中的可行性。入射光功率对光纤传感系统信噪比和测量精度有直接影响,研究 SBS 相移谱的功率依赖特性对基于 SBS 相移谱原理的 VBOTDA 光纤传感系统设计至关重要,但目前尚无相关研究报道。

文中通过研究增益型 SBS 作用原理,建立增益型 SBS 相移谱的数学模型;实验研究增益型 SBS 相移谱在宽输入光功率范围内的变化特性;基于 SBS 相移谱的功率依赖特性对 VBOTDA 系统的优化设计问题进行分析。

1 原理

1.1 增益型 SBS 相移谱建模分析

光纤中的 SBS 作用原理示意图如图 1 所示,图

中 E_s 和 E_p 分别为 Stokes 光和泵浦光的光场幅度, ν_s 和 ν_p 分别为 Stokes 光和泵浦光的频率, ν_B 为光纤的布里渊频移。Stokes 光由光纤 $z=0$ 端注入,泵浦光由光纤 $z=L$ 端注入,当 Stokes 光与泵浦光之间的频率差在布里渊谱作用范围内时,二者发生 SBS 作用。因 $\nu_p > \nu_s$,泵浦光向 Stokes 光转移能量,同时二者发生相位改变。对 Stokes 光来说,其接受泵浦光转移的能量光功率增加,体现的是增益型 SBS 作用。

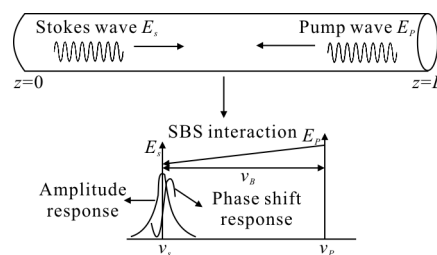


图 1 光纤 SBS 作用原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of SBS interaction in fiber

泵浦光与 Stokes 光之间的 SBS 作用可近似由下述稳态耦合波方程^[10]表示为:

$$\begin{cases} \frac{dI_p}{dz} = -\alpha I_p - gI_p I_s \\ \frac{dI_s}{dz} = \alpha I_s - gI_p I_s \end{cases} \quad (1)$$

式中: I_p 和 I_s 分别为泵浦光和 Stokes 光强度; α 为光纤衰减系数; z 为发生 SBS 作用的光纤位置; g 为 SBS 作用的复数增益系数。

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

式中: g_B 为布里渊增益峰值; $\Delta\nu_B$ 为布里渊线宽, $\Delta\nu = \nu_s - \nu_p + \nu_B$ 是泵浦光和 Stokes 光之间的频率差相对布里渊频移的失谐参量。

假设 Stokes 光沿 $+z$ 方向传输,泵浦光沿 $-z$ 方向传输,通过解析公式(1),Stokes 光的慢变振幅 $E_s(z, \nu)$ 可表示为^[11]:

$$E_s(z, \nu) = E_s(0, \nu) \cdot H_{SBS} = E_s(0, \nu) \cdot \exp(g_{SBS}) \cdot \exp(i\varphi_{SBS}) \quad (3)$$

式中: H_{SBS} 为 Stokes 光的 SBS 传输函数; g_{SBS} 和 φ_{SBS} 分别为增益型 SBS 作用的幅度和相移响应。对于长度为 Δz 的光纤,增益型 SBS 相移谱为:

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

式中: $P_p = I_p \times A_{eff}$ 为泵浦光功率; A_{eff} 为光纤纤芯有效作用面积。由公式(4)可知,当光纤长度一定时,增益

型 SBS 相移主要决定于泵浦光功率和频率失谐参量。

对公式(4)进行仿真,参数设置为: $g_B=5\times 10^{-11}$ m/W, $\Delta\nu_B=30$ MHz, $\Delta z=50$ m, $\nu_B=10.84$ GHz, $A_{\text{eff}}=64\times 10^{-12}$ m²。改变频率失谐 $\Delta\nu$,可绘出如图 2 所示的增益型 SBS 相移谱。

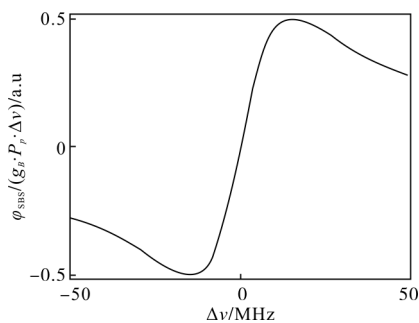


图 2 增益型 SBS 相移谱

Fig.2 Phase shift spectrum of SBS gain

图 2 中,纵坐标为 φ_{SBS} 对 g_B 、 P_p 和 Δz 的归一化值。由图 2 可知,当 $\Delta\nu$ 为 0 即泵浦光与 Stokes 光的频率差为光纤布里渊频移时,SBS 相移为 0;增益型 SBS 相移谱是一条中心对称曲线,在对称中心两侧存在一个最大值和一个最小值;改变 $\Delta\nu$ 可以改变 SBS 相移的数值和符号,SBS 相移在布里渊频移附近近似呈线性变化。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,令公式(4)的导数为 0,可以求得增益型 SBS 相移谱的相移范围为:

$$\Delta\varphi_{\text{SBS}} = \frac{P_p}{A_{\text{eff}}} \cdot \Delta z \cdot g_B \quad (5)$$

由公式(5)可知,增益型 SBS 相移谱的相移范围与泵浦光功率呈线性关系。

1.2 增益型 SBS 相移测量原理

针对传统 pump-Stokes 技术仅能检测 SBS 幅度响应无法检测其相移响应的问题,为了测量增益型 SBS 相移谱,在传统 pump-Stokes 技术基础上引入一个相干本振光,外差 pump-Stokes 技术原理示意图如图 3 所示。图中 E_L 和 ν_L 分别为本振光的光场幅度和频率,本振光与 Stokes 光在光纤中同向传输,设置本振光与 Stokes 光的频率差为 ν_0 ,以保证本振光不与泵浦光发生 SBS 作用;泵浦光与相向传输的 Stokes 光发生 SBS 作用,Stokes 光能量增加同时相位发生变化;对本振光和发生 SBS 作用的 Stokes 光

进行外差检测,可以获得包含增益型 SBS 幅度和相移的拍频信号。

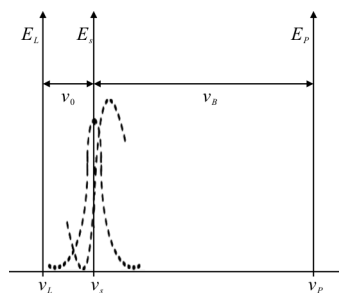


图 3 外差 pump-Stokes 技术原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of heterodyne pump-Stokes technique

检测光包含本振光与发生 SBS 作用的 Stokes 光,可表示为:

$$E_T(z, \nu) = E_s \exp(j2\pi\nu_s t) \cdot H_{\text{SBS}} + E_L \exp[j2\pi(\nu_s - \nu_0)t] \quad (6)$$

假设 $g_{\text{SBS}} \ll 1$,则公式(6)可表示为:

$$E_T(z, \nu) = (1 + g_{\text{SBS}}) E_s \exp[j(2\pi\nu_s t + \varphi_{\text{SBS}})] + E_L \exp[j2\pi(\nu_s - \nu_0)t] \quad (7)$$

经外差检测后的拍频信号为:

$$I(\nu_0) = R(1 + g_{\text{SBS}}) E_s E_L \cos(2\pi\nu_0 t + \varphi_{\text{SBS}}) \quad (8)$$

式中: R 为光电检测器的响应度。由公式(8)可知,拍频信号中包含增益型 SBS 作用的幅度和相移响应,对拍频信号进行幅度和相位解调,即可得到增益型 SBS 作用的幅度和相移信息。

2 实验及结果分析

2.1 实验装置

为了研究增益型 SBS 相移谱及其功率依赖性,设计了基于外差 pump-Stokes 技术的 SBS 相移谱测量系统,如图 4 所示。系统选用线宽 10.3 kHz、中心波长 1 550 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)分为两路,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)扰偏后作为泵浦光经环行器 3 进入测试光纤。PS 的作用是以很快的速度扰乱泵浦光的偏振态,减小因泵浦光与 Stokes 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

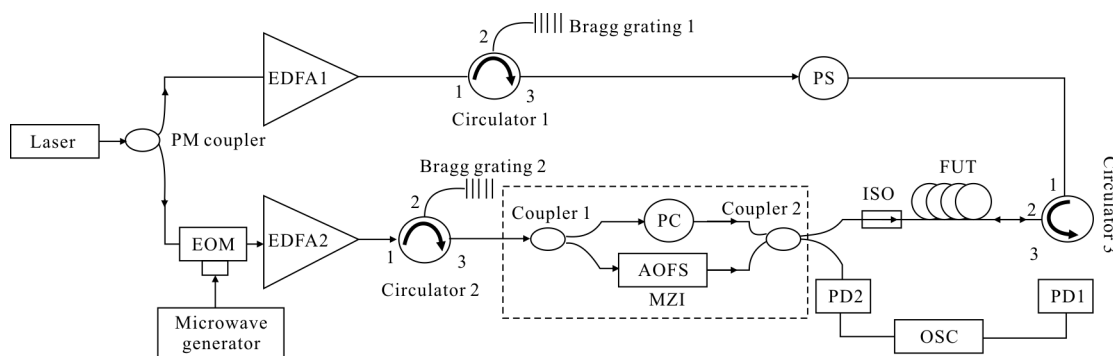


图 4 基于外差 pump-Stokes 技术的 SBS 相移谱测量系统

Fig.4 Measurement system of SBS phase shift spectrum based on heterodyne pump-Stokes technique

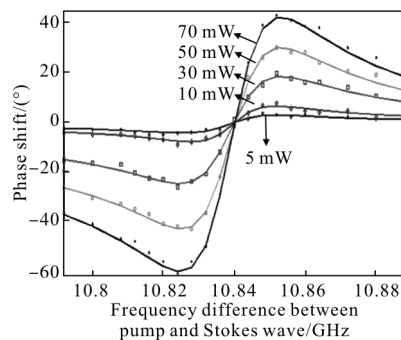
波器 2, 滤除上边带和 ASE 噪声后作为 Stokes 光进入马赫-曾德干涉仪(MZI)。MZI 的上臂中插入偏振控制器 (PC) 控制 Stokes 光偏振态以保证本振光与 Stokes 光之间的拍频信号最大; 下臂由驱动频率为 200 MHz 的声光频移器(AOFS)对 Stokes 光进行下移频作为本振光。包含 Stokes 光和本振光的 MZI 输出由耦合器 2 分为两路, 一路进入测试光纤与相向传输的泵浦光发生 SBS 作用, 由光电检测器 1(PD1) 进行外差检测, 提取频率为 200 MHz 的正弦拍频信号作为检测信号。另一路直接由 PD2 进行外差检测提取相同频率的正弦拍频信号作为实现 SBS 相移测量而引入的参考信号。隔离器(ISO)用来保护 MZI 不受泵浦光影响。由于引入的参考信号与检测信号同源同频, 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, 利用示波器对二者进行 512 次叠加平均并检测二者的相位差即可实现 SBS 相移的测量。在光纤布里渊频移 10.84 GHz 附近改变微波信号源频率, 可以调节泵浦光和 Stokes 光的频率差, 从而实现增益型 SBS 相移谱的测量; 改变泵浦光和 Stokes 光功率, 可以实现增益型 SBS 相移谱功率依赖性的测量。

2.2 实验结果及分析

文中利用图 4 所示系统测量了增益型 SBS 相移谱及其宽范围功率依赖性。选择长度 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; 设置本振光功率 500 μ W 保持不变; 固定一个泵浦光功率和一个 Stokes 光功率值, 通过调节微波信号源频率在 10.792~10.888 GHz 范围内以 4 MHz

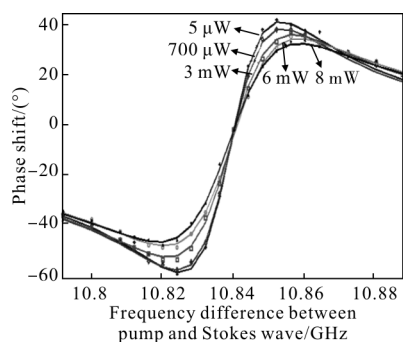
为步进改变频率失谐量; 在每一个微波信号源频率下, PD1 检测进入光纤的本振光和发生增益型 SBS 作用的 Stokes 光的拍频信号并转换为相应的电信号, PD2 检测未进入光纤的本振光和 Stokes 光的拍频信号并转换为相应的电信号, 示波器采集 PD1 和 PD2 的输出波形及二者的相位差, 获得一个 SBS 相移谱。按上述方法对每个设定的泵浦-Stokes 光功率下的 SBS 相移谱进行三次测量, 求三次测量数据的平均值, 并利用最小均方根拟合算法对实验数据进行拟合, 绘出的不同泵浦-Stokes 光功率下的增益型 SBS 相移谱如图 5 所示。图中不同形状的符号表示实际测量值, 线表示利用最小均方根拟合算法对实验数据进行拟合得到的拟合曲线。

由图 5 可见, 当泵浦光功率和 Stokes 光功率固定时, 改变泵浦光与 Stokes 光之间的频率差, SBS 相移的大小和符号也会相应改变, 测得的相移谱与公式(4)和图 2 相吻合; 在不同的泵浦-Stokes 输入光功率组合下, 测得的相移谱相交于同一点(10.84, 0)处, 即光纤的布里渊频移(BFS)为 10.84 GHz, 光纤的 BFS 不受泵浦光和 Stokes 光功率的影响。图 5(a)中, 固定 Stokes 光



(a) Stokes 光功率固定 5 μ W 时不同泵浦光功率

(a) 5 μ W Stokes wave power with different pump wave power



(b) 泵浦光功率固定 70 mW 时不同 Stokes 光功率

(b) 70 mW pump wave power with different Stokes wave powers

图 5 不同输入光功率时测量的 SBS 增益相移谱

Fig.5 Measured phase shift spectrum of SBS gain at various incident wave powers

功率为 $5 \mu\text{W}$ 时, SBS 相移谱随泵浦光功率增大而增大;图 5(b)中,固定泵浦光功率 70 mW 时, SBS 相移谱随 Stokes 光功率增大而减小。由此可见,与公式(5)给出的结果不同,泵浦光功率和 Stokes 光功率均对增益型 SBS 相移产生影响,但二者的影响明显不同。

为了进一步阐明增益型 SBS 相移谱的宽范围输入光功率依赖性,图 6 给出了不同 Stokes 光功率下增益型 SBS 相移谱的相移范围与入射泵浦光功率的关系曲线。由图可见,在固定 Stokes 光功率时,增益型 SBS 相移范围随泵浦光功率的增加呈线性增长趋势,这与公式(5)相吻合;然而,在不同 Stokes 光功率下增益型 SBS 相移范围与泵浦光功率的关系曲线具有明显不同的斜率;当 Stokes 光功率由 $5 \mu\text{W}$ 上升至 8 mW 时,曲线的斜率由 $1.448 (^\circ)/\text{mW}$ 下降至 $1.156 (^\circ)/\text{mW}$ 。这是由于 Stokes 光功率的增加加重了泵浦耗尽效应,泵浦耗尽导致泵浦光功率降低,从而使产生的 SBS 相移降低。

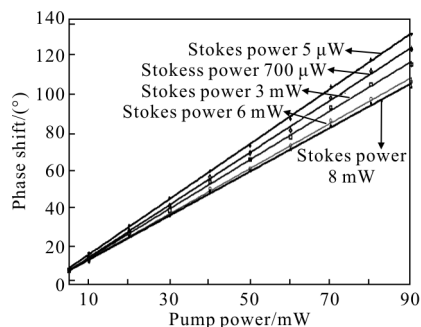


图 6 不同 Stokes 光功率时 SBS 相移范围与泵浦光功率的关系

Fig.6 SBS phase shift range versus pump power at different Stokes powers

图 7 给出了不同泵浦光功率下增益型 SBS 相移范围与 Stokes 光功率的关系曲线,其中插图为 Stokes 光功率小于 1 mW 时的放大图。由图 7 可知,增益型 SBS 相移范围主要由泵浦光功率决定,但 Stokes 光功率也对其有一定影响;当泵浦光功率一定、Stokes 光功率较小时,增益型 SBS 相移范围随 Stokes 光功率上升而下降;随着 Stokes 光功率的持续增加,这种下降趋势逐渐变缓,这是因为当泵浦光功率一定时,增加 Stokes 光功率会加强 SBS 作用,从而导致泵浦光功率因泵浦耗尽作用的加深而下降,最终导致 SBS 相移范围下降;当 Stokes 光功率持续增加时,泵浦耗尽作用严重,Stokes 光功率对 SBS 相移范围的影响变得很小,这与图 6 一致。图 6 和图 7 给出的关于 Stokes 光功率对增益型 SBS 相移范围的影响未在公式(5)中得到体现,这是因为在公式(5)的推导过程中假定 Stokes 光功率远小于泵浦光功率,忽略了泵浦耗尽、增益饱和及光纤衰减等的影响。

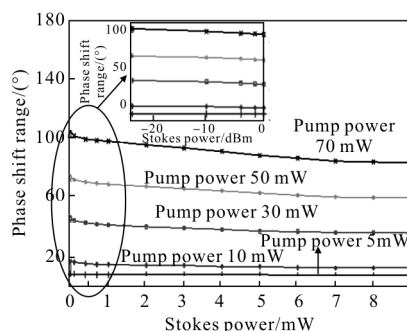


图 7 不同泵浦光功率时 SBS 相移范围与 Stokes 光功率的关系

Fig.7 SBS phase shift range versus Stokes power at different pump powers

3 增益型 VBOTDA 系统优化设计分析

增益型 VBOTDA 传感系统原理示意图如图 8 所示,连续 Stokes 光与本振光由光纤 $z=0$ 端注入,脉

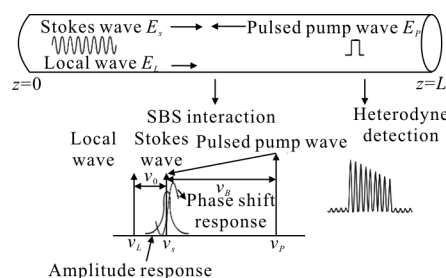


图 8 增益型 VBOTDA 原理示意图

Fig.8 Schematic diagram of SBS gain based VBOTDA

冲泵浦光由光纤 $z=L$ 端注入, 本振光和与脉冲泵浦光发生 SBS 作用的 Stokes 光由光纤 $z=L$ 端输出; 采用外差检测和相移检测技术获得 SBS 相移谱, 然后通过 SBS 相移谱得到光纤的 BFS, 再利用 BFS 与温度/应变的关系即可实现沿光纤的温度/应变传感。增益型 VBOTDA 技术可减小光源频率漂移带来的影响, 同时可降低系统中的低频强度噪声和相位噪声^[7], 在不引入其他非线性效应的条件下提高系统信噪比, 在长距离和高精度温度/应变传感领域展现了很好的应用前景。

由图 5 可知, 通过改变泵浦光与 Stokes 光之间的频率差可实现增益型 SBS 相移谱的中心对称扫描, 从而测得光纤的 BFS。由图 5 和图 6 可知, 增益型 SBS 相移范围主要依赖于泵浦光功率, 泵浦光功率越大, SBS 相移范围越大, 其频率灵敏度越高; 由图 5 和图 7 可知, Stokes 光功率通过泵浦耗尽作用对 SBS 相移产生影响, Stokes 光功率越低, 泵浦耗尽作用越小, SBS 相移范围越大, 其频率灵敏度越高。利用 SBS 相移谱获得的 BFS 不受泵浦光和 Stokes 光功率的影响, 在保证不发生单端 SBS 作用的前提下, 设置较高的脉冲泵浦光功率, 可增大 SBS 相移范围, 适当设置低的 Stokes 光功率, 有利于减小泵浦耗尽作用, 提高增益型 SBS 相移范围的泵浦光功率灵敏度, 增加 SBS 相移范围, 从而提高布里渊相移和频移的测量精度; 适当增加本振光功率可提高系统信噪比; 最终实现增益型 VBOTDA 系统的优化设计。

4 结 论

文中在深入研究 SBS 作用原理的基础上, 建模分析了增益型 SBS 相移谱的功率特性; 搭建外差 pump-Stokes 系统, 测量了增益型 SBS 相移谱及其宽范围输入光功率依赖性; 分析了 Stokes 光功率对增益型 SBS 相移谱产生影响的原因; 基于增益型 SBS 相移谱功率依赖特性分析了 VBOTDA 系统的优化设计问题。结果表明: 增益型 SBS 相移谱的相移范围主要依赖于泵浦光功率, 随泵浦光功率的增加呈线性增加的趋势; Stokes 光功率通过泵浦耗尽作用对增益型 SBS 相移产生影响, 减小 Stokes 光功率可以降低泵浦耗尽作用, 从而增大增益型 SBS 相移谱的相移范围; 在增益型 VBOTDA 系统中, 通过

对脉冲泵浦光、Stokes 光和本振光功率的合理设置, 可实现增益型 VBOTDA 系统的优化设计, 从而提高系统的测量精度和传感距离。

参 考 文 献:

- [1] Robert W B. Nonlinear Optics [M]. 3rd, NY: Academic, 2007.
- [2] Zhang Xuping, Hu Junhui, Zhang Yixin. A hybrid single-end-access BOTDA and COTDR sensing system using heterodyne detection [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(12): 1954-1959.
- [3] Hu Junhui, Zhang Xuping, Yao Yuguang, et al. A BOTDA with break interrogation function over 72 km sensing length [J]. *Optics Express*, 2013, 21(1): 145-153.
- [4] 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. (in Chinese)
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.
- [5] Hu Junhui, Xia Lan, Yang Li, et al. Strain-induced vibration and temperature sensing BOTDA system combined frequency sweeping and slope-assisted techniques [J]. *Optics Express*, 2016, 24(12): 13610-13620.
- [6] Zhao Lijuan, Li Yongqian, Xu Zhiniu. Theoretical calculation of Brillouin scattering spectrum and SBS threshold in multimode fiber [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(S): 93-98.
赵丽娟, 李永倩, 徐志钮. 多模光纤布里渊散射谱及阈值理论计算 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(S): 93-98.
- [7] Michel Dossou, Denis Bacquet, Pascal Szriftgiser. Vector Brillouin optical time-domain analyzer for high-order acoustic modes [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(22): 3850-3852.
- [8] Ander Zornoza, Mikel Sagues, Alayn Loayssa. Self-heterodyne detection for SNR improvement and distributed phase-shift measurements in BOTDA [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(8): 1066-1072.
- [9] Tu Xiaobo, Sun Qiao, Chen Wei, et al. Vector Brillouin optical time-domain analysis with heterodyne detection and IQ demodulation algorithm [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, 6(2): 6800908.
- [10] Govind P A. Nonlinear Fiber Optics [M]. CA: Academic Press, 1989.
- [11] Yoshitomo Okawachi, Matthew S B, Jay E S, et al. Tunable all-optical delays via Brillouin slow light in an optical fiber [J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(15): 153902.