

布里渊光时域反射系统中布里渊散射信号的前向和后向拉曼放大研究

毕卫红^{1,2} 杨希鹏¹ 李敬阳¹ 付兴虎^{1,2} 付广伟^{1,2}

(¹ 燕山大学信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004
² 河北省特种光纤与光纤传感重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

摘要 由于布里渊光时域反射(BOTDR)系统中布里渊散射信号非常微弱,常常导致传感距离受限,进而影响系统的信噪比和测量精度。因此,提出对 BOTDR 系统中布里渊散射信号的前向和后向拉曼放大进行研究。实验结果表明,后向抽运拉曼放大的受激布里渊散射(SBS)阈值要比前向抽运的高;当抽运功率为 700 mW 时,前向抽运放大增益可达 13.78 dB,随后出现二阶布里渊散射谱线,使得放大增益开始下降;当抽运功率为 1000 mW 时,后向抽运放大增益可达 16.33 dB,随后放大增益仍有增长的趋势,有利于对布里渊背向散射信号持续放大。

关键词 光纤光学;拉曼放大;布里渊光时域反射;受激布里渊散射

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1205007

Forward and Backward Raman Amplification of Brillouin Scattering Signal in Brillouin Optical Time Domain Reflectometer System

Bi Weihong^{1,2} Yang Xipeng¹ Li Jingyang¹ Fu Xinghu^{1,2} Fu Guangwei^{1,2}

(¹ School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China
² Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Heibei Province, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract In Brillouin optical time domain reflectometer (BOTDR) system, the Brillouin scattering signal is so weak that the sensing distance is usually limited and thus the signal to noise ratio and measurement precision are influenced in system. Therefore, the forward and backward Raman amplification of Brillouin scattering signal in BOTDR system is studied. The experimental results show that the stimulated Brillouin scattering (SBS) threshold by the backward pump Raman amplification is higher than that by the forward pump Raman amplification. When the pump power is 700 mW, the gain of the forward pump is about 13.78 dB, then the amplified gain will decrease because of the occurrence of the second order Brillouin scattering spectral line. When the pump power is 1000 mW, the gain of the backward pump is about 16.33 dB, and it still has the growth trend subsequently, which is beneficial to the continuous amplification of the Brillouin backscattering signal.

Key words fiber optics; Raman amplification; Brillouin optical time domain reflection; stimulated Brillouin scattering

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 060.4370

1 引言

近年来,基于布里渊散射的分布式传感器由于

能够同时测量温度和应力的变化,越来越受到人们的青睐,尤其适合于长距离的工业应用领域^[1]。但

收稿日期: 2014-05-14; 收到修改稿日期: 2014-06-17

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327801)、国家自然科学基金(61205068)、河北省自然科学基金(F2012203148)、河北省应用基础研究计划重点基础研究项目(12963550D)、燕山大学信息学院优秀青年基金(2014201)

作者简介: 杨希鹏(1990—),男,硕士研究生,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: 604074164@qq.com

导师简介: 毕卫红(1960—),女,博士,教授,主要从事光纤传感与光电检测方面的研究。E-mail: whbi@ysu.edu.cn

是,入射光脉冲衰减、布里渊散射信号微弱会导致布里渊光时域反射计(BOTDR)的传感距离受到限制。因此,为了满足延长传感距离和提高空间分辨率的要求,需要对系统中的布里渊散射微弱小信号进行放大。传统的掺铒光纤放大器(EDFA)^[2]增益高、插入损耗低,主要是用于光纤通信系统中的嵌入式放大或前置放大;光纤布里渊放大器^[3]能够用于普通单模光纤(SMF)的分布式放大,但这种放大器增益带宽窄(不大于 35 MHz),且噪声系数高(不小于 20 dB);而拉曼放大器^[4]可用作分布式放大器,其具有增益带宽大(不小于 100 nm)、噪声系数小(不大于 3 dB)的优点,且任何光纤都能成为放大媒介。也就是说,传感光纤本身也能作为放大媒介,放大效果能够作用于整段光纤。因此,本文提出采用光纤拉曼放大器对布里渊散射微弱小信号进行放大,并对 BOTDR 系统中布里渊散射信号的前向和后向拉曼放大进行研究。

2 基本原理

2.1 布里渊散射原理

布里渊散射是由于入射光与媒介中热运动激发的声波相互作用而产生的非线性效应。声波引起光纤折射率呈周期性的变化,使得在光纤中传播的入射光发生散射,散射光频率相对于入射光的漂移,称为布里渊频移,可用(1)式来表示^[5]:

$$\nu_B = \frac{2nV_a}{\lambda_0}, \quad (1)$$

式中 V_a 表示声波的速度, n 表示纤芯折射率, λ_0 表示入射光的波长。

理论上,布里渊散射能够发生在任何方向,但是在光纤中较强的 Stokes 光主要出现在背向散射光中^[6]。采用小信号近似,且忽略抽运损耗的话,背向 Stokes 光强^[7]可表示为

$$I_2(0) = I_2(L) \exp[G_B I_1(0) L_{\text{eff}} - \alpha L], \quad (2)$$

式中 I_1 和 I_2 分别代表入射光和 Stokes 光的光强, $I_2(L)$ 是 Stokes 光在尾端 $z = L$ 处的光强, G_B 是布里渊增益, α 是衰减系数。

2.2 拉曼放大原理

布里渊背向散射信号与高功率拉曼抽运光同时在光纤中传播时,如果布里渊信号的波长正好落入拉曼增益谱的范围内,拉曼散射就能放大这样的光信号。将一定强度的脉冲光注入光纤,并将特定波长的拉曼抽运光沿着脉冲光传播方向也注入光纤,就能够激发拉曼放大^[8],最大增益波长通常比拉曼

抽运光波长高 100 nm 左右。

假设忽略拉曼插入损耗和高阶 Stokes 光引起的抽运损耗,功率耦合方程^[9]可表示为

$$\frac{dP_s}{dz} = \frac{g_r}{A_{\text{eff}}} P_s P_p - \alpha_s P_s, \quad (3)$$

$$\frac{dP_p}{dz} = \frac{-\lambda_s g_r}{\lambda_p A_{\text{eff}}} P_s P_p - \alpha_p P_p, \quad (4)$$

式中 P 、 α 、 λ 分别代表光功率、光纤损耗和光波长。下标 p 和 s 代表抽运光和 Stokes 光。 A_{eff} 是有效纤芯面积, g_r 是拉曼增益系数。(3)、(4)式右边的第二项是由于光纤媒介中的线性损耗引起的。右边第一项则描述的是拉曼非线性耦合作用,信号光增强,抽运光衰退。从拉曼增益谱中可以看出拉曼散射产生的 Stokes 频率的分布。拉曼增益谱主要由入射光的频率和光纤材料的组成所决定。假设 $P_p \gg P_s$, 且忽略拉曼插入损耗和高阶 Stokes 光,根据小信号近似可知。在前向抽运中拉曼增益可以表示为

$$G_r(L) = \exp\left(\frac{g_r P_p L_{\text{eff}}}{K A_{\text{eff}}}\right), \quad (5)$$

式中 $L_{\text{eff}} = \frac{1}{\alpha_p} [1 - \exp(-\alpha_p L)]$ 为光纤的有效作用长度,其中 α_p 是抽运脉冲的吸收系数 ($\alpha_p \approx 4.5 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$), L 是传感光纤的长度。在(5)式中, K 是偏振因子,有效纤芯面积 $A_{\text{eff}} \approx 80 \mu\text{m}^2$,拉曼抽运波长 $\lambda_p = 1450 \text{ nm}$ 时,有 $g_r \approx 7.34 \times 10^{-14} \text{ m/W}$ 。将上述参量代入(5)式中,可得不同抽运功率下的光纤长度与拉曼增益的关系,结果如图 1 所示。

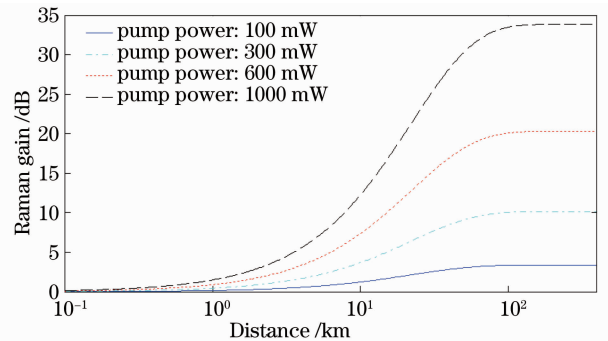


图 1 不同抽运功率下的光纤长度与拉曼增益的关系
Fig. 1 Relationship between Raman gain and fiber length under different pump powers

从图 1 中可以看出,随着光纤长度的增加,拉曼增益也在增大。而光纤长度为 50 km 时,由于抽运功率的衰减,拉曼增益逐渐变为一常量。抽运功率为 1000 mW,光纤长度为 100 km 时,拉曼增益近似为 33 dB,与抽运功率呈线性关系(线性系数为 3.3 dB/100 mW)。此外,从(5)式中可以看出拉曼

增益受许多因素的影响,如抽运功率、光纤损耗、光纤有效面积和增益系数。其中,抽运功率和拉曼增益系数是最主要的影响因素。拉曼增益系数决定了信号光和抽运光耦合作用,它的值是由抽运光的波长决定的。因此,为了使拉曼增益最大,需要选择合适的抽运功率以及抽运波长。一般而言,信号光在 1550 nm 时,选择 1450 nm 左右的抽运光能获得最

佳放大效果^[10]。

3 实验装置

设计的 BOTDR 系统中分布式光纤拉曼放大实验结构如图 2 所示。其中图 2(a)为前向放大实验装置图,图 2(b)为后向放大实验装置图。

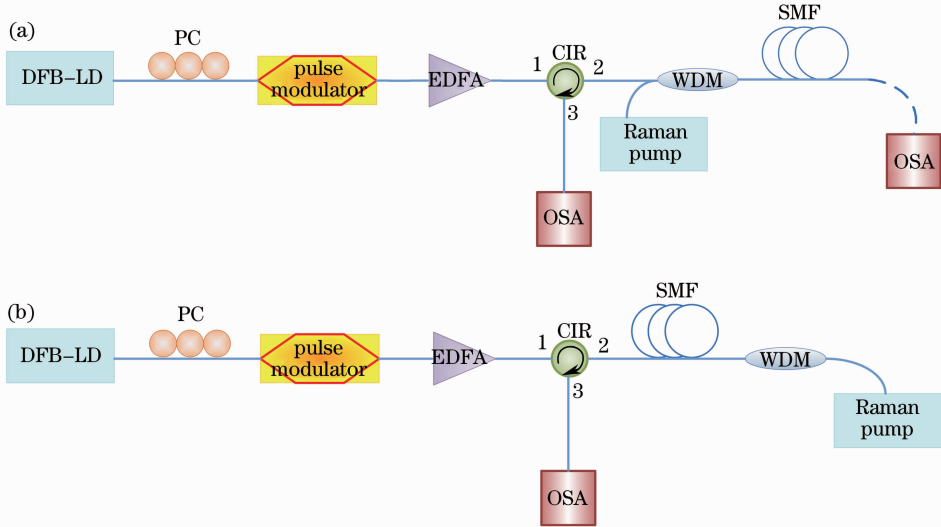


图 2 BOTDR 系统中分布式光纤拉曼放大实验结构。(a) 前向放大; (b) 后向放大

Fig. 2 Experimental setup of distributed fiber Raman amplification in BOTDR system. (a) Forward amplification; (b) backward amplification

图 2 所示的实验结构主要由以下几部分组成:中心波长为 1549.60 nm,线宽为 3.9 kHz,输出功率为 20 mW 的分布式反馈半导体激光器(DFB-LD);偏振控制器(PC);光脉冲调制器;脉冲 EDFA;三端口光环形器(CIR);中心波长为 1455 nm,输出功率范围为 0~1000 mW 的拉曼抽运光源;1455/1550 波分复用器(WDM);30 km SMF;AQ6317B 光谱分析仪(OSA)。

光源输出的连续光经过 PC 后进入脉冲调制器,脉冲调制器将连续光调制成脉宽为 100 ns,重复频率为 1500 Hz 的光脉冲。EDFA 把光脉冲由微瓦量级放大到毫瓦量级。放大后的光脉冲通过 CIR 注入到 30 km SMF 中。在前向放大中,拉曼抽运通过 WDM 接入到环形器 2 端口与 SMF 之间,OSA 用来观察光纤末端的探测光信号以及布里渊背向散射信号;在后向放大中,拉曼抽运通过 WDM 接入光纤末端,OSA 用来观察布里渊背向散射信号。

4 实验结果和分析

4.1 拉曼增益实验结果与理论计算结果的比较

根据图 1 中模拟计算的不同抽运功率下光纤长

度与拉曼增益的关系,选取 30 km 长的普通单模光纤作为研究对象,拉曼抽运功率分别为 100、300、600、1000 mW 时,可以得到实际测得的拉曼增益与理论仿真结果的对比图,其结果如图 3 所示。

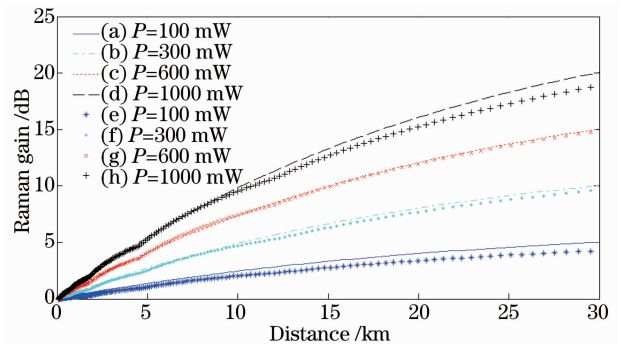


图 3 拉曼增益与抽运功率的关系。(a)~(d) 仿真结果; (e)~(h) 实验结果

Fig. 3 Relationship between Raman gain and pump power. (a)~(d) Simulation results; (e)~(h) experiment results

由图 3 实验结果可见,随着抽运功率的增加,拉曼增益也在增大。抽运功率为 1000 mW,光纤长度为

30 km 时,实际测得的拉曼增益近似为 18.95 dB;而仿真得到的拉曼增益近似为 20.19 dB。实验结果比理论预期值略小,其原因一方面主要是由于实际实验中拉曼抽运光的衰减较快;另一方面主要是由于耦合器或连接线之间存在损耗。

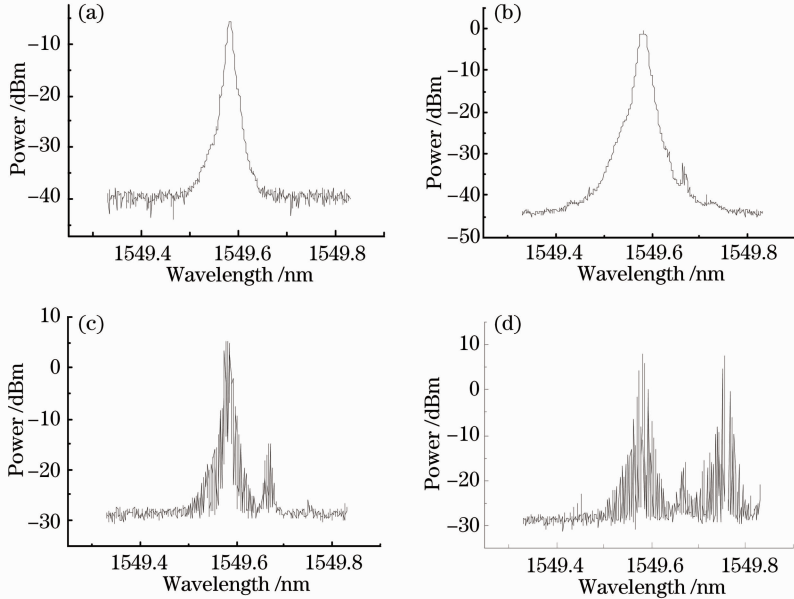


图 4 不同抽运功率下光纤末端探测光光谱图。(a) $P=0$; (b) $P=433.9$ mW; (c) $P=597.3$ mW; (d) $P=706.2$ mW

Fig. 4 Detected light spectra at the fiber terminal in position under different pump powers.

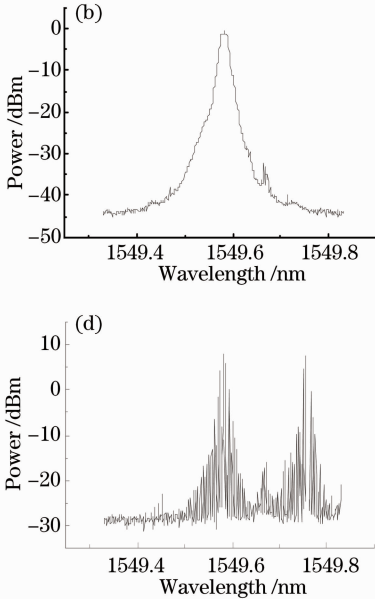
(a) $P=0$; (b) $P=433.9$ mW; (c) $P=597.3$ mW; (d) $P=706.2$ mW

从图 4 中可以看到,探测光随着拉曼抽运功率的增加而得到放大,当拉曼激光器抽运功率增加到 433.9 mW 时,探测光光强超过受激布里渊阈值,其噪声特性开始变坏,在探测光中心频率下频移约 10.86 GHz 的位置开始出现一阶受激布里渊散射谱线。研究表明,光纤拉曼放大器的噪声主要来源有三种:自发辐射噪声(ASE)、串话噪声和瑞利散射噪声。ASE 噪声和串话噪声^[11]对布里渊散射微弱小信号信噪比的影响较小,由于光纤中的双瑞利散射可以促进 SBS 的放大作用,所以制约布里渊散射微弱小信号信噪比的因素主要是受激布里渊散射效应。根据图 4 所示的实验结果可知,当抽运功率超过 706.2 mW 后,光纤中的非线性效应更加显著,受激布里渊散射(SBS)不断增强,此时出现二阶受激布里渊散射谱线,探测光信号已经发生畸变,其噪声特性严重变坏。

为了测得后向布里渊散射光与拉曼抽运功率的关系,测量过程中保持探测光功率不变,然后改变拉曼抽运的功率,在环形器的输出端用光谱仪观察不同拉曼抽运功率下所对应的布里渊散射光的变化,

4.2 前向抽运拉曼放大的 SBS

首先,将经过 EDFA 放大后进入环形器的探测光功率调至 2.83 dBm,然后改变拉曼抽运功率,通过光谱仪测得光纤末端在不同抽运功率作用下的探测光光谱,其结果如图 4 所示。



其结果如图 5 所示。

对比图 4 与图 5 可以看出,探测光谱刚出现受激布里渊散射谱线时,背向 Stokes 散射光的功率已经高于瑞利散射光的功率,Stokes 光增益比瑞利光增益增长迅速,说明此时发生了受激布里渊散射。当探测光由于出现二阶受激布里渊散射谱线而噪声特性变坏时,背向布里渊散射信号的噪声特性同样变坏,在一阶布里渊散射信号附近出现的二阶布里渊散射信号,将严重影响整个 BOTDR 系统布里渊频移测量的精确度。

4.3 后向抽运拉曼放大的 SBS

采用如图 2(b)所示的后向抽运拉曼放大结构,用光谱仪测得不同拉曼抽运功率下的背向布里渊散射光谱如图 6 所示。

从图 6 中可以看出,当拉曼抽运功率低于 897.6 mW 时,观察到的是自发布里渊散射现象。当拉曼抽运功率高于 897.6 mW 后,布里渊散射光功率明显高于瑞利散射光功率,说明此时发生的是受激布里渊散射。

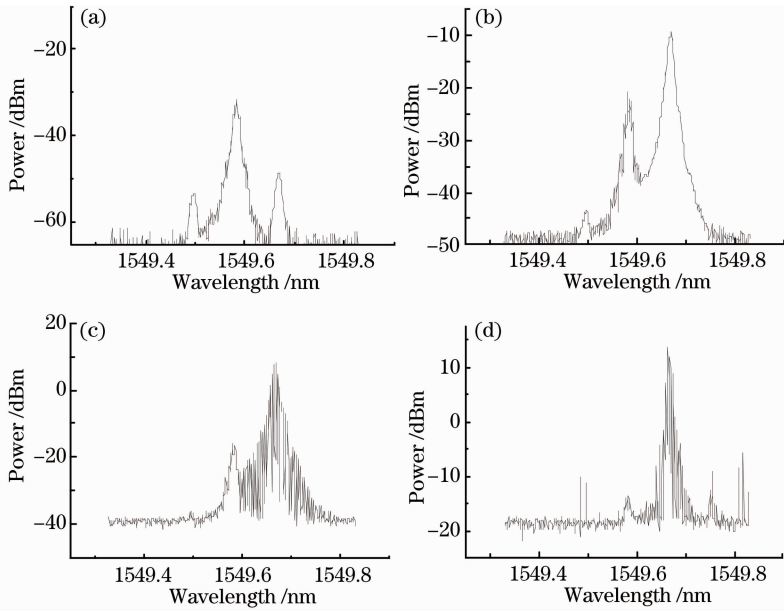


图 5 不同拉曼抽运功率下的前向抽运拉曼放大的布里渊散射光谱。(a) $P=0$; (b) $P=493.3$ mW; (c) $P=706.2$ mW; (d) $P=985.0$ mW

Fig. 5 Brillouin scattering spectra with forward pump Raman amplification under different Raman pump powers. (a) $P=0$; (b) $P=433.9$ mW; (c) $P=706.2$ mW; (d) $P=985.0$ mW

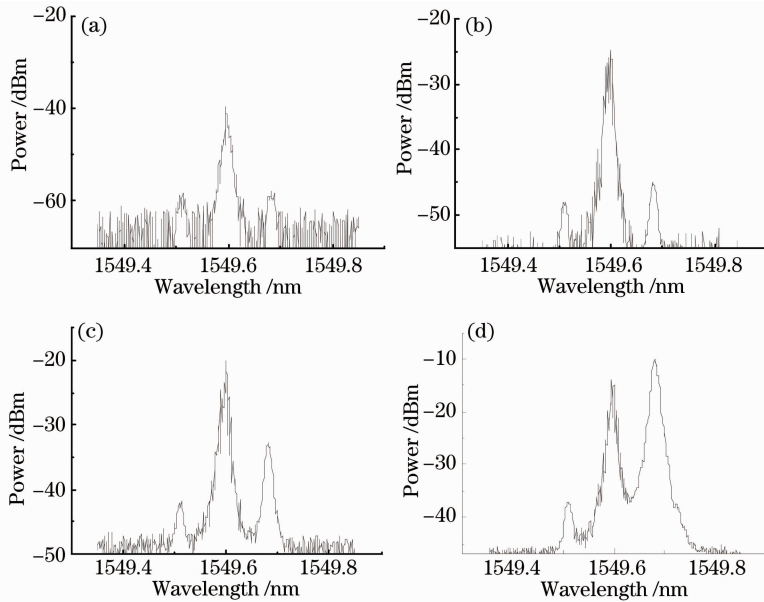


图 6 不同拉曼抽运功率下后向抽运拉曼放大的布里渊散射光谱。(a) $P=0$; (b) $P=495.0$ mW; (c) $P=707.8$ mW; (d) $P=897.6$ mW

Fig. 6 Brillouin scattering spectra with backward pump Raman amplification under different Raman pump powers. (a) $P=0$; (b) $P=495.0$ mW; (c) $P=707.8$ mW; (d) $P=897.6$ mW

对比图 5 与图 6 可以看出,后向拉曼放大的 SBS 阈值高于前向拉曼放大的 SBS 阈值,其原因主要有:后向放大的相对噪声强度较小,而前向放大的相当噪声强度较大;前向放大中背向布里渊散射信号从光纤首端就能迅速得到放大,而后向放大中布里渊背向散射信号则不然。在前向放大中,信号光

与抽运光同时耦合进入光纤中。此时,信号光与抽运光的光功率都比较强,信号光在光纤中能够得到有效放大。所以前向放大的信号光功率在光纤某个位置比后向放大的信号光功率要大,这使得前向抽运的拉曼放大能较易发生非线性效应。

4.4 结果分析

为了比较前向放大和后向放大的增益效果,分别提取出前向放大和后向放大中瑞利散射光和

Stokes 散射光的峰值功率,测得两者增益变化曲线如图 7 所示。

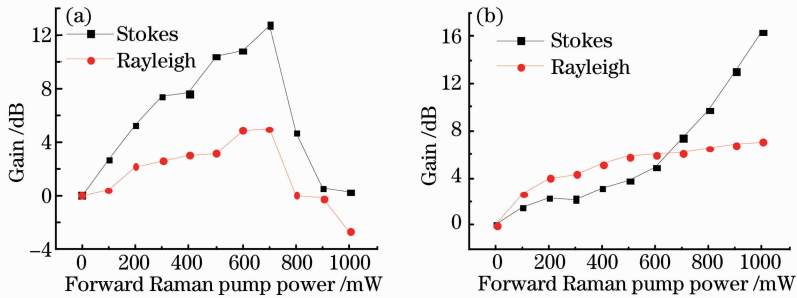


图 7 增益变化曲线。(a) 前向放大; (b) 后向放大

Fig. 7 Curves of gain change. (a) Forward amplification; (b) backward amplification

由图 7(a)可知,在前向抽运拉曼放大中,当拉曼抽运功率小于 700 mW 时,Stokes 光增长十分显著,最大增益可达 13.78 dB;当拉曼抽运功率大于 700 mW 后,Stokes 光与瑞利散射光增益大幅下降,瑞利散射光的增益甚至出现了负值,说明出现二阶受激布里渊散射谱线后,拉曼抽运信号成为了 SBS 的抽运源。故而探测光的能量大部分转移到了受激布里渊散射信号上。

向拉曼放大的 SBS 阈值要高于前向拉曼放大的 SBS 阈值,且采用后向拉曼放大方式不会受到二阶布里渊散射谱线的影响。因此,在 BOTDR 系统中采用后向拉曼抽运的放大方式要优于前向拉曼抽运的放大方式,且能够使微弱的布里渊背向散射信号得到持续放大,并有效减小受激布里渊散射效应的干扰,最终使整个 BOTDR 系统的信噪比得到提高。

由图 7(b)可知,在后向抽运拉曼放大中,当拉曼抽运功率小于 650 mW 时,Stokes 光和瑞利散射光增益都随着拉曼抽运功率的增加而增强;当拉曼抽运功率大于 650 mW 时,Stokes 光的增益已经超过了瑞利散射光的增益;而拉曼抽运功率高于 900 mW 时,Stokes 光增益远远高于瑞利散射光增益;当抽运功率为 1000 mW 时,Stokes 光可达到的最大增益为 16.33 dB。

对比图 7 中的前向放大与后向放大的增益变化曲线可知:在前向放大中,随着抽运光功率的增加,Stokes 光与瑞利散射光的增益首先会上升,超出一定阈值后大幅下降。这是由于 SBS 使得系统中的探测光功率下降,故而前向放大拉曼增益下降。又由于 SBS 产生的光波充当了前向拉曼放大的噪声,使得前向放大的噪声性能变差;而在后向放大中,随着抽运光功率的增加,无论是 Stokes 光还是瑞利光的增益都会一直增大。因此,在 BOTDR 系统中,可以优先采用后向拉曼抽运放大结构对微弱布里渊信号进行放大。

5 结 论

主要研究了前向拉曼抽运和后向拉曼抽运方式对微弱布里渊散射信号的放大。实验结果表明,后

参 考 文 献

- Peng Yingcheng, Qian Hai, Lu Hui, *et al.*. New research progress on distributed optical fiber sensor technique based on BOTDA[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(10): 100005.
彭映成, 钱海, 鲁辉, 等. 基于 BOTDA 的分布式光纤传感技术新进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(10): 100005.
- Wang Yan, Li Hongzuo, Hao Ziqiang. Research of anti-radiation technology for the EDFA system in space environment[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(7): 070601.
王岩, 李洪祚, 郝子强. 空间通信中 EDFA 的抗辐射技术的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(7): 070601.
- Yin Ke, Xu Jiangming, Leng Jinyong, *et al.*. Research progress of high power fiber Raman lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(1): 010004.
殷科, 许将明, 冷进勇, 等. 高功率光纤拉曼激光器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(1): 010004.
- Tiwari U, Thyagarajan K, Shenoy M R. Simulation and experimental characterization of Raman/EDFA hybrid amplifier with enhanced performance[J]. *Opt Commun*, 2009, 282(8): 1563-1566.
- Bao X, Chen L. Recent progress in Brillouin scattering based fiber sensors[J]. *Sensors*, 2011, 11(4): 4152-4187.
- Liu Yin, Fu Guangwei, Zhang Yanjun, *et al.*. A novel method for Brillouin scattering spectrum of distributed sensing systems based on radial basis function neural networks to extract features [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0206002.
刘银, 付广伟, 张燕君, 等. 基于径向基函数神经网络的传感布里渊散射谱特征提取[J]. *光学学报*, 2012, 32(2): 0206002.
- Liu Yin, Zhang Yanjun, Li Da, *et al.*. Hybrid algorithm particle swarm optimization and Levenberg-Marquardt for Brillouin scattering spectrum of distributed sensing systems[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(4): 0415001.
刘银, 张燕君, 李达, 等. 粒子群优化和拉凡格氏混合优化

- 算法提取传感布里渊散射谱特征的方法[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0415001.
- 8 Seo H S, Oh K. Optimization of silica fiber Raman amplifier using the Raman frequency modeling for an arbitrary GeO₂ concentration in the core[J]. Opt Commun, 2000, 181(1-3): 145-151.
- 9 Long Qingyun, Deng Huaqiu, Cui Delong. Effect of pump power deployment on bi-directional pumping fibre Raman amplifiers[J]. Laser Technology, 2013, 37(2): 216-218.
龙青云, 邓华秋, 崔得龙. 抽运功率配置对双向喇曼放大器性能的影响[J]. 激光技术, 2013, 37(2): 216-218.
- 10 Cho Y T. An Investigation into Using Optical Amplifiers for Enhancing Brillouin Based Optical Time Domain Reflectometry [D]. Southampton: University of Southampton, 2004. 43-50.
- 11 Zhang Hao. Introduction to noise classification and noise figure of fiber Raman amplifier[J]. Modern Enterprise Education, 2013, (20): 355-356.
张浩. 浅谈光纤拉曼放大器的噪声分类及噪声系数[J]. 现代企业教育, 2013, (20): 355-356.

栏目编辑: 王晓琰