

文章编号: 0253-2239(2005)09-1191-4

布里渊散射谱相干检测的消偏振衰落技术*

刘迪仁^{1,2} 宋牟平¹ 章献民¹ 陈抗生¹

(¹ 浙江大学信息与电子工程学系, 杭州 310027)

(² 长江大学地球物理系, 荆州 434023)

摘要: 在布里渊光时域反射计(BOTDR)的相干检测系统中,为减小偏振失配对布里渊谱测量精度的影响,针对后向布里渊散射光偏振态沿光纤随机变化,而同一记录点在重复采样周期内几乎不变的特点,结合偏振分集和扩展的思想,提出了实现简单而有效的时域偏振分集技术。理论分析表明,不管布里渊散射信号光的偏振态如何随机变化,采用该技术有较稳定的信号光功率与本振光被外差接收,接收信号对偏振态随机变化不敏感。系统实际上可基本不改变原系统体系,只对本振光施以无循环反馈的简单偏振控制。在布里渊时域反射计系统中实验对比了采用与不采用该技术的结果,表明前者的接收信号功率幅度约是后者的四分之一,抑制幅度起伏效果明显。

关键词: 光电子学; 光纤传感器; 布里渊散射; 相干检测; 偏振

中图分类号: TN247 文献标识码: A

Polarization-Induced Fading Elimination Technique for Coherent Detection of Brillouin Scattering Spectrum

Liu Diren^{1,2} Song Muping¹ Zhang Xianmin¹ Chen Kangsheng¹

(¹ Department of Information and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

(² Department of Geophysics, Yangtze University, Jingzhou 434023)

Abstract: In order to reduce the effect of polarization mismatch on detection of Brillouin scattering spectrum in the coherent detection system for Brillouin optical time-domain reflectometry (BOTDR), based on the feature of Brillouin scattering light and the principles of the polarization spreading and the polarization diversity, the time-domain polarization diversity (TDPD) technique is introduced. The TDPD is implemented easily and effectively for BOTDR. The theoretical analysis shows that with TDPD more than half of signal power is heterodyned with the local light no matter how their polarizations vary, and the received signals are insensitive to the random variation of the polarization of Brillouin backscattering light. The TDPD is implemented by performing simple and non-feedback polarization control on the local light, and the original architecture of BOTDR is less changed. The comparison between the system with and without TDPD shows that the fluctuation of the received signal light power with TDPD is 4.2 times less than that without TDPD.

Key words: optoelectronics; optic fiber sensor; Brillouin scattering; coherent detection; polarization

1 引 言

在布里渊光时域反射计(BOTDR)中,通过测量后向布里渊散射谱的频移得到光纤传感的温度和应变等信息^[1~3]。后向布里渊散射信号微弱且与瑞利散射信号频率相差仅约 11 GHz^[4,5],为检测它,采用与本振光外差的相干检测系统。这种相干检测系

统具有灵敏度高等优点,但对信号光与本振光的相对相位差和偏振匹配很敏感。这两者会引起相干接收的功率起伏,使得布里渊谱的测量精度下降。为改善布里渊时域反射计等传感技术的性能,要求其高性能相干检测系统不仅调制频率控制较精细,而且能较好地解决本振光与信号光的相位噪声和偏振

* 浙江省自然科学基金(M603127)资助课题。

作者简介: 刘迪仁(1965~),男,副教授,博士研究生,主要从事光纤传感技术、微波光子学等方面的理论和应用研究。

E-mail: drliu@zju.edu.cn

收稿日期: 2004-11-29; 收到修改稿日期: 2005-03-21

失配的影响问题。

目前克服偏振失配影响的技术主要有偏振跟踪控制、保偏光纤、偏振扩展和偏振分集等^[6~11]。偏振跟踪^[6,7]因采用反馈回路驱动的偏振控制器连续地进行偏振态匹配,其响应速度受到限制,仅可应用于偏振态变化缓慢、平稳的场合。而布里渊时域反射计沿传感光纤上采样点的散射波形是一个偏振态随机和迅速变化的信号。保偏光纤成本高且损耗较标准的单模光纤大,不宜用于长距离的通信或传感场合。偏振分集^[8,11](光路分集)接收机的复杂程度几乎是标准接收机的两倍。偏振扩展技术^[9,10]是在时域上将参与外差的本振光或信号光功率在每比特内扩展到整个偏振态,这样保证至少有一半以上的功率外差接收,从而大大减小接收功率对偏振态变化的起伏。实际上就是一种有别于前面光路分集的时域偏振分集技术。本文从偏振失配对相干检测的影响分析出发,针对布里渊时域反射计传感系统的信号特点,结合偏振分集和扩展的原理,提出了布里渊时域反射计系统中克服偏振起伏影响的时域偏振分集技术(TDPD),并作了理论分析和相关的实验研究,取得了较好的效果。

2 理 论

在布里渊时域反射计系统中,传感光纤上的后向布里渊散射光与本振参考光外差接收,相干检测信号为

$$i = 2(\mathbf{E}_B \cdot \mathbf{E}_r) \exp[j(\omega_{IF}t + \varphi)], \quad (1)$$

式中 $\omega_{IF} = \omega_B - \omega_r$ 和 $\varphi = \varphi_B - \varphi_r$ 分别为布里渊散射信号光与本地参考光间的中频信号角频率和相位差, \mathbf{E}_B 和 \mathbf{E}_r 为布里渊散射光和本振参考光场的复幅值。光纤上传感点的后向布里渊散射光(光强 I_B) 偏振态随机变化,由主轴方位角 θ_B 和椭圆率角 β_B 表示的任意椭圆偏振 \mathbf{E}_B 的琼斯矢量为

$$\mathbf{E}_B = \begin{bmatrix} E_{Bx} \\ E_{By} \end{bmatrix} = \sqrt{I_B} \begin{bmatrix} \cos \theta_B \cos \beta_B - j \sin \theta_B \sin \beta_B \\ \sin \theta_B \cos \beta_B + j \cos \theta_B \sin \beta_B \end{bmatrix}, \quad (2)$$

本地参考光(光强 I_r) 为线偏振光,偏振方位角为 θ_r , 其琼斯矢量为

$$\mathbf{E}_r = \begin{bmatrix} E_{rx} \\ E_{ry} \end{bmatrix} = \sqrt{I_r} \begin{bmatrix} \cos \theta_r \\ \sin \theta_r \end{bmatrix}, \quad (3)$$

测量中对本地参考光微波调制使 $\omega_{IF} \approx 0$, 先经中频带通滤波,再中频检波。由(2)式、(3)式代入(1)式,取实部得到相干检测的基带信号:

$$I_R = 2 \sqrt{I_B I_r} [\cos \beta_B \cos \varphi \cos(\theta_B - \theta_r) + \sin \beta_B \sin \varphi \sin(\theta_B - \theta_r)] = 2 \sqrt{I_B I_r} [\cos^2 \beta_B \cos^2(\theta_B - \theta_r) + \sin^2 \beta_B \sin^2(\theta_B - \theta_r) \cos(\varphi + \eta)], \quad (4)$$

其中 $\eta = \arctan \frac{\sin \beta_B \sin \varphi \sin(\theta_B - \theta_r)}{\cos \beta_B \cos \varphi \cos(\theta_B - \theta_r)}$, η 取决于布里渊散射光相对参考光的偏振态变化。

(4)式表明偏振失配和相位噪声会使得相干检测的光功率随机衰落,其信号起伏幅度可能在 0 到最大值之间变化,由此造成系统性能的不稳定和布里渊谱的测量误差。

在如图 1 所示的布里渊光时域反射计相干检测系统中,光源发射的信号光被调制为一定重复周期的光脉冲后进入传感光纤,其后向布里渊散射信号是一列与入射脉冲光相同重复周期且展宽了的波形,其偏振态随时间随机变化;同一采样周期内光纤上的不同采样点所对应的散射波形上点的偏振态各不相同,不同采样周期内重复采样点所对应的散射波形上点的偏振态可认为相同;本振光信号的偏振态为线偏振。为此,针对布里渊时域反射计系统信号的这些特点提出时域偏振分集技术以减小其偏振衰落的影响。其基本思想是:如果同一采样点的几

个重复采样周期内信号光偏振态保持不变,则将重复采样周期的信号功率分集到与不同的偏振态本振光外差接收,然后将这些分集信号均方根处理后作为输出信号。这样至少能保证总信号光能量的一半被外差接收,实现减小偏振失配的衰落影响。

偏振分集对线偏振的参考光施加周期的偏振控制以改变其偏振方向,其周期与记录点重复采样周期

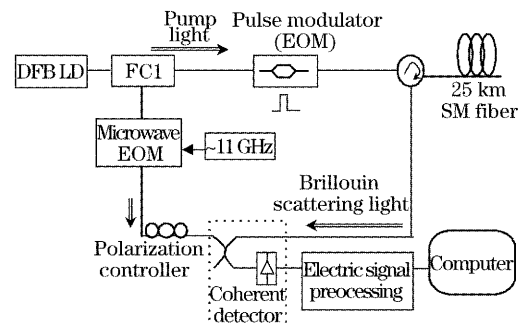


图 1 偏振扩展的布里渊时域反射计相干检测系统
Fig. 1 Coherent detect system of BOTDR with TDPD

相同。如果共作 N 支分集,第 k 支分集的参考光有

$$\mathbf{E}_{rk} = \sqrt{I_r} \begin{bmatrix} \cos \theta_k & -\sin \theta_k \\ \sin \theta_k & \cos \theta_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_r \\ \sin \theta_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_r + \theta_k) \\ \sin(\theta_r + \theta_k) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$\theta_k = \pi(k-1)/N, k = 1, 2, \dots, N$ 。按上述时域偏振分集技术的思想由(4)式可得输出光信号 I_{RT} ：

$$\begin{aligned} I_{RT}^2 &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N I_{Rk}^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N 4I_B I_r [\cos \beta_B \cos \varphi \cos(\theta_B - \theta_r - \theta_k) + \sin \beta_B \sin \varphi \sin(\theta_B - \theta_r - \theta_k)]^2 = \\ &= 4I_B I_r \left[\cos^2 \beta_B \cos^2 \varphi + \frac{1 - \cos^2 \beta_B - \cos^2 \varphi}{N} \sum_{k=1}^N \sin^2(\theta_B - \theta_r - \theta_k) + \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{4N} \sin 2\beta_B \sin 2\varphi \sum_{k=1}^N \sin 2(\theta_B - \theta_r - \theta_k) \right], \quad (6) \end{aligned}$$

因为 $\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \sin^2(\theta_B - \theta_r - \theta_k) = \frac{1}{2}, \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \sin 2(\theta_B - \theta_r - \theta_k) = 0$, 则

$$I_{RT}^2 = 4I_B I_r \left[\cos^2 \beta_B \cos^2 \varphi + \frac{1}{2} (1 - \cos^2 \beta_B - \cos^2 \varphi) \right] = I_B I_r (1 + \cos 2\beta_B \cos 2\varphi), \quad (7)$$

(7)式表明:1)信号 I_{RT} 与布里渊散射信号光的偏振主轴方位角无关。说明采用该技术从理论上可消除偏振方位角随机变化的影响,但仍然会因为相位噪声的影响而随机起伏,并且相位噪声的影响会因为信号光的椭圆率不同而变化;2)当布里渊散射光为线偏振光时, $\cos 2\beta_B = 1$, 相位噪声引起的信号衰落最大;3)当布里渊散射信号为圆偏振光时, $\cos 2\beta_B = 0$, 偏振和相位噪声的随机变化都不会引起检测信号功率的变化;4)信号 I_{RT} 与 N 无关,即理论上无论是几支分集,采用该方案的消偏振衰落的效果相同。

3 实 验

在图 1 所示的实验系统中,频宽小于 1 MHz 的激光源发出的光由耦合器 FC1 分成抽运光和本振参考光。抽运光经脉冲电光调制器被调制为 2 kHz 重复频率的光脉冲后,注入 25 km 长的传感光纤中。传感光纤上各点的后向布里渊散射光返回到注入端,经过光纤耦合器输出得到一系列与调制方波周期相同的散射波形。与布里渊散射信号光相干前,参考光由微波调制器产生近似布里渊频移,为实现时域偏振分集对其施加偏振控制。

因为理论上分集支数对消偏衰落没有影响,实验中采用了易于实现的两支正交分集。基于两支时域正交偏振分集的相干检测系统实现方案如图 2 所示。中心控制系统(CCS)负责偏振控制器正交偏振控制策略和微波发生器微波调制策略的实施,并控制数据采样处理子系统对布里渊散射基带信号进行采样处理。中心控制系统通过脉冲电压驱动偏振

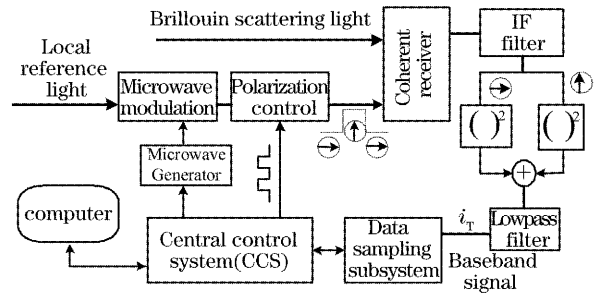


图 2 基于时域偏振分集技术的相干检测系统实验装置
Fig. 2 Experimental setup of coherent detection system based on TDPD

控制器使本振光偏振态在相邻的两个散射波形周期间相互正交交替转换,参考光与散射光外差后,产生的中频信号再通过中频滤波,平方、求和平均以及低通滤波等处理,得到布里渊散射基带信号。基带信号经 80 MHz 采样处理后被发送给主机端用户界面程序,进行软件处理后得到沿光纤各采样点的布里渊谱数据(如图 3 所示),由此可提取所需的温度或应力传感信息。

图 4 给出了布里渊散射分布式传感系统所测得沿光纤的基带信号幅度分布图。图 4(a)和图 4(b)的对比表明,当没有采用时域正交偏振分集技术时,由于偏振失配对相干检测的随机影响,使得外差接收机输出的信号幅度随机起伏较大,致使最终测得的传感信号的幅度出现随机振荡。而当采用正交偏振扩展时,尽管仍然还有一定幅度的信号衰落,但相对图 4(a)的信号幅度起伏明显减小。对图 4 中的曲线采用上下包络线间隔评价信号幅度起伏,多采样点随机取样的统计估算结果表明,采用正交偏振

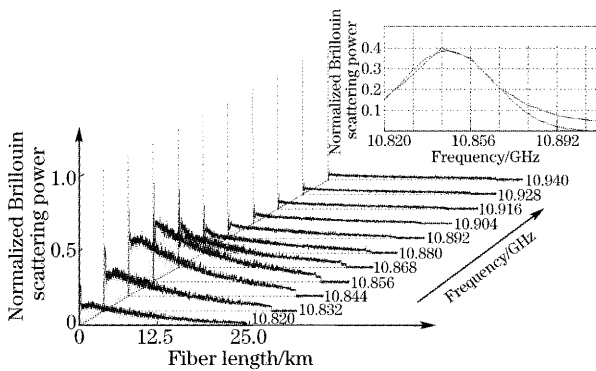


图 3 传感光纤各处的布里渊散射光谱

Fig. 3 The panorama of the Brillouin scattering signal extension technology's upper and lower envelope line interval is about one-fourth of the one not used, considering phase and intensity noise and other factors causing signal fading, using time-domain polarization diversity technology for Brillouin time-domain reflectometry system fading elimination has a significant effect, so that it can improve the accuracy of Brillouin spectrum and measured sensing parameters.

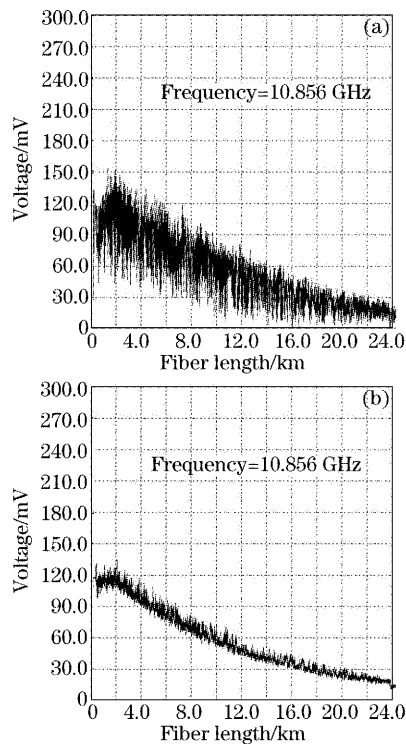


图 4 布里渊散射分布式传感系统测得沿光纤的信号幅度分布。(a)没采用时域偏振分集技术,(b)采用时域偏振分集技术

Fig. 4 Amplitude of received signal along fiber by BOTDR. (a) without TDPD, (b) with TDPD

4 结 论

无论布里渊散射光的偏振态如何随机变化,采用时域偏振分集消衰落技术使得布里渊时域反射计相干检测系统的性能受本振光与信号光偏振态失配影响小。与其他几种解决偏振失配的技术相比较,该技术可采用较简单的外差接收机,对偏振控制器响应速度的要求也不高,不需要反馈控制,外差接收机的结构也不需要改动,克服入射光的偏振态随机变化影响的效果明显。对于偏振态变化迅速剧烈而重复发送光脉冲采样的相干检测系统,该技术提供了一种解决偏振失配的有效方案。理论分析和实验结果表明时域偏振分集是一种较适用于布里渊时域反射计系统的消偏振衰落技术。

参 考 文 献

- 1 Tsuneo Horiguchi, Kaoru Shimizu, Toshiuo Kurashima *et al.*. Development of a distributed sensing technique using Brillouin scattering[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(7): 1296~1302
- 2 Hiroshige Ohno, Hiroshi Naruse, Mitsuru Kihara *et al.*. Industrial applications of the BOTDR optical fiber strain sensor [J]. *Optical Fiber Technol.*, 2001, **7**(1): 45~64
- 3 Song Muping. The Technique of Brillouin scattering-distributed optical fiber sensing based on microwave electrooptical modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1111~1114 (in Chinese) 宋牟平. 微波光电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
- 4 Govind P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. third edition. New York: Academic Press, 2001. 355~388
- 5 Zaixuan Zhang, Laixiao Li, Dan Geng *et al.*. Study on forward stimulated Brillouin scattering in a backward pumped fiber Raman amplifier[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(11): 627~629
- 6 Leonid G. Kazovsky. Phase- and polarization-diversity coherent optical techniques[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1989, **7**(2): 279~292
- 7 Nigel G. Walker, Graham R. Walker. Polarization control for coherent communications[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1990, **8**(3): 438~458
- 8 Kazumasa Takada. Analysis of polarization dependence of optical low coherence reflectometry using an active Faraday rotator[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(11): 2916~2922
- 9 Pierluigi Poggiolini, Sergio Benedetto. Theory of polarization spreading techniques [J]. *Communications, IEEE Transactions on*, 1994, **42**(5): 2105~2118
- 10 Sergio Benedetto, Pierluigi Poggiolini. Theory of polarization spreading techniques-Part II [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1994, **42**(6): 2291~2304
- 11 Zhou Xiaodong, Zhao Changchun, Tang Weizhong *et al.*. The polarization-induced fading elimination method of interferometric fiber-optic sensor arrays[J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **A25**(4): 294~298 (in Chinese) 周效东,赵长春,汤伟中等. 干涉型光纤传感器复用系统的消偏振衰落技术[J]. *中国激光*, 1998, **A25**(4): 294~298