

· 光电子工程与应用 ·

基于拉曼放大和半导体光放大的BOTDA

饶云江, 苕亮, 贾新鸿, 张超

(电子科技大学光纤传感与通信教育部重点实验室 成都 611731)

【摘要】从理论上分析了基于拉曼放大的布里渊光时域分析系统(BOTDA), 通过建立与拉曼放大有关的泵浦光和信号光的耦合方程, 对信号光波形进行了数值仿真。仿真结果表明, 双端拉曼放大技术可有效地补偿传感信号的传输损耗, 提高系统测量精度。搭建了基于拉曼放大和半导体光放大(SOA)相结合的BOTDA分布式光纤传感系统, 实验结果与仿真结果吻合较好, 针对49.6 km的传感距离, 空间分辨率达到40 m, 温度分辨率1°C。

关键词 布里渊光时域分析系统; 布里渊散射; 非线性光学; 拉曼放大; 半导体光放大

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2012.04.028

Brillouin Optical Time Domain Analysis System Based on Raman Amplification and Semiconductor Optical Amplifier

RAO Yun-Jiang, CHANG Liang, JIA Xin-hong, and ZHANG Chao

(Key Laboratory of Optical Fiber Sensing & Communications, Ministry of Education, University of Electronic Science and Technology of China

Chengdu 611731)

Abstract A Brillouin optical time domain analysis (BOTDA) system based on Raman amplification has been theoretically analyzed. The detected probe waveshape has been simulated by using the probe-pump coupled equations combined with Raman. The numerical simulation shows that the bi-directional Raman amplification is very effective for enhancing the measurement accuracy. The experimental exploration of the BOTDA with Raman amplification and semiconductor optical amplifier (SOA) has been demonstrated. The experimental results are in good agreement with the theoretical analysis. The results show that a temperature resolution of 1 °C was achieved over a sensing distance of 49.6 km with a 40 m spatial resolution.

Key words BOTDA; Brillouin scattering; nonlinear optics; Raman amplification; semiconductor optical amplifiers

基于布里渊光时域分析仪(BOTDA)的分布式光纤传感系统以其高灵敏度、高分辨率和定位准确、抗电磁干扰能力强等特点, 成为光纤传感器领域的研究热点。

然而传统的BOTDA传感系统^[1-6]由于只在前端采用掺铒光纤放大器(EDFA), 传感信号在传输过程中, 受传感光纤的损耗及布里渊泵浦光的消耗影响, 导致传感信号功率前后分布不均匀, 造成传感光纤对被测量对象前段精度高, 而后段精度低的结果。

通过提高布里渊泵浦功率可以提高后端测量精度。但泵浦功率过大时, 受自相位调制(SPM)及调制不稳定性(MI)影响, 泵浦频谱和布里渊增益谱被展宽, 影响测量分辨率^[7-8]。

针对上述问题, 本文采用了双向拉曼放大技术。研究表明, 光纤拉曼放大器(FRA)可获得比EDFA更平坦的信号光功率分布及更低的噪音指数(NF)^[9-10]。将FRA应用于BOTDA, 不仅大大延伸了传感距离, 而且可以有效提高系统末端分辨率。

另外, 传统的BOTDA大多采用电光调制器(EOM)或声光调制器(AOM)对布里渊泵浦光进行脉冲调制, 较窄的脉宽导致布里渊泵浦光能量较低, 严重影响空间分辨率的进一步提高。为克服该问题, 本文利用开关型半导体光放大器(SOA)作为调制器, SOA的增益可补偿布里渊泵浦光功率, 从而在保持较高的温度/应变传感分辨率前提下, 有效提高空间分辨率。

收稿日期: 2010-06-07; 修回日期: 2011-05-03

基金项目: 国家863项目(2007AA01Z245)

作者简介: 饶云江(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤传感与通信技术方面的研究。

1 理论分析

单模光纤内脉冲演化方程为^[11]:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial A}{\partial t} + \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = -\frac{\alpha}{2} A + i\gamma[|A|^2]A \quad (4)$$

式中, v_g 为群速度; A 为传输光包络慢变振幅; β_2 为群速度色散(GVD)参量; α 为光纤损耗系数; γ 为非线性系数。

传感光纤加布里渊光放大及拉曼放大后, 式(4)应引入布里渊及拉曼增益项。信号光、布里渊泵浦及拉曼泵浦慢变振幅可由耦合方程组式(5)~式(9)表示为^[11]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_p}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial A_p}{\partial t} + \beta_{2,p} \frac{\partial^2 A_p}{\partial t^2} = & -\frac{\alpha_p}{2} A_p + \\ i\gamma_p[|A_p|^2 + 2|A_B|^2 + (2-f_R)(|A_R^+|^2 + & \\ |A_R^-|^2)]A_p + \frac{g_B(v_B)}{2} A_B Q^* + & \\ \frac{g_R}{2} A_p (|A_R^+|^2 + |A_R^-|^2) & \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} -\frac{\partial A_B}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial A_B}{\partial t} + \beta_{2,B} \frac{\partial^2 A_B}{\partial t^2} = & -\frac{\alpha_B}{2} A_B + \\ i\gamma_B[(|A_B|^2 + 2|A_p|^2 + (2-f_R)(|A_R^+|^2 + & \\ |A_R^-|^2))]A_B - \frac{g_B(v_B)}{2} A_p Q + & \\ \frac{g_R}{2} A_B (|A_R^+|^2 + |A_R^-|^2) & \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_R^+}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial A_R^+}{\partial t} + \beta_{2,R} \frac{\partial^2 A_R^+}{\partial t^2} = & \\ -\frac{\alpha_R}{2} A_R^+ + i\gamma_R[|A_R^+|^2 + 2|A_R^-|^2 + (2-f_R)(|A_p|^2 + & \\ |A_B|^2)]A_R^+ - \frac{g_R}{2} \frac{\lambda_B}{\lambda_R} A_R^+ (|A_p|^2 + |A_B|^2) & \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} -\frac{\partial A_R^-}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial A_R^-}{\partial t} + \beta_{2,R} \frac{\partial^2 A_R^-}{\partial t^2} = & \\ -\frac{\alpha_R}{2} A_R^- + i\gamma_R[|A_R^-|^2 + 2|A_R^+|^2 + (2-f_R)(|A_p|^2 + & \\ |A_B|^2)]A_R^- - \frac{g_R}{2} \frac{\lambda_B}{\lambda_R} A_R^- (|A_p|^2 + |A_B|^2) & \end{aligned} \quad (8)$$

$$T_a \frac{\partial Q}{\partial t} + (1+i\delta)Q = A_B A_p^* \quad (9)$$

$$T_B = \begin{bmatrix} \operatorname{sech}[g_B(v_B)|Q|\Delta z/2] & \\ -\tanh[g_B(v_B)|Q|\Delta z/2]|Q|/Q^* & \end{bmatrix}$$

式(5)~式(9)中已包含了GVD、SPM、交叉相位调制(XPM)影响。其中, A_p 为信号光慢变振幅; A_B 为布里渊泵浦慢变振幅; A_R^+ 和 A_R^- 分别为拉曼前向和后向泵浦慢变振幅; Q 表征光纤密度波动; $\beta_{2,i}(i=P,B,R)$ 分别表示信号光、泵浦光及拉曼泵浦光的群速度色散; α_i 、 γ_i ($i=P,B,R$)分别表示信号光、泵浦光及拉曼泵浦光的损耗系数和非线性系数; λ_R 为拉曼泵浦波长; f_R 为拉曼响应因子; g_R 为拉曼增益系数; g_B 为布里渊增益系数; 声子寿命 T_a 与布里渊线宽 $\Delta\nu_B$ 相关, 定义 $T_a=1/\pi\Delta\nu_B$ (其典型值为10 ns), 定义失谐参量 $\delta=2\pi(\nu-\nu_B)T_a$ 。

上述理论模型中, 假定布里渊增益 $g_B(\nu)$ 呈洛伦兹形式:

$$g_B(\nu) = g_B(\nu_B) \frac{(\Delta\nu_B/2)^2}{(\nu-\nu_B)^2 + (\Delta\nu_B/2)^2} \quad (10)$$

式中, ν 为泵浦光和信号光之间的频率差; $g_B(\nu_B)$ 为布里渊峰值频移增益系数; $\Delta\nu_B$ 为增益谱的3 dB带宽。

边界条件如下:

$$\begin{cases} A_p(0,t) = \sqrt{P_{p,in}} \\ A_B(L,t) = \sqrt{P_{B,in}(t)} \\ A_R^+(0,t) = \sqrt{\beta P_{R,in}} \\ A_R^-(L,t) = \sqrt{(1-\beta)P_{R,in}} \end{cases} \quad (11)$$

式中, L 为传感光纤长度; β 为前向拉曼泵浦功率与总拉曼泵浦功率的比值; $P_{i,in}(i=P,B,R)$ 分别是信号光、布里渊泵浦光、拉曼泵浦光的输入功率; 布里渊泵浦调制波形取方波。

2 仿真过程及结果

利用MATLAB软件, 采用时域传输矩阵法(TMM)^[12]对基于双向拉曼放大的BOTDA进行动态模拟。将光纤长度 L 等分为 M 段, 用 $A_{p,i}(A_{B,i})$ 和 $A_{p,i+1}(A_{B,i+1})$ ($i=1,2,\dots,M$)表示相邻两个空间网格的信号光(布里渊泵浦光)慢变振幅, 则二者随时间的变化可由下述矩阵表示:

$$\begin{bmatrix} A_{p,i+1}(t+\Delta t) \\ A_{B,i}(t+\Delta t) \end{bmatrix} = T_R T_B \begin{bmatrix} A_{p,i}(t) \\ A_{B,i+1}(t) \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中, 时域步长 Δt 与空域步长 Δz 的关系为 $\Delta t=\Delta z/v_g$; T_B 和 T_R 分别与布里渊和拉曼增益有关, 可表示为:

$$T_B = \begin{bmatrix} \operatorname{sech}[g_B(v_B)|Q|\Delta z/2] & \tanh[g_B(v_B)|Q|\Delta z/2]Q^*/|Q| \\ -\tanh[g_B(v_B)|Q|\Delta z/2]|Q|/Q^* & \operatorname{sech}[g_B(v_B)|Q|\Delta z/2] \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$T_R = \begin{bmatrix} T_{R,1,1} & 0 \\ 0 & T_{R,2,2} \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中:

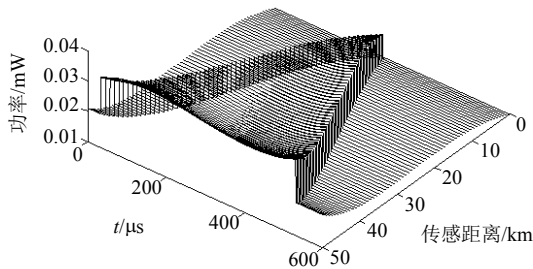
$$T_{R,1,1} = \exp\left\{-\frac{\alpha_P}{2}\Delta z + i\gamma_P[|A_{P,j}(t)|^2 + 2|A_{B,j}(t)|^2 + (2-f_R)(|A_{R,j}^+(t)|^2 + |A_{R,j}^-(t)|^2)]\Delta z + \frac{g_R}{2}(|A_{R,j}^+(t)|^2 + |A_{R,j}^-(t)|^2)\Delta z\right\} \quad (15)$$

$$T_{R,2,2} = \exp\left\{-\frac{\alpha_B}{2}\Delta z + i\gamma_B[|A_{B,j+1}(t)|^2 + 2|A_{P,j+1}(t)|^2 + (2-f_R)(|A_{R,j+1}^+(t)|^2 + |A_{R,j+1}^-(t)|^2)]\Delta z + \frac{g_R}{2}(|A_{R,j+1}^+(t)|^2 + |A_{R,j+1}^-(t)|^2)\Delta z\right\} \quad (16)$$

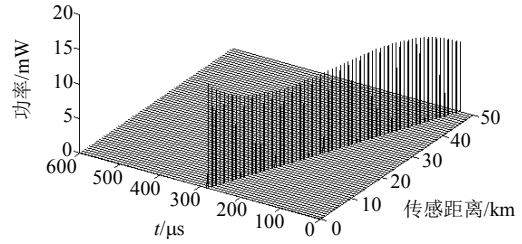
采用类似的方法可推导出拉曼泵浦光的演化表达式, Q 可采用龙格-库塔(Runge-Kutta)法由式(9)得出。从初始条件开始, 重复计算式(11)~式(16)可计算出信号光、布里渊泵浦光及拉曼泵浦光波形沿光纤的演化。对于脉宽大于1 ns(对应10 cm空间分辨率)的泵浦脉冲, 可以忽略GVD影响。仿真结果表明, 当 M 接近1 500时, 波形保持稳定。

模拟中所用数据为 $M=1\ 800$, $\gamma_P=\gamma_B=1.32\ W^{-1}/km$, $\gamma_R=1.37\ W^{-1}/km$, $\alpha_P=\alpha_B=0.19\ dB/km$, $\alpha_R=0.27\ dB/km$, $g_R=0.43\ W^{-1}/km$, $g_B(v_B)=0.42\ W^{-1}/m$, $f_R=0.18$, $n=1.46$, $\Delta v_B=30\ MHz$, $\beta=0.5$, $L=50\ km$; $P_{R,in}=440\ mW$, $P_{P,in}=-20\ dBm$, 布里渊泵浦峰值功率 $P_{B,in}=10\ dBm$, 布里渊泵浦脉冲宽度取 $0.4\ \mu s$ 。

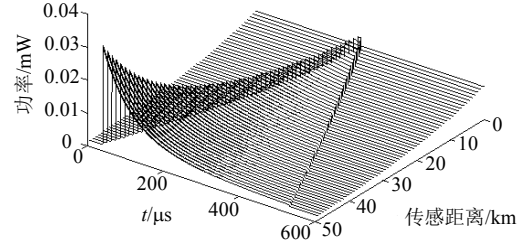
采用双向拉曼放大后的计算结果如图1所示, 在没有拉曼放大时, 由于光纤损耗及信号光对布里渊泵浦光的消耗, 二者功率沿光纤呈指数衰减的趋势, 从图1c可以看出, 光纤后端($t>300\ \mu s$)的受激布里渊信号很微弱, 系统只能达到30 km的传感距离, 而引入双向拉曼放大后, 探测光和布里渊泵浦光波形沿光纤的演化更加均匀, 传感距离大大延伸。



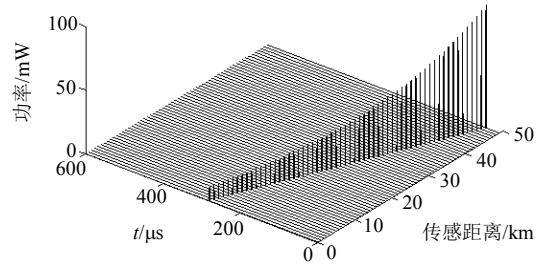
a. 采用双向拉曼放大后, 信号光波形沿光纤的演化



b. 采用双向拉曼放大后, 布里渊泵浦光波形沿光纤的演化



c. 不加拉曼放大时, 探测光波形沿光纤的演化



d. 不加拉曼放大时, 布里渊泵浦光波形沿光纤的演化

图1 计算结果

3 长距离传感实验

3.1 实验方案

如图2所示, 窄带激光器(Laser, Agilent 8164A, 波长1 549.32 nm, 输出功率10 dBm)输出光经分束比为1:9的耦合器分为两路: 功率较小的一路经偏振控制器(PC)后, 再经微波发生器(microwave generator, Anritsu MG 3694B, 扫频范围10.611~10.740 GHz, 步长1 MHz)驱动的电光调制器(EOM, 带宽10 GHz)产生两个边带, 其中下边带做为信号光; 另一路经半导体光放大器SOA(SOA-LSB-1550-S)进行调制放大(SOA前加可调光衰减器VOA防止增益饱和), 再经掺铒光纤放大器EDFA(A-EDFA-IL-23)放大后做为布里渊泵浦光。其中, SOA由波形发生器(waveshape generator)产生的电脉冲驱动, 本文实验中取重复频率1 kHz、脉宽 $0.4\ \mu s$ (对应于40 m空间分辨率)。结构中, 扰偏器(PS)的作用是抑制偏振相关性引起的偏振噪音。最后, 信号光经带通滤波器(TBF)滤除放大的自发辐射噪音(ASE)后, 由光电探测器(PD, 1811 IR-DC-125, 带宽125 MHz)检测。在光纤两端加入拉曼泵浦(Raman pump, OI-RFL-1480-20-

FA, 拉曼泵浦功率可调)使整段光纤上光功率分布趋于平坦, 当信号光与泵浦光功率频率差在布里渊增益频谱范围内时, 产生受激布里渊散射, 峰值频移随传感光纤温度变化而变化。实验中信号光、拉曼泵浦、布里渊泵浦光峰值入纤功率分别为-20 dBm、440 mW和10 dBm。

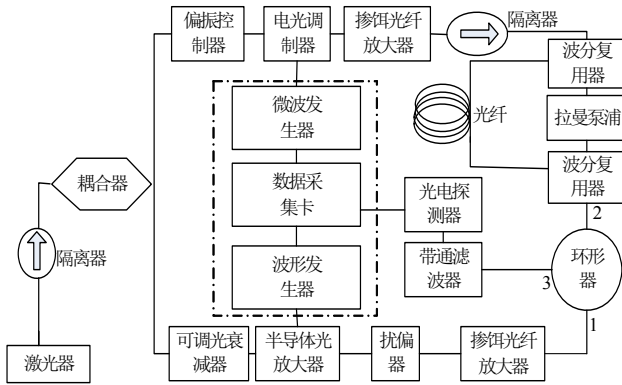


图2 系统结构

3.2 实验结果分析

实验中传感光纤长为49.6 km, 不加拉曼放大时的探测光归一化波形如图3所示。可以看出, 光纤后端光功率逐渐下降, 系统后端分辨率降低。加入双向拉曼放大后的探测光归一化波形与理论结果的比较如图4所示。从图中可以看出, 加入双向拉曼放大后, 探测波沿光纤的演化更加均匀, 且两者有基本一致的变化趋势。

本实验中, 由于布里渊泵浦光为调制后的低占空比、持续时间较短的光脉冲串, 其能量较低, 只要拉曼光功率控制在一定水平下, 不会出现级联的布里渊谱线。由图5可知, 输出光谱图中只出现放大的斯托克斯信号光、反斯托克斯光及布里渊泵浦的瑞利散射光, 未发现二阶以上布里渊谱线。

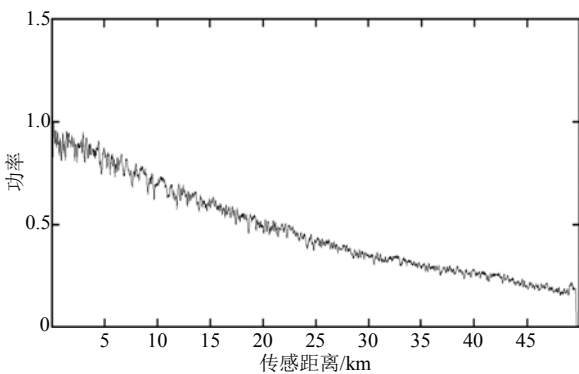


图3 不加拉曼放大时的探测光归一化波形

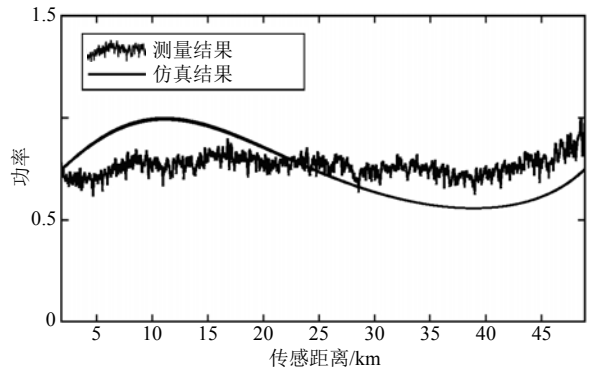


图4 加入双向拉曼放大后的探测光归一化波形与理论结果的比较

对微波发生器从10.611~10.720 GHz进行扫频, 绘制的布里渊频移-距离-探测波光归一化功率的关系曲线如图6所示, 其中光纤末端200 m放入温度控制箱中, 其温度为42 °C。由图可以看出, 光纤末端的峰值布里渊频移有明显不同, 整个光纤的功率分布较为均匀, 系统末端分辨率明显提升, 达到了预期效果。

经洛伦兹拟合后, 光纤末端峰值布里渊频移随温度的变化曲线如图7所示。经计算, 测量分辨率保持在1 °C。由图可知, 峰值布里渊频移与温度有较好的线性关系。经线性拟合, 峰值布里渊频移的温度响应系数约1.1 MHz/°C。

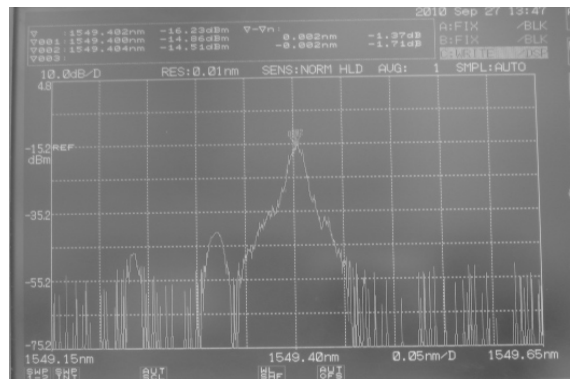


图5 输出光谱图

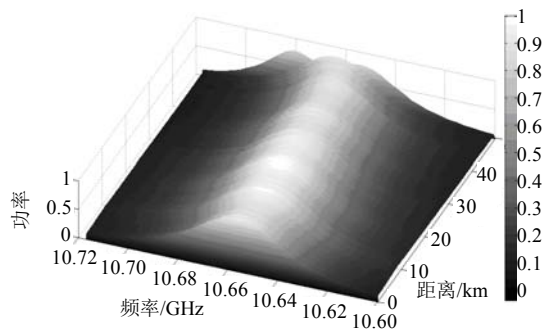


图6 布里渊频移-距离-探测光归一化功率关系三维图

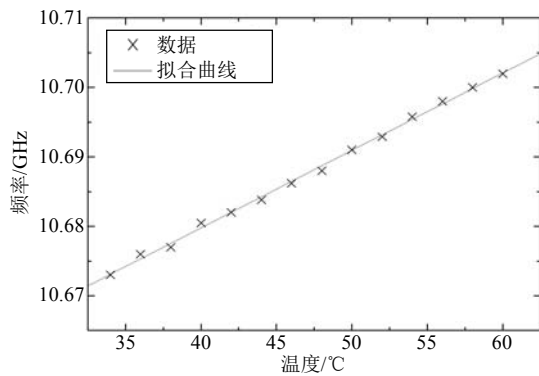


图7 光纤末端峰值布里渊频移随温度的变化曲线

4 结 论

本文将拉曼放大及半导体光放大相结合, 改善基于布里渊光时域分析的长距离分布式光纤传感器整段光纤上的温度分辨率。用探测-泵浦耦合方程组, 从理论上预计了加入双向拉曼放大与无拉曼放大两种情况下探测波形沿光纤的演化规律, 并给出49.6 km的温度传感实验结果, 在40 m的空间分辨率条件下, 整段光纤的温度分辨率保持在1°C。本文所做的工作对进一步优化布里渊光时域分析仪传感性能有一定的参考价值。

参 考 文 献

- [1] HORIGUCHI T, SHIMIZU K, KURASHIMA T, et al. Development of a distributed sensing technique using Brillouin scattering[J]. *Lightwave Technol*, 1995, 13(7): 1296-1310.
- [2] 宋牟平. 微波电光调制的布里渊散射分布式光纤传感技术[J]. *光学学报*, 2004, 24(8): 1111-1114.
SONG Mu-ping. The technique of Brillouin scattering distributed optical fiber sensing based on microwave electric optical modulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(8): 1111-1114.
- [3] SHAHRAAM A V, ZOU Lu-fan, LIANG Chen, et al. Subpeaks in the Brillouin loss spectra of distributed fiber-optic sensors[J]. *Opt Lett*, 2005, 30(10): 1099-1101.
- [4] KALOSHA V P, PONOMAREV E A, LIANG Chen, et al. How to obtain high spectral resolution of SBS-based

- distributed sensing by using nanosecond pulses[J]. *Opt Express*, 2006, 14(6): 2071-2078.
- [5] CHAUBE P, COLPITTS B G, JAGANNATHAN D, et al. Distributed fiber-optic sensor for dynamic strain measurement[J]. *IEEE Sensors J*, 2008, 8(7): 1067-1072.
- [6] BROWN A W, DEMERCHANT M D, BAO Xiao-yi, et al. Spatial resolution enhancement of a Brillouin-distributed sensor using a novel signal processing method[J]. *IEEE/OSA J Lightwave Technol*, 1999 17(7): 1179-1183.
- [7] ALAHBABI M, CHO Y T, NEWSON T P, et al. Influence of modulation instability on distributed optical fiber sensors based on spontaneous Brillouin scattering[J]. *Opt Soc*, 2004, 21(6): 1156-1160.
- [8] 李卓明. 布里渊分布型光纤温度和应变传感技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2006.
LI Zhuo-ming Study on the simultaneous distributed measurement of temperature and strain based on Brillouin scattering in optical fiber[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2006.
- [9] CHO Y T, ALAHBABI M, BRAMBILLA G, et al. Brillouin based OTDR with measurement range of 85 km using combined EDFA and Raman amplification[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics. San Francisco, California: [s.n.], 2004: 1593-1594.
- [10] 陈容睿, 饶云江, 冉曾令, 等. 基于喇曼/掺铒光纤混合放大的长距离布喇格光栅传感器系统[J]. *光子学报*, 2007, 36(3): 507-510.
CHEN Rong-wei, SAc Francisco, California: [s.n.], RAO Yun-jiang, RAN Zeng-ling, et al. Brillouin scattering distributed optical fiber sensors series connected by wavelength division multiplexing[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(3): 507-510.
- [11] 阿戈沃. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 3版. 贾东方, 余震虹, 谈斌, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 1992.
AGRAWAL G P. Nonlinear fiber optics & applications of nonlinera fiber optics[M]. 3rd ed. JIA Dong-fang, YU Zheng-hong, TAN Bin, et al, by translate. Beijing: Electronic Industry Press, 1992.
- [12] KIM Y, LEE H, LEE J, et al. Chirp characteristics of 10 Gb/s electroabsorption modulator integrated DFB lasers[J]. *Quantum Electron*, 2000, 36(8): 900-908.

编辑 张俊