

基于拉曼放大的零差布里渊光时域反射技术

王 雪 路元刚 缪亚冬 王 峰 张旭苹

南京大学光通信工程研究中心, 江苏 南京 210093

摘要 提出一种基于拉曼放大的零差布里渊光时域反射技术, 在长距离分布式光纤传感中实现对温度和应变的快速单端测量。该方法通过拉曼放大提高多峰布里渊峰值功率, 实现布里渊拍频峰功率的提升, 可有效提高传感系统的信噪比(SNR)和传感距离。通过解拉曼放大的耦合方程, 得到同向、反向以及双向拉曼增益, 并从理论上导出了前端拉曼抽运系统的布里渊拍频峰的峰值功率分布。以 50 km 的大有效面积光纤为例, 在抽运功率为 800 mW 的前端拉曼抽运下, 仿真得到 2 个拍频峰的最低信噪比位于光纤初始端, 分别约为 26.4 dB 和 21.5 dB。光纤末端处 2 个拍频峰的信噪比分别为 70.9 dB 和 46.8 dB。结果表明, 所提出的方法在不降低测量精度和测量速度的情况下, 可使光纤传感的动态范围提高 11 倍。

关键词 光纤光学; 布里渊散射; 光纤传感; 拉曼放大; 零差布里渊光时域反射

中图分类号 O437 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.s105003

Homodyne Brillouin Optical Time-Domain Reflectometry Based on Raman Amplification

Wang Xue Lu Yuangang Miao Yadong Wang Feng Zhang Xuping

Institute of Optical Communication Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China

Abstract A homodyne Brillouin optical time-domain reflectometry (BOTDR) based on Raman amplification is proposed to achieve the fast and single-end measurement of temperature and strain in long-range distributed optical sensors. In this method, Raman amplification can be used to enhance multi-Brillouin peaks power in order to improve the power of the Brillouin beat peaks, which can effectively improve the signal-to-noise ratio (SNR) and sensing distance of the sensing system. The co-Raman gain, counter-Raman gain and bidirectional-Raman gain are achieved by solving the coupled equation of the Raman amplification and the power distribution of Brillouin beat peak in front-end Raman pumped system is derived. Take a 50 km large effective area fiber (LEAF) as an example, when the front-end Raman pump power is 800 mW, the lowest SNRs of two Brillouin beat peaks appear at the front end of the LEAF and they are respectively 26.4 dB and 21.5 dB. The SNRs in the rear end of the LEAF are 70.9 dB and 46.8 dB, respectively. The results show that by using the proposed method, the optical fiber sensing dynamic range can be increased by 11 times without degrading the measurement accuracy and speed.

Key words fiber optics; Brillouin scattering; optical fiber sensing; Raman amplification; homodyne Brillouin optical time-domain reflectometry

OCIS codes 060.2370; 060.2310; 190.5890

1 引 言

基于布里渊散射的连续分布式光纤传感系统, 通过对光纤上应变和温度的变化进行长距离的连续分布式测量, 可应用于大型建筑、公路、隧道、桥梁、大坝、通信光缆、油气管道等的健康状况监测, 有着广阔的应用前景, 目前已成为国内外光纤传感技术研究的热点^[1-7]。

收稿日期: 2015-01-06; 收到修改稿日期: 2015-01-25

基金项目: 国家自然科学基金(61377086)、江苏省“六大人才高峰”计划(2012-WLW-014)

作者简介: 王 雪(1989-), 女, 硕士研究生, 主要从事分布式光纤传感方面的研究。E-mail: wangxue219@126.com

导师简介: 路元刚(1977-), 男, 博士, 教授, 主要从事分布式光纤传感、光电图像处理等方面的研究。

E-mail: luyg@nju.edu.cn(通信联系人)

对光纤中的布里渊谱信号进行时域探测与分析,具有测量速度快、信号处理方法简单的优点,基于布里渊散射的时域分析分布式光纤传感技术主要有 2 种:布里渊光时域反射(BOTDR)^[8]和布里渊光时域分析(BOTDA)传感技术^[9]。传统的基于单频探测光的布里渊光纤传感技术主要通过非线性阈值之内提高脉冲光的峰值功率和增加测量的平均次数来提高系统信噪比(SNR)。但由于受到光纤损耗以及光纤中的非线性效应的限制,BOTDR 和 BOTDA 探测光脉冲的峰值功率不能太高。增加平均次数不仅会延长测量时间,而且平均次数超过一定数量后,即使再增加也不会对信噪比的提升有显著效果。若传感光纤中具有多个声学模式,其布里渊增益谱(BGS)将呈多峰状态,代表不同声学模式的多个布里渊散射光在后向传播过程中会相互作用而产生光学拍,形成峰值频率为百兆赫兹量级的布里渊互拍谱(BBS)。Lu 等^[10]提出了基于布里渊互拍谱功率探测的分布式应变和温度传感方法,该方法是一种无需扫频、快速和简单的单端测量零差 BOTDR 传感方法。但该方法利用的自发布里渊散射光信号较弱,若不加光放大较难实现长距离测量。采用掺铒光纤放大器(EDFA),虽然可以放大信号,但会产生较大的自发辐射噪声,而且对光纤尾部布里渊信号的放大效果不明显。作为另一种光信号放大方法,拉曼放大因其具有分布放大特性以及噪声低等内在优势得到广泛关注和迅速发展。在传感距离的提升方面,可在双端拉曼抽运下实现 50 m 空间分辨率的 150 km 光纤温度传感^[11]。

为了在快速测量的同时提高布里渊光时域反射传感系统的动态范围,本文提出了一种基于拉曼放大的零差布里渊光时域反射分布式光纤传感技术。从理论上推导了前端、后端和双端拉曼抽运下的布里渊信号净增益,并对零差 BOTDR 中布里渊拍频峰功率进行了理论推导,最后以大有效面积光纤(LEAF)为例,对前端拉曼抽运下的拍频峰功率及其信噪比进行了计算与分析。

2 理论推导

2.1 探测光的拉曼放大

石英光纤的拉曼增益谱具有很宽的频率范围(约 40 THz),若一束频率为 f_p 的抽运光与另一束频率 f_s 的探测光在光纤中同时传输时,只要二者频率差 $\Delta f = f_p - f_s$ 位于这 40 THz 的拉曼增益谱中,探测光就会被抽运光所放大,并且最大增益对应的频率比抽运频率小 13.2 THz^[12]。

若将拉曼放大与 BOTDR 相结合,前向传输的探测脉冲光及其后向传输的布里渊散射光均将被拉曼抽运所放大,因此探测光应包括 2 个部分,即探测脉冲光及其布里渊散射光。在本节中为讨论方便,仅考虑光纤中只存在一束抽运光与另一束探测光的情况,在 2.2 节中会讨论探测光包含探测脉冲光及其布里渊散射光的情况。拉曼放大系统中抽运光 P_p 和探测光 P_s 沿着光纤长度 z 的变化可以由下面的耦合方程表示^[13]:

$$\frac{dP_p}{dz} = \frac{g_R}{A_{\text{eff}}} P_s P_p - \alpha_s P_s, \quad (1)$$

$$\pm \frac{dP_s}{dz} = \frac{-\lambda_s g_R}{\lambda_p A_{\text{eff}}} P_s P_p - \alpha_p P_p, \quad (2)$$

式中, λ_s 和 λ_p 分别表示探测光波长和抽运光波长, g_R 是在此抽运波长下的拉曼增益系数, A_{eff} 是光纤的有效面积, α_s 和 α_p 是探测光波长和抽运波长在光纤中的损耗系数。(2)式中的正负号分别表示同向和反向抽运情况,且其右边第 1 项表示抽运消耗,第 2 项表示抽运光在光纤中的损耗。在本文提出的基于拉曼放大的 BOTDR 系统中,探测光功率远小于抽运光功率,可忽略表示抽运消耗的第 1 项^[12],所以很容易解出该耦合方程在同向、反向和双向拉曼放大下的探测光功率。

当采用前端抽运时,此时为同向拉曼放大,即当(2)式左端取正号时可解得

$$P_s(z) = P_s(0) \exp \left[g_R P_{p1} \frac{1 - \exp(-\alpha_p z)}{\alpha_p A_{\text{eff}}} - \alpha_s z \right], \quad (3)$$

相应的同向拉曼增益为

$$G_{\text{Rco}} = \exp \left[g_R P_{p1} \frac{1 - \exp(-\alpha_p z)}{\alpha_p A_{\text{eff}}} \right], \quad (4)$$

式中 P_{p1} 为同向拉曼抽运光初始光功率。

当采用后端抽运时,此时为反向拉曼放大,即当(2)式左端取负号时可解得

$$P_S(z) = P_S(0) \exp \left\{ g_R P_{P2} \frac{\exp(-\alpha_P L) \cdot [\exp(\alpha_P z) - 1]}{\alpha_P A_{\text{eff}}} - \alpha_S z \right\}, \quad (5)$$

相应的反向拉曼增益为

$$G_{\text{Rcounter}} = \exp \left\{ g_R P_{P2} \frac{\exp(-\alpha_P L) \cdot [\exp(\alpha_P z) - 1]}{\alpha_P A_{\text{eff}}} \right\}, \quad (6)$$

式中 P_{P2} 为反向拉曼抽运光初始光功率, L 为光纤总长度。

当采用双端抽运时,此时为双向拉曼放大,探测光功率可以表示为

$$P_S(z) = P_S(0) G_{\text{Rco}} \cdot G_{\text{Rcounter}} \exp(-\alpha_S z), \quad (7)$$

若双向抽运的总功率为 P_{P0} , 且前端抽运功率与总功率的比值为 R , 即 $R = P_{P1} / P_{P0}$ 。则(7)式可以表示为

$$P_S(z) = P_S(0) \exp \left\{ \frac{g_R P_{P0}}{\alpha_P A_{\text{eff}}} \{ R [1 - \exp(-\alpha_P z)] + (1 - R) \exp(-\alpha_P L) \cdot [\exp(\alpha_P z) - 1] \} - \alpha_S z \right\}, \quad (8)$$

故双向拉曼增益为

$$G_{\text{Rbi}} = \exp \left\{ \frac{g_R P_{P0}}{\alpha_P A_{\text{eff}}} \{ R [1 - \exp(-\alpha_P z)] + (1 - R) \exp(-\alpha_P L) \cdot [\exp(\alpha_P z) - 1] \} \right\}, \quad (9)$$

当 $R=1$ 时,表示只有同向拉曼放大;当 $R=0$ 时,表示只有后向拉曼放大;当 $0 < R < 1$ 时,表示双向拉曼放大。

2.2 拉曼放大对布里渊散射光的作用

在利用布里渊散射进行传感时,一般选择探测光波长为 1550 nm, 根据拉曼增益谱,抽运光的频率比探测光的频率高约 13.2 THz 时,探测光可获得最大的拉曼增益,此时抽运光的波长约为 1455 nm,因此选择 1455 nm 的连续光为抽运光。

零差 BOTDR 系统是单端测量的系统,探测光从光纤起始端(亦可称为前端)注入光纤,同时在光纤前端接收光纤中后向散射的布里渊信号。在基于拉曼放大的零差 BOTDR 系统中,若拉曼抽运光从光纤前端注入光纤,该传感系统的结构称为前端拉曼抽运系统。相应地,若拉曼抽运光从光纤后端注入光纤,该传感系统称为后端拉曼抽运系统。当在光纤两端同时注入拉曼抽运光,此时的传感系统称为双端拉曼抽运系统。很显然只有前端拉曼抽运系统保留了零差 BOTDR 系统单端测量的优点,而后端拉曼抽运系统和双端拉曼抽运系统是光纤双端接入系统。

以前端拉曼抽运系统为例分析拉曼放大对布里渊信号的作用,在前端拉曼抽运系统中,如图 1 所示,探测光与抽运光同向传输,探测光被抽运光同向放大,传输过程中探测光产生的后向布里渊散射光因与抽运光反向传输而被反向拉曼放大。其中 $P_P(z)$ 表示抽运光, $P_S(z)$ 表示信号光, $P_B(z)$ 表示布里渊散射光。

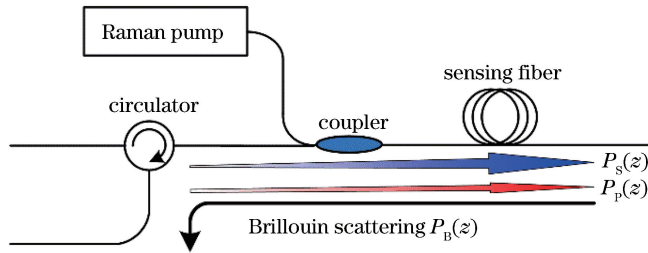


图 1 前端拉曼抽运系统中布里渊散射光的拉曼放大

Fig. 1 Raman amplification of Brillouin scattering in front-end Raman pumped system

因此经过拉曼放大的布里渊信号可以表示为

$$P_{S1} \xrightarrow{G_{\text{Rco}}} P_{S2}(z) \xrightarrow{\text{SPBS}} P_{B1}(z) \xrightarrow{G_{\text{Rcounter}}} P_{B2}(z),$$

式中 P_{S1} 表示初始探测光功率, $P_{S2}(z)$ 表示探测光在 z 处经同向拉曼放大后的光功率, $P_{B1}(z)$ 表示探测光在 z 处自发布里渊散射光功率, $P_{B2}(z)$ 表示布里渊散射光经过反向拉曼放大后的光功率, SPBS 表示自发布里渊散射过程。根据前面的理论推导,可得

$$P_{S2}(z) = P_{S1} \cdot G_{\text{Rco}} \cdot \exp(-\alpha_S z), \quad (10)$$

式中 $\alpha_S = 0.2$ dB/km 是波长为 1.55 μm 处的光纤衰减系数, 光纤中的背向自发布里渊散射光功率可表示为^[14]

$$P_{B1} = P_{S2}(z)\alpha_B S \frac{cW}{2n_{\text{eff}}}, \quad (11)$$

式中 c 是真空中的光速, W 为入射脉宽, n_{eff} 为光纤的有效折射率, α_B 为布里渊损耗系数^[15], S 是散射捕获因子^[16]:

$$\alpha_B = \frac{8\pi^3}{3\lambda_S^4} KT(n_{\text{eff}}^8 p_{12}^2 / \rho V_a^2), \quad (12)$$

$$S = (\lambda_S/n_{\text{eff}})^2 / (4\pi A), \quad (13)$$

式中, K 为玻尔兹曼常量, T 为绝对温度, p_{12} 是光弹系数, V_a 为光纤中的纵向声速, A 为光纤声光有效面积。将(12)、(13)式代入(11)式,可得

$$P_{B1}(z) = P_{S2}(z)\pi^2 K T c W p_{12} n_{\text{eff}}^5 / (3\lambda_S^2 A \rho V_a^2), \quad (14)$$

则前端拉曼抽运系统中被拉曼放大的布里渊散射光为

$$P_{B2}(z) = P_{B1}(z) \cdot G_{\text{Rcounter}} \cdot \exp(-\alpha_S z) = P_{S1} \cdot G_{\text{Rco}} \cdot \frac{\pi^2 c K T W p_{12} n_{\text{eff}}^5}{3\lambda_S^2 A \rho V_a^2} \cdot G_{\text{Rcounter}} \cdot \exp(-2\alpha_S z). \quad (15)$$

2.3 拉曼放大对布里渊拍频功率的影响

在基于布里渊互拍谱功率探测的零差 BOTDR 传感方法中^[10], 所采用的传感光纤有多个声学模式, 故其布里渊增益谱将呈多峰状态。布里渊增益谱中峰 i 和峰 j 经过拉曼放大后的功率分别为 P_{B2i} 和 P_{B2j} , 在后向传输过程二者互拍得到布里渊互拍谱中的拍频峰 $\text{peak}(i, j)$, 拍频峰功率可以表示为

$$P_{(i,j)}(z) = 2 \sqrt{P_{B2i} P_{B2j}} = 2P_{S1} \cdot G_{\text{Rco}} \cdot \frac{\pi^2 c K T W p_{12} n_{\text{eff}}^5}{3\lambda_S^2 \rho V_a^2} \cdot G_{\text{Rcounter}} \cdot \exp(-2\alpha_S z) \sqrt{\frac{1}{A_i A_j}}, \quad (16)$$

式中 A_i 、 A_j 分别为第 i 个和第 j 个声模式对应的声光有效面积。

利用类似的分析方法, 也可以得到后端和双端拉曼抽运系统中的布里渊拍频谱中的拍频峰功率。

2.4 系统信噪比分析

光纤拉曼放大器中主要有 2 种噪声, 一是放大器自发辐射(ASE)噪声, 二是瑞利散射噪声。采用窄带光滤波器可以有效减小这 2 种噪声, 并且这 2 个噪声与探测器的热噪声相比小很多, 因此在计算信噪比时可以将其忽略^[17]。

信噪比通常定义为信号的电功率与噪声的电功率之比, 这等价于它们电流的均方值之比, 即可表示为

$$R_{\text{SN}} = \langle i_s^2 \rangle / \langle i_{\text{noise}}^2 \rangle, \quad (17)$$

光电探测器接收到的光信号功率对应的光电流为

$$i_s = P_{(i,j)} \mathfrak{R}, \quad (18)$$

式中 $\mathfrak{R} = \eta q / h\nu$ 为光电探测器的转换效率, η 为探测器的量子效率, h 普朗克常量, q 为电子电荷数, ν 为入射光子频率。

在光纤传感系统中, 探测器噪声对信号的影响最大, 探测器噪声主要包括热噪声、散粒噪声和暗电流噪声。因此噪声的电流均方值可以表示为

$$\langle i_{\text{noise}}^2 \rangle = \langle i_{\text{th}}^2 \rangle + \langle i_{\text{sh}}^2 \rangle + \langle i_{\text{dk}}^2 \rangle = 4KTB/R_L + 2q \left[\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N P_{(i,j)} \right] \mathfrak{R} B + 2qI_D B, \quad (19)$$

式中等式右边 3 项分别表示热噪声、散粒噪声以及暗电流噪声。 B 为探测器带宽, R_L 为负载电阻, I_D 为暗电流。 N 表示布里渊增益谱中的布里渊峰个数。将(18)、(19)式代入到(17)式可以得到拍频峰 $\text{peak}(i, j)$ 的信噪比为

$$R_{\text{SN}(i,j)} = [P_{(i,j)} \mathfrak{R}]^2 / \{4KTB/R_L + 2q \left[\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N P_{(i,j)} \right] \mathfrak{R} B + 2qI_D B\}. \quad (20)$$

3 仿真与分析

3.1 拉曼增益

由(4)、(6)和(9)式可以看出, 拉曼增益与抽运功率大小 P_P 、抽运波长对应的拉曼增益系数 g_R 、抽运波长下的光纤损耗系数 α_p 以及光纤的有效面积 A_{eff} 所决定。LEAF 中含有 3 个声模式, 对应了 3 个声光有效面积, 为了简单起见, 以第 1 个声模式为例, 计算其同向、反向和双向拉曼增益。图 2 为 50 km 整条光纤上的

拉曼增益与抽运功率的关系图。其中图 2(a)为同向拉曼增益,图 2(b)为反向拉曼增益。从图 2 中可以看出拉曼抽运功率对拉曼增益的影响非常大,抽运功率越大,拉曼增益越大。

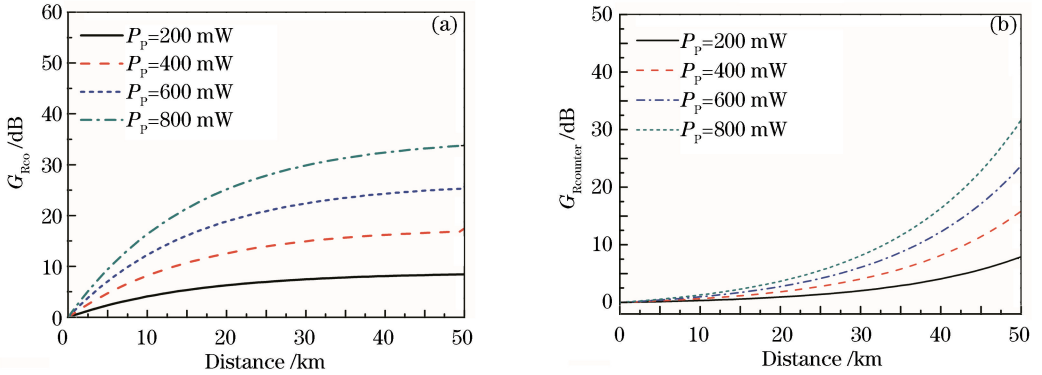


图 2 光纤沿线上拉曼增益与抽运功率的关系。(a)同向拉曼增益;(b)反向拉曼增益

Fig. 2 Relationship between the Raman gain and the pump power along the fiber. (a) Co-Raman gain; (b) counter-Raman gain

图 3 显示了当拉曼抽运总功率为 800 mW 时,不同 R 值时光纤沿线上的双向拉曼增益,当 $R=1$ 时,表示只有前端抽运;当 $R=0$ 时,表示只有后端抽运;可以看出,当 $R=0.5$ 时,即两端抽运功率相同时,拉曼增益有较高的平坦度。仿真所采用参数典型值如表 1 所示。其中 LEAF 的 3 个声模式对应的 3 个声光有效面积分别为 A_1 、 A_2 和 A_3 [18]。

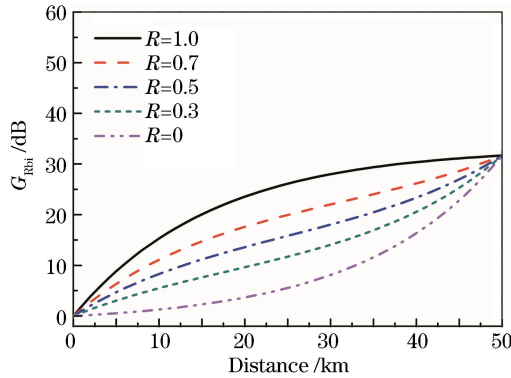


图 3 抽运总功率为 800 mW 时,光纤沿线上不同 R 值下的拉曼增益

Fig. 3 Raman gains along the fiber at different R values when the total pump power is 800 mW

表 1 用于拉曼增益计算的参数

Table 1 Parameters used in calculation of the Raman gains

Parameter	$g_R/(10^{-14} \text{ m/W})$	$\alpha_p/(\text{dB/km})$	$\alpha_s/(\text{dB/km})$	$A_1/\mu\text{m}^2$	$A_2/\mu\text{m}^2$	$A_3/\mu\text{m}^2$	L/km
Value	7.34	0.27 for 0.062 /km	0.2 for 0.046 /km	124	274.8	842	50

3.2 基于拉曼放大的零差 BOTDR 系统

基于拉曼放大的零差 BOTDR 系统如图 4 所示。1550 nm 的探测光源经过电光调制器(EOM)产生 50 ns 脉宽的脉冲探测光,经过扰偏器(PS)和环形器进入传感光纤中,其中光隔离器(ISO)用于保护光源激光器,扰偏器(PS)用于限制光纤双折射引起的功率波动;1455 nm 的拉曼抽运光在传感光纤起始端经耦合器与探测光同向进入传感光纤,形成前端拉曼抽运;若拉曼抽运光在光纤末端注入则为后端拉曼抽运(虚线部分所示);若拉曼抽运光同时从光纤两端注入,则为双端拉曼抽运。背向布里渊散射光经环形器被光电探测器探测(PD),而瑞利散射光被带通滤波器(OBPF)滤除。

该系统采用的传感光纤为 LEAF, LEAF 是一种色散位移光纤,其折射率分布较为复杂,是由一个三角芯以及一个环形层所组成 [19]。该折射率分布决定了 LEAF 中存在多个声模式,因此其布里渊增益谱中有相应的多个布里渊峰 [20]。这些峰在后向传输中产生几百兆赫兹的光学拍,经数据采集器(DAQ)采集并处理。

因只有采用同端拉曼抽运才能实现单端测量,因此对前端拉曼抽运系统中 LEAF 的 3 个布里渊峰以及

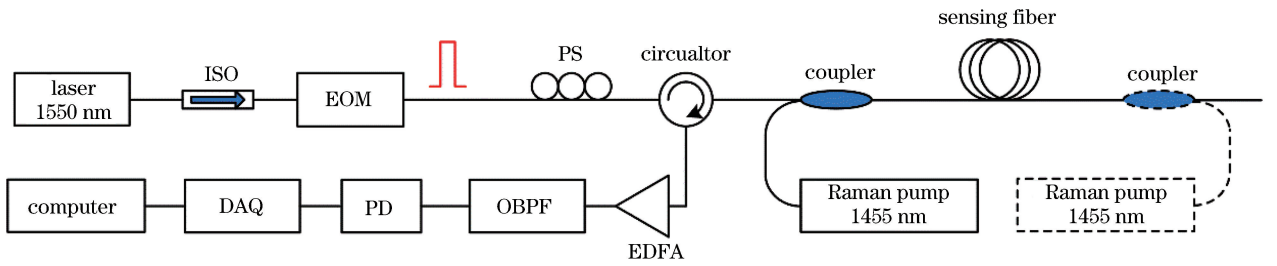


图 4 基于拉曼放大的零差 BOTDR 系统原理图

Fig. 4 Schematic of homodyne BOTDR based on Raman amplification

其拍频峰进行了仿真。图 5 为在前端抽运功率为 800 mW 时, LEAF 中 3 个布里渊峰的功率变化。可以看出, 3 个峰的增益大小有较大差异, 主峰 peak1 的增益最大, peak3 增益最小。在光纤末端, peak1 的增益可达到约 63.1 dB, peak2 的增益约为 28.6 dB, 而 peak3 却只有 9.3 dB 左右。这主要是由于 3 个声模式对应的声光有效面积差异较大。

LEAF 中的拍频峰 peak(1,2) 由 peak1 与 peak2 互拍得到, peak(1,3) 由 peak1 与 peak3 互拍得到, 在抽运功率为 800 mW 的前端拉曼抽运下, 2 个拍频峰的峰值功率如图 6 所示。可以看出, 在前端拉曼抽运下, 拍频峰有较高的增益, 在光纤末端, peak(1,2) 的功率提升了约 45.9 dB, peak(1,3) 的功率提升了约 36.2 dB。

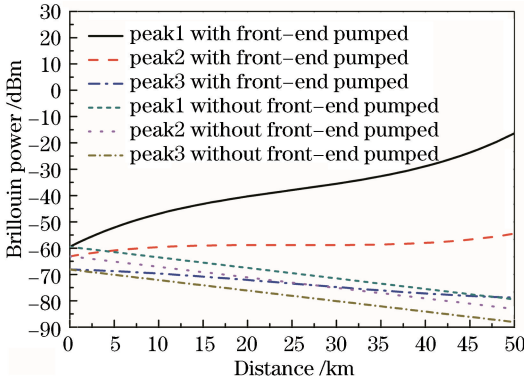


图 5 抽运功率为 800 mW 的前端拉曼抽运下 LEAF 中的 3 个布里渊峰

Fig. 5 Three Brillouin peaks powers of LEAF when the front-end Raman pump power is 800 mW

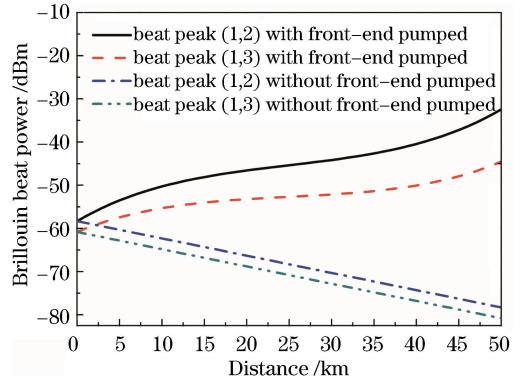


图 6 抽运功率为 800 mW 的前端拉曼抽运下 LEAF 中的 2 个布里渊拍频峰功率

Fig. 6 Two Brillouin beat peaks powers of LEAF when the front-end Raman pump power is 800 mW

3.3 系统信噪比计算

由仿真图 5 和图 6 可知, 自发布里渊散射信号虽然经过前端拉曼放大, 但其拍频功率仍然非常小 (小于 -30 dBm), 因此在实际系统应用中, 后向布里渊散射光进入探测器前要通过掺铒光纤放大器对其进行放

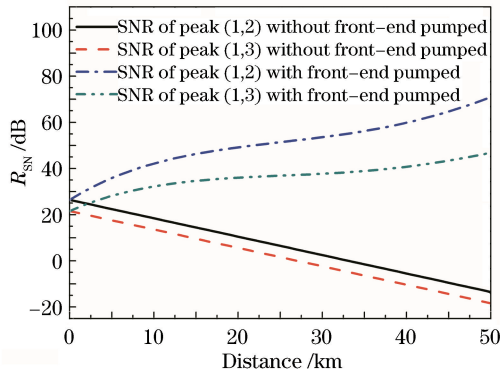


图 7 抽运功率为 800 mW 的前端拉曼抽运下系统信噪比

Fig. 7 SNR of homodyne BOTDR system when the front-end Raman pump power is 800 mW

大,如系统图 4 所示。之前没有采用拉曼放大的系统中,布里渊信号经 EDFA 和探测器放大的总增益约为 40 dB^[10]。根据 2.4 中系统信噪比的分析,对于前端拉曼抽运下的零差 BOTDR 系统进行了信噪比计算,计算结果如图 7 所示。

从图 7 可以看出,经过拉曼放大和 EDFA 与系统相结合后,信噪比有较高幅度的提升,两个拍频峰的最小信噪比均位于光纤初始端,分别为 26.4 dB 和 21.5 dB。光纤末端的信噪比分别为 70.9 dB 和 46.8 dB。该结果与之前 4.5 km 的传感距离相比,动态范围提升了 11 倍,光纤末端的信噪比分别提升 46.7 dB 和 17.0 dB。结果表明,所提出的基于拉曼放大的零差 BOTDR,可以实现快速测量的同时有效提高传感系统的动态范围。本文主要是从理论上进行推导与计算,实验验证工作将在下一步进行。

4 结 论

提出了一种基于拉曼放大的零差 BOTDR 传感技术,用于对温度和应变的快速长距离分布式测量。理论上分析了前端、后端和双端拉曼抽运系统中布里渊信号的增益,并利用 50 km 单模光纤对 3 种拉曼抽运系统获得的增益进行仿真。结果表明抽运功率对布里渊信号增益有较大的影响,双端拉曼放大具有较好的平坦度。设计了基于拉曼放大的零差 BOTDR 系统,推导了背向自发布里渊散射拍频峰功率,并用大有效面积光纤作为传感光纤进行仿真,各个声模式对应的声光有效面积对布里渊峰有较大的影响,声光有效面积越大,其拉曼放大增益越大,平坦度越高。使用功率为 800 mW 的前端拉曼抽运放大零差 BOTDR 系统中的布里渊信号,LEAF 的 2 个拍频峰的最小信噪比均位于光纤起始端,分别为 26.4 dB 和 21.5 dB。光纤末端的信噪比分别为 70.9 dB 和 46.8 dB。与之前的传感系统相比,本文系统的动态范围提升了 11 倍,光纤末端信噪比分别提升 46.7 dB 和 17.0 dB。因此,基于拉曼放大的零差 BOTDR 传感技术,在不降低测量精度和测量速度的情况下可有效提高布里渊光时域反射传感系统的动态范围。

参 考 文 献

- 1 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.
- 2 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.
- 3 Xie Shuping, Xu Guoliang. Suppression on fiber stimulated Brillouin scattering based on phase modulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(2): 0206003.
谢淑平,徐国良. 基于相位调制法的光纤受激布里渊散射抑制[J]. *光学学报*, 2013, 33(2): 0206003.
- 4 Jin Chongjiu, Zou Weiwen, Li Hao, *et al.*. Distributed fiber-optic sensing system of Brillouin gain and loss effects based on Brillouin optical correlation domain analysis[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(5): 050602.
金重九,邹卫文,李颢,等. 基于布里渊增益和损耗级联的高性能布里渊相干域分布式光纤传感系统[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(5): 050602.
- 5 Yang Wei, Yang Yuanhong. Digital envelope detection technique for Brillouin optical time-domain reflectometry based on generalized harmonic wavelet transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0506004.
杨巍,杨远洪. 基于广义谐波小波变换的布里渊光时域反射计的数字包络解调技术[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0506004.
- 6 Lu Yuangang, Bao Xiaoyi, Chen Liang, *et al.*. Distributed birefringence measurement with beat period detection of homodyne Brillouin optical time-domain reflectometry[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(19): 3936–3938.
- 7 Lu Yuangang, Yao Yuguo, Zhao Xiaodong, *et al.*. Influence of non-perfect extinction ratio of electro-optic modulator on signal-to-noise ratio of BOTDR[J]. *Opt Commun*, 2013, 297(1): 48–54.
- 8 Shimizu K, Horiguchi T, Koyamada Y, *et al.*. Coherent self-heterodyne Brillouin OTDR for measurement of Brillouin frequency shift distribution in optical fibers[J]. *J Lightwave Technol*, 1994, 12(5): 730–736.
- 9 Kurashima T, Horiguchi T, Tateda M. Distributed-temperature sensing using stimulated Brillouin scattering in optical silica fibers[J]. *Opt Lett*, 1990, 15(18): 1038–1040.
- 10 Y Lu, Z Qin, P Lu, *et al.*. Distributed strain and temperature measurement by Brillouin beat spectrum[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2013, 25(11): 1050–1053.
- 11 Alahbabi M N, Cho Y T, Newson T P. 150-km-range distributed temperature sensor based on coherent detection of spontaneous Brillouin backscatter and in-line Raman amplification[J]. *J Opt Soc Am B*, 2005, 22(6): 1321–1324.

- 12 G P Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010; 205—206.
- 13 Yuh Tat Cho. *An Investigation into Using Optical Amplifiers for Enhancing Brillouin based Optical Time Domain Reflectometry*[D]. Southampton: University of Southampton, 2004; 44.
- 14 T Horiguchi, M Tateda. BOTDA-nondestructive measurement of single-mode optical fiber attenuation characteristics using Brillouin interaction; Theory[J]. *J Lightwave Technol*, 1989, 7(8): 1170—1176.
- 15 T C Rich, D A Pinnow. Evaluation of fiber optical waveguides using Brillouin spectroscopy[J]. *Appl Opt*, 1974, 13(6): 1376—1378.
- 16 K Aoyama, K Nakagawa, T Itoh. Optical time-domain reflectometry in a single-mode fiber[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1981, 17(6): 862—868.
- 17 Yang Dongling. *Research on the Multiple-Path Interference in Fiber Raman Amplifier*[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011: 23—29, 49—53.
杨冬玲. 光纤拉曼放大器中多径噪声问题的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011: 23—29, 49—53.
- 18 A Kobaykov, M Sauer, D Chowdhury. Stimulated Brillouin scattering in optical fibers[J]. *Adv Opt Photon*, 2010, 2: 1—59.
- 19 A Kobaykov, S Kumar, D Q Chowdhury, *et al.*. Design concept for optical fibers with enhanced SBS threshold[J]. *Opt Express*, 2005, 13(14): 5338—5346.
- 20 X Liu, X Bao. Brillouin spectrum in LEAF and simultaneous temperature and strain measurement[J]. *J Lightwave Technol*, 2012, 30(8): 1053—1059.

栏目编辑: 王晓琰