

文章编号: 0253-2239(2007)04-0711-5

布里渊光时域分析传感器的消偏振衰落技术*

宋牟平 庄白云

(浙江大学 信息与电子工程学系, 杭州 310027)

摘要: 在布里渊光时域分析(BOTDA)光纤传感器中,由于受激布里渊散射的偏振相关性的影响,激励光和探测光的偏振态随机变化引起的信号起伏严重影响布里渊散射光信号的稳定测量。通过建立与偏振态有关的激励光和探测光的耦合方程,推导出接收探测光光强关于激励光和探测光偏振态的理论公式,并由此提出偏振扩展接收技术。理论分析表明,偏振扩展接收技术可以有效地抑制偏振相关信号衰落。通过对耦合方程进行模拟,验证了理论分析的正确性和偏振扩展接收技术的可行性。最后给出了采用偏振扩展接收的布里渊光时域分析实验结果,与理论分析和模拟具有较好的一致性。

关键词: 光电子学; 布里渊散射; 分布式光纤传感; 光时域分析; 偏振

中图分类号: TN247 文献标识码: A

Polarization-Induced Fading Elimination Technique in Brillouin Optical Time-Domain Analysis Sensor

Song Muping Zhuang Baiyun

(Department of Information and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract: Because stimulated Brillouin scattering is polarization related, in Brillouin optical time-domain analysis (BOTDA) sensing system, the steady measurement of sensing signals is seriously affected by the random change of polarization state of pump light and probe light, which causes the measured signal fluctuant. Through constructing coupling equations about the polarization states of pump light and probe light, we deduce the function about probe light intensity referred to the polarization state of pump light and probe light. And a novel method, called polarization expanding receiving method, is proposed to eliminate the polarization related signal fading. Numerically simulated results of coupling equations prove that the polarization expanding receiving technique is feasible for Brillouin optical time-domain analysis (BOTDA), and the theoretical analysis is correct. Finally, a primary experimental result with the proposed method is present, which is coincident with the theoretical and simulating results.

Key words: optoelectronics; Brillouin scattering; distributed optical-fiber sensing (DOFS); optical time-domain analysis; polarization

1 引言

近年来布里渊(Brillouin)散射分布式光纤传感器^[1~3](DOFS)得到广泛关注。长距离布里渊散射分布式光纤传感器有布里渊光时域反射计(BOTDR)^[1]和布里渊光时域分析(BOTDA)^[2]两种结构。布里渊光时域分析的传感原理是:传感光纤两端入射的脉冲激励光与直流探测光之间进行受激布里渊散射作用,检测经过散射后的探测光,可得到

传感光纤各处的布里渊散射光谱,根据布里渊散射光谱与传感量的关系可计算出传感量^[3]。布里渊光时域分析采用的是受激布里渊散射,具有检测信号较强的优点。但是在布里渊光时域分析光纤传感系统中,由于两光波在光纤传输中的偏振态是各自随机变化的,而受激布里渊散射作用是偏振相关的^[4],这会引入接收的探测光光强也是偏振相关起伏的,从而导致接收信号的偏振相关衰落。针对布里渊光

* 国家自然科学基金(60507002)资助课题。

作者简介: 宋牟平(1971—),男,浙江临海人,教授,博士,主要从事光纤传感和微波光子学的研究。

E-mail: songmp@zju.edu.cn

收稿日期: 2006-08-14; 收到修改稿日期: 2006-10-08

时域分析中的偏振相关信号衰落,可采用保偏光纤作为传感光纤^[5],但传感性能和长度受保偏光纤制约。在以前的相关研究^[6~10]中,我们提出针对相干接收 BOTDR 的消偏振衰落技术,即采用偏振分集接收方法^[9,10]来抑制随机偏振态的影响。本文针对布里渊光时域分析采用相类似的偏振扩展接收技术,以降低信号的偏振相关衰落。

2 原理分析

在长距离布里渊光时域分析中,普通单模传感光纤中的双折射率是未知且受外界作用影响,因此激励光和探测光在传感光纤中各处的偏振状态是未知且变化的,且取决于入射光的偏振状态和光纤各处的双折射率。由于一次信号采样的时间在毫秒级以下,而分布式光纤传感器一般针对的是慢变化传感量。因此可认为在相邻采样周期之间,传感光纤中的双折射率分布认为近似保持恒定。因此,如图 1 所示,将布里渊光时域分析的传感光纤(长度为 L)分为 N 等份,各段(L/N)光纤中激励光 A'_p 和探测光 A'_s 的相互作用可采用两光波在双折射光纤中的传输耦合模方程^[4]:

$$\frac{\partial A'_{pj}}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial A'_{pj}}{\partial t} + \frac{\alpha}{2} A'_{pj} = -\frac{g_B}{2} |A'_{sj}|^2 A'_{pj}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial A'_{sj}}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial A'_{sj}}{\partial t} + \frac{\alpha}{2} A'_{sj} = -\frac{g_B}{2} |A'_{pj}|^2 A'_{sj}, \quad (2)$$

式中 $j = x, y$ 分别为 x 和 y 方向; v_g 为群延迟速度; α 为衰减系数; g_B 为受激布里渊散射增益。

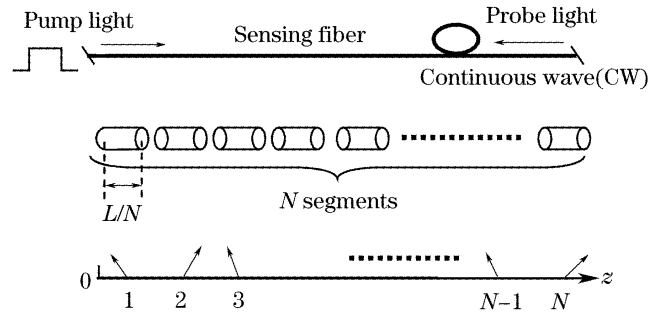


图 1 布里渊光时域分析中传感光纤的双折射偏振相关分析原理图

Fig. 1 Birefringence related analysis of sensing fiber of Brillouin optical time-domain analysis

对于耦合方程(1),(2),令

$$A'_{px} = A_{px} \exp\left(-\frac{\alpha}{2}z\right), \quad A'_{sx} = A_{sx} \exp\left(\frac{\alpha}{2}z\right),$$

$$A'_{py} = A_{py} \exp\left(-\frac{\alpha}{2}z\right), \quad A'_{sy} = A_{sy} \exp\left(\frac{\alpha}{2}z\right),$$

则耦合方程(1),(2)变为

$$\frac{1}{v_g} \frac{\partial A_{pj}}{\partial t} = -\frac{g_B}{2} |A_{sj}|^2 \exp(\alpha z) A_{pj}, \quad (3)$$

$$\frac{1}{v_g} \frac{\partial A_{sj}}{\partial t} = \frac{g_B}{2} |A_{pj}|^2 \exp(-\alpha z) A_{sj}. \quad (4)$$

根据布里渊光时域分析分布式传感器原理,信号接收端是以等时间间隔对探测光进行高速信号采样的,因此对于每一处光纤,激励光的光强是随时间变化的,而探测光随时间变化不大;对于足够短的一段光纤,探测光在 x, y 轴方向的光强视为恒定。则由耦合方程(3),(4)可得到激励光和探测光的方程为

$$(A_{pj})_{i+1} = (A_{pj})_i \exp\left[-\frac{g_B}{2} |(A_{sj})_i|^2 \frac{\exp(\alpha \Delta z) - 1}{\alpha}\right] \approx (A_{pj})_i \left[1 - \frac{g_B}{2} |(A_{sj})_i|^2 \Delta z\right] \approx (A_{pj})_i, \quad (5)$$

$$(A_{sj})_{i+1} = (A_{sj})_i \exp\left[v_g \frac{g_B}{2} \int_0^T |(A_{pj})_i|^2 dt\right] \approx (A_{sj})_i \left[1 + v_g \frac{g_B}{2} (A_{pj})_i^2 T\right], \quad (6)$$

这里假设激励光是以方波入射, T 为激励光脉冲宽度, $i = 1, 2, \dots, N$ 。

在布里渊光时域分析中,激励光的偏振态变化主要是由光纤中的双折射率引起的。令激励光在与探测光相互作用点时的光强为 I_{pi} , 激励光在传输到某一点的偏振方向角为 φ_{pi} (φ_{pi} 为关于随机双折射率的函数)。由于随机相位延迟不影响激励光在 x 和 y 方向的幅值,则探测光经过激励光作用后并传输到接收端的琼斯矢量可表示为

$$\begin{bmatrix} A_{sxi} \\ A_{syi} \end{bmatrix} = \sqrt{I_{si}} \begin{bmatrix} \exp(ir_{2i}) & 0 \\ 0 & \exp(-ir_{2i}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_{2i} & -\sin \theta_{2i} \\ \sin \theta_{2i} & \cos \theta_{2i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{xi} & 0 \\ 0 & P_{yi} \end{bmatrix} \times \\ \begin{bmatrix} \exp(ir_{1i}) & 0 \\ 0 & \exp(-ir_{1i}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_{1i} & -\sin \theta_{1i} \\ \sin \theta_{1i} & \cos \theta_{1i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp(ir_0) & \cos \theta_0 \\ \exp(-ir_0) & \sin \theta_0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中

$$P_{xi} = \left(1 + v_g T \frac{g_B}{2} I_{pi} \cos^2 \varphi_{pi}\right), \quad P_{yi} = \left(1 + v_g T \frac{g_B}{2} I_{pi} \sin^2 \varphi_{pi}\right),$$

是由受激布里渊散射引起的光耦合,可由(5)式、(6)式得到; $\theta_0, \theta_{1i}, \theta_{2i}$ 为偏振方向角; r_0, r_{1i}, r_{2i} 分别为探测光的初始相位延迟、探测光传输到光纤中某一点的相位延迟、探测光与激励光相互作用后传输到接收端时的相位延迟。由(7)式可计算得到接收探测光的光强:

$$I'_{si} = |A_{sxi}|^2 + |A_{syi}|^2 = I_{si} [(P_{xi}^2 - P_{yi}^2) \cos 2\theta_0 \cos 2\theta_{1i} + P_{xi}^2 + P_{yi}^2 (P_{xi}^2 - P_{yi}^2) \sin 2\theta_0 \sin 2\theta_{1i} \sin 2r_0]. \quad (8)$$

由于激励光与探测光的偏振方向无关,则对接收探测光的光强进行关于偏振方向的累加处理,称之为偏振扩展接收,即把入射探测光的偏振方向角 θ_{0k} 扩展成 M 个角度 $\frac{k-1}{M}\pi$ (其中 $k = 1, 2, \dots, M$, 且 $M \neq$

1)。由于 $\frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \cos 2\theta_{0k} = 0$, 根据(8)式可得接收探测光的平均光强值为

$$\bar{I}_s = \sum_{\theta_0} I'_{s\theta_0} / M = I_s (P_{xi}^2 + P_{yi}^2) = I_s \left[2 + 2C + C^2 \left(1 - \frac{1}{2} \sin^2 2\varphi_{pi} \right) \right], \quad (9)$$

其中

$$\begin{cases} C = I_{pi} v_g T g_B / 2, \\ \eta = \frac{I_s}{I'} = 2 \left(\frac{2}{C^2} + \frac{2}{C} + 1 \right), \end{cases} \quad (10)$$

式中 I' 为噪声的最大光强, C 与脉冲宽度有关, 显然当 $T \rightarrow 0$ 时 $\eta \rightarrow \infty$, 即噪声可以完全消除, 但是 T 太小会使布里渊增益变小。在以下实验中, 取 $T = 50$ ns, 有 $C_{\max} = 0.5$, 则最小信噪比为 $\eta \approx 26$, 即经过累加后噪声可以控制在有用信号的 4% 以内。

3 模拟仿真

对耦合方程(1)、(2)进行数值计算求解, 所用参量如下: 激励光的初始入射光功率 $P_{p0} = 20$ dBm, 探测光的初始入射光功率 $P_{sl} = -3$ dBm, 有效纤芯面积 $A_{\text{eff}} = 50 \mu\text{m}^2$, $L = 25$ km, $\alpha = 0.2$ dB/km, $g_B = 5 \times 10^{-11} / A_{\text{eff}} = 1 \text{ m}^{-1} \text{ W}^{-1}$, 非线性系数^[4], $\gamma = n\omega / c A_{\text{eff}} = 1 \text{ W}^{-1} / \text{km}$, $v_g = c / n = 2.069 \times 10^8$ m/s, 其中 c 为真空中的光速, $\sin \theta / 2 = \tan 2\phi \sin r$, 偏振相关系数^[4] $B = (2 + 2 \times \sin^2 \theta) / (2 + \cos^2 \theta)$, 采样空间间隔 $\Delta z = 2m$, 采样时间间隔 $\Delta t = 20$ ns。其中, θ 为光纤中双折射的椭圆角, $\theta = 0$ 和 $\theta = \pi/2$ 分别对应线性和圆双折射光纤时的情况; ϕ 和 r 分别为系统随机产生的由光纤中双折射率引起的偏振方向角

和相位延迟角。仿真中光纤的双折射率变化, 根据实际情况随机产生。模拟仿真的初始条件和边界条件为

1) 探测光是先于脉冲激励光而存在的, 因此可先获得探测光在光纤中的分布情况;

2) 激励光的初始条件是入射端 ($z = 0$) 的光波时间波形, 分析时采用方波 (实际布里渊光时域分析中, 采用高速电光调制器产生光脉冲, 产生的脉冲形状接近矩形函数)。

以 20 ns 为采样间隔, 在无任何偏振控制处理时, 检测端的探测光强波形如图 2 所示。可看出信号波形中含有较大的‘波动’, 此‘波动’是偏振相关信号衰落, 与布里渊光时域反射计类似, 会影响布里渊散射谱的判断^[9]。

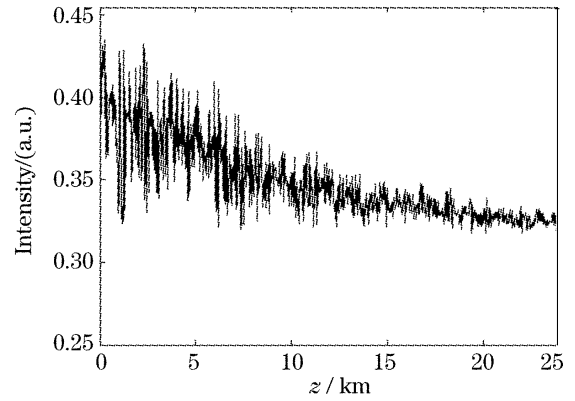


图 2 模拟中未经过偏振控制的接收信号

Fig. 2 Received signal without polarization control in simulation

采用前面提出的 2 个偏振角度 (0° 和 90°) 叠加的偏振扩展接收技术, 接收探测光的波形如图 3 所示, 可看出噪声得到了有效的抑制, 剩下的偏振相关波动随光纤呈指数下降, 与理论分析结果相吻合。模拟中采用其他数目偏振角度叠加的偏振扩展接收

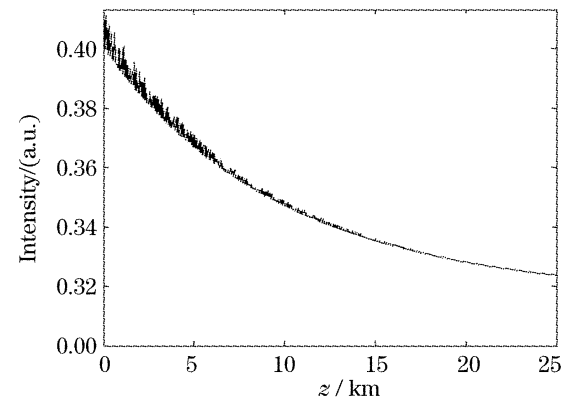


图 3 模拟中采用扩展接收技术后的接收信号

Fig. 3 Received signal with polarization expanding receiving technique in simulation

技术,也得到了类似的结果。

4 实 验

图 4 为采用的布里渊光时域分析分布式光纤传感器^[7]的原理图,其中 EDFA 为掺铒光纤放大器。该系统采用单一的分反馈激光二极管(DFB-LD)作为光源,应用微波电光调制(EOM)产生可控光频移的直流探测光^[6]。探测光由于微波电光调制产生频移,两束光在传感光纤中相向传输,当频移与某处光纤的布里渊频移谱一致时,激励光与探测光产生受激布里渊散射,探测光会受到放大或衰减。再通过变化探测光频移,可检测传感光纤各处的布里渊频移谱。在此系统中,采用光纤偏振控制器来实现前面提出的偏振扩展接收技术。

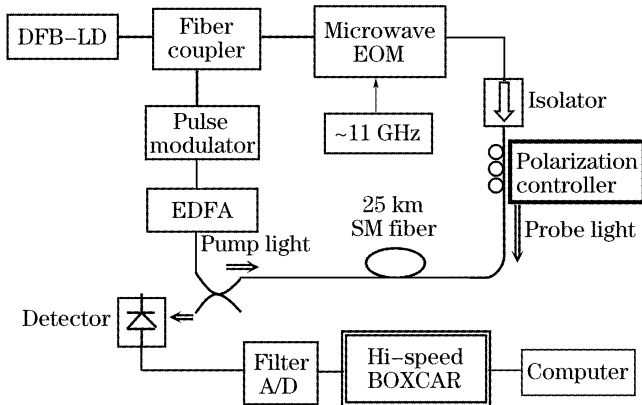


图 4 布里渊光时域分析分布式光纤传感器的原理图。

Fig. 4 Scheme of Brillouin optical time-domain analysis distributed optical-fiber sensor

按图 1 的布里渊光时域分析实验系统来检验偏振扩展接收技术,采用 4000 次的采样叠加平均器(BOXCAR)累加平均来提高信噪比(用以消除噪声对检测信号波形的影响)。图 5 为未采用偏振扩展接收技术的检测信号曲线,信号含有较大的偏振相关波动;图 6 为采用了 2 个偏振角度(0°和 90°)叠加

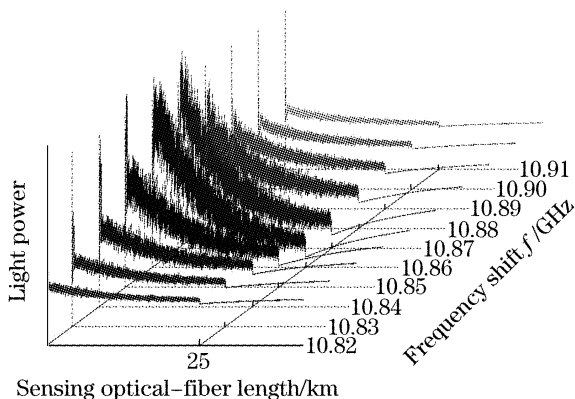


图 5 未经过偏振控制的接收信号

Fig. 5 Received signal without polarization control

的偏振扩展接收技术的检测信号曲线,信号中偏振相关波动得到了较好的抑制。可看出实验结果与理论分析和模拟相一致,但存在波形上的差异,没有模拟中波形波动的理想指数下降,这是由几个原因造成的:1)在模拟中信号是没有噪声的,而实际布里渊光时域分析的探测光检测信号包含有大量噪声;2)实验系统中采用的偏振控制器响应速度较慢,难以在每个时刻准确达到控制值;3)理论分析和模拟中对光纤进行了分段近似处理。

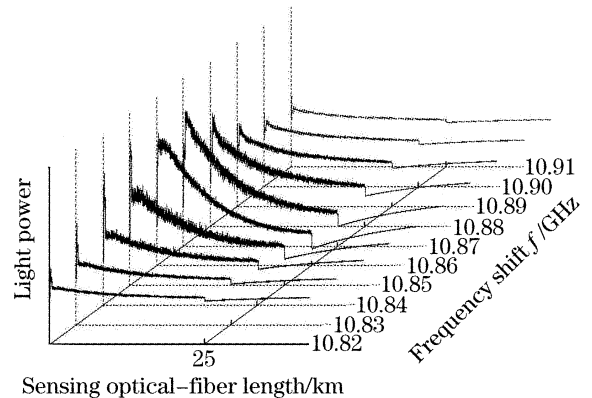


图 6 采用扩展接收技术后的接收信号

Fig. 6 Received signal with polarization expanding receiving technique

5 结 论

对于布里渊光时域分析中存在的偏振相关接收信号衰落,进行了理论分析和数值模拟,表明无论传感光纤的双折射率如何随机变化,采用偏振扩展接收技术可减小布里渊光时域分析接收信号受偏振态失配的影响。该抗偏振衰落技术只需增加一个偏振控制器对一路参考光进行控制,不需要反馈控制,布里渊光时域分析的结构也不需要改动,但克服偏振态随机变化影响的效果明显,对于偏振态变化缓慢而重复发送光脉冲采样的检测系统,提供了一种解决偏振失配的有效方案。初始实验结果验证了偏振扩展接收技术是一种较适用于布里渊光时域分析系统的消偏振衰落技术。

参 考 文 献

- 1 T. Kurashima, M. Tateda, T. Horiguchi *et al.*. Performance improvement of a combined OTDR for distributed strain and loss measurement by randomizing the reference light polarization state [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(3): 360~362
- 2 X. Bao, J. Dhliwayo, N. Heron *et al.*. Experimental and theoretical studies on a distributed temperature sensor based on Brillouin scattering[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(7): 1340~1348
- 3 H. Naruse, M. Tateda, H. Ohno *et al.*. Linear strain

- distribution dependence of the Brillouin gain spectrum [C]. *Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest*, 2002, *OFS* 2002, 15th, 2002, **1**: 309~312
- 4 Govind P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics* [M]. Jia Dongfang, Yu Zhenhong, Tan Bin *et al.* transl., Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 223~240 (in Chinese)
G. P. Agrawal. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 贾东方, 余震虹, 谈斌等译, 北京: 电子工业出版社, 2002. 223~240
- 5 Xiaoyi Bao, Qinrong Yu, Liang Chen. Simultaneous strain and temperature measurements with polarization-maintaining fibers and their error analysis by use of a distributed Brillouin loss system[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(12): 1342~1344
- 6 Song Muping. The technique of Brillouin scattering distributed optical fiber sensing based on microwave electric optical modulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1111~1114 (in Chinese)
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
- 7 Song Muping, Zhao Bin, Zhang Xianmin. Brillouin optical time domain analysis distributed optic-fiber sensor based on microwave electric optical modulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8): 1053~1056 (in Chinese)
宋牟平, 赵斌, 章献民. 基于微波电光调制的布里渊光时域分析传感器[J]. 光学学报, 2005, **25**(8): 1053~1056
- 8 Liu Diren, Song Muping, Zhang Xianmin *et al.*. Influence of stress gradient on measurement accuracy of Brillouin optical-time-domain-reflectometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(4): 501~505 (in Chinese)
刘迪仁, 宋牟平, 章献民等. 应变梯度对布里渊光时域反射计测量精度的影响[J]. 光学学报, 2005, **25**(4): 501~505
- 9 Muping Song, Bin Zhao, Xianmin Zhang. Optical coherent detection Brillouin distributed optical fiber sensor based on orthogonal polarization diversity reception[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(5): 271~274
- 10 Liu Diren, Song Muping, Zhang Xianmin *et al.*. Polarization-induced fading eliminated technique for coherent detection of Brillouin scattering spectrum [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(9): 1191~1194 (in Chinese)
刘迪仁, 宋牟平, 章献民等. 布里渊散射谱相干检测的消偏振衰落技术[J]. 光学学报, 2005, **25**(9): 1191~1194