

偏振分集技术及其在光纤传感器中的应用

倪 明 曹春燕 胡正良 张学亮

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 研究了偏振分集技术消除干涉型光纤传感器中偏振衰落问题的基本原理及实现方法。理论分析表明,偏振二分集可大大缓解偏振衰落。搭建光纤传感系统对偏振二分集技术进行了实验验证,实验中单路最小可视度接近 0,而偏振二分集得到的最小可视度为 0.4。实验结果表明系统采用的相位载波调制解调技术实现了信号的稳定检测。

关键词 光纤光学; 偏振衰落; 偏振分集; 光纤传感器

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0706005

Polarization Diversity Technology and Its Application in Fiber Optic Sensors

Ni Ming Cao Chunyan Hu Zhengliang Zhang Xueliang

(College of Photo-Electric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract The basic principle and realizing method of polarization diversity receivers to eliminate polarization-induced fading in fiber optic interferometers are studied. Theoretical analysis shows that bi-state polarization diversity receiver can reduce polarization-induced fading. The optical fiber sensing system is built to test the bi-state polarization diversity receiver technique, with the minimum visibility of 0 at single way and 0.4 at bi-state polarization diversity receiver. The result shows that phase carrier demodulation technology adopted by the system can realize stable detection of the signal.

Key words fiber optics; polarization-induced fading; polarization diversity receiver; fiber optic sensor

OCIS codes 060.2370; 060.2420; 140.3510

1 引 言

光在光纤中的偏振态特性对利用光纤进行信息的获取与传递有着重要的影响,它涉及到许多仪器,如光纤陀螺仪和干涉型光纤水听器等的稳定性^[1]。在一般单模光纤中传输的 HE_{11} 基模实际上是由两个相互正交的线偏振模 HE_{11}^x 和 HE_{11}^y 构成。理想情况下,两者相速相同,具有相等的相位,其合成光为线偏振光。但是,实际上光纤中与两偏振模相应的折射率 n_x 和 n_y 不相等,产生双折射现象,即合成偏振态出现椭圆偏振;同时,由于光纤的微弯、扭曲、环境温度的变化使 n_x 和 n_y 随机变化,导致光纤输出偏振态随机变化,反映在干涉仪可视度在 0~1 之间随机变化,此现象被称为光纤干涉仪的偏振诱导信

号衰落现象,简称偏振衰落现象。

偏振衰落是光纤干涉仪的一个基本问题,例如由于光纤的双折射效应引起相干两束光的偏振态的任意改变,导致干涉信号的随机漂移。抗偏振衰落主要技术方案有光路保偏技术^[2]、法拉第旋镜法^[3]、偏振分集技术^[4,5]、偏振态控制^[6]和偏振调制^[7]等。光路保偏技术简单,但损耗大、偏振难以保持,不适合远程复杂光纤传感系统;偏振态控制技术对单通道系统是有效的,但难以实现多通道的同时控制;偏振调制技术复杂,实现难度大;法拉第旋镜法消偏效果好、技术成熟,目前得到很多应用,但它仅适用迈克耳孙干涉仪结构,且增加传感头的复杂度;偏振分集技术可实现传感单元的简化,且适合应用远程多通道光纤传感系统,是实际系统中得到应用的技术之一^[8]。

收稿日期: 2011-02-21; **收到修改稿日期**: 2011-03-30

基金项目: 国家 863 计划(2006AA09Z121)资助课题。

作者简介: 倪 明(1972—),男,博士,教授,硕士生导师,主要从事光纤传感技术等方面的研究。

E-mail: niming_1@sina.com(中国光学学会会员号: S040420569S)

偏振分集技术实现的难点之一是偏振分集接收器(PDR)的制作。偏振分集接收器可以是一个三态掩膜片^[4,9]或由多个偏振器构成^[5]。文献[5]建立理论模型分析了偏振分集与系统偏振导致的相位噪声大小的关系。文献[8]介绍了两个48基元光纤水听器阵列的声学性能,光纤水听器系统采用双态PDR技术,文中对偏振分集技术进行了综述。文献[10]尝试将时域偏振分集技术应用于布里渊光时域反射计(BOTDR)的相干检测系统中。本文侧重偏振分集在光纤传感中的应用开展研究,针对光纤水听器大规模阵列中经常使用的双态PDR进行分析,比较了双态与三态PDR、无PDR情况下系统的性能指标。建立了理论模型,数值仿真验证了PDR的最佳夹角问题。另外,着重讨论了采用PDR的多路信号输出中如何得到最终输出信号的问题。

2 理论模型及仿真

2.1 基本原理

偏振分集技术通过在接收端采用不同夹角的检偏器对信号进行检偏以消除被检信号的偏振衰落问题。偏振分集技术的基本思想是:利用两个或两个以上成一定夹角的检偏器在接收端对信号进行检测,完全衰落将不会同时发生,这样总能从其中一个拾取到不为零的可见度。偏振分集接收器由两个检偏器构成称为双态PDR,三个检偏器构成称为三态PDR, N 个检偏器构成称为 N 态PDR。实际应用中大多采用双态或三态PDR。

以三态PDR为例说明偏振分集接收技术的实

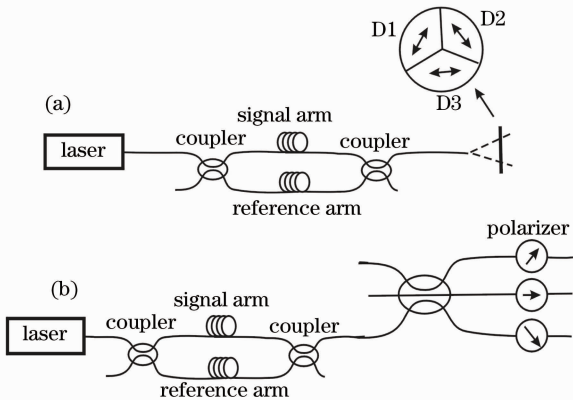


图1 采用三态PDR的马赫-曾德尔干涉仪原理框图。

(a) 三态掩膜法;(b) 光纤偏振器PDR

Fig.1 Schematic diagram of a Mach-Zehnder interferometer with a tri-state PDR. (a) With a polarization mask; (b) with three polarizers

现。偏振分集接收器有两种实现方式:一种称为三态掩膜法,即利用掩膜的方法制作三个夹角 120° 的检偏器(D)在光电转换前进行检偏,如图1(a)所示;另一种则通过三个光纤偏振器来实现,如图1(b)所示。

偏振分集接收技术通过将光纤偏振器置于光电探测器之前选择偏振态,它适用于大规模阵列。虽然当输入偏振态与偏振器的起偏轴正交时衰落依然会发生,但是如果结合三个夹角成 60° 的分离偏振器选择偏振态,完全衰落将不会同时发生,这样总能从其中一个拾取到不为零的可见度。

图1显示一个采用三态PDR接收的马赫-曾德尔干涉仪原理框图。该方案很容易应用于一个采用时分或波分复用的大规模干涉型光纤传感阵列,几乎不增加系统的复杂性。

2.2 模型及仿真

假设干涉的两束光为线偏振光,它们的方位角分别为 θ_r 和 θ_s ,放置于光电探测器前的偏振器方位角为 θ ,那么干涉信号可以写成

$$I = I_1 + I_2 + \sqrt{I_1 I_2} [\cos(\theta_s - \theta_r) + \cos(\theta_s + \theta_r - 2\theta)] \cos \phi, \quad (1)$$

式中 I_1, I_2 分别为两束光的光强, ϕ 是它们的相位差,也是要探测的信号。探测信号的可见度为

$$V = |\cos(\theta_s - \theta_r) + \cos(\theta_s + \theta_r - 2\theta)|/2. \quad (2)$$

从(2)式可以看出,可见度随参数 θ_r, θ_s 及 θ 变化,最大值为1,最小值为0。假设 θ_r, θ_s 在区间 $[0, 2\pi]$ 等概率分布,通过计算机仿真该模型,在没有PDR、双态PDR以及三态PDR情况下,通过选择最大输出信号得到系统的可见度。其中没有PDR是指一个偏振器检偏的情况,双态PDR则是两个夹角成 90° 的偏振器进行检偏,三态PDR则是三个夹角成 60° 的偏振器进行检偏。

计算了可见度小于某一定值 V_0 的概率,图2显示该概率随 V_0 的变化曲线。从图中可以看出,使用一个或两个偏振器完全消除偏振衰落是不可能的,但采用双态PDR相比没有PDR偏振态引起的信号衰落会大大缓解,例如,可见度小于0.1的概率从0.187降为0.00672。采用三态PDR干涉仪的偏振衰落将会完全消除,且最小可见度为0.37。

双态PDR降低系统代价且有一个可以接受的性能,所以在实际系统中经常被采用。模拟了两偏振器夹角成 $30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 情况下的最大可见度,计算最大可见度小于某一可见度值 V_0 的概率,如图3所示。不同夹角的双态PDR检测可见度小于0.1的概率分别为0.036,0.012,0.0067,可以得出两个偏

振器成 90° 检测是最佳的检测方案。

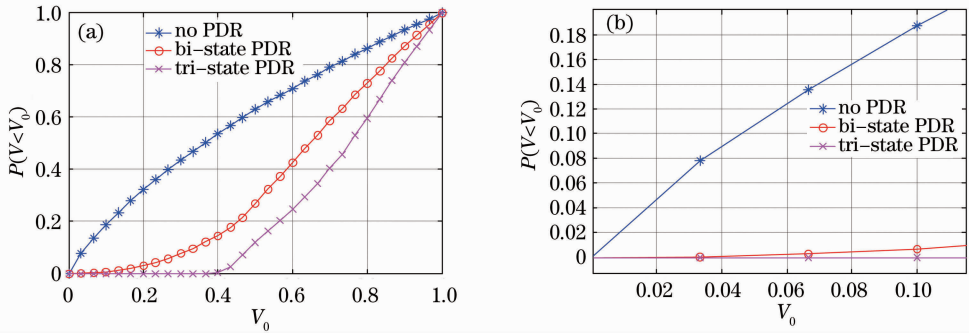


图 2 可测度小于 V_0 的概率。(a) V_0 从 0 到 1；(b) V_0 从 0 到 0.1

Fig. 2 Probability when visibility is smaller than V_0 . (a) V_0 changes from 0 to 1; (b) V_0 changes from 0 to 0.1

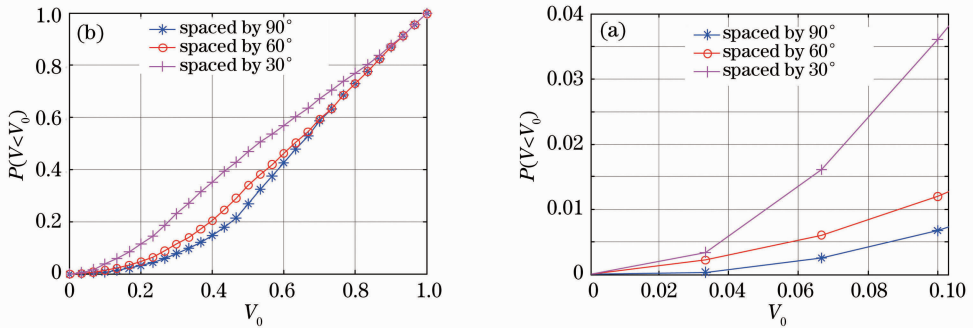


图 3 偏振器不同夹角双态 PDR 检测可测度小于 V_0 的概率。(a) V_0 从 0 到 1；(b) V_0 从 0 到 0.1

Fig. 3 Probability when visibility is smaller than V_0 . (a) V_0 changes from 0 to 1; (b) V_0 changes from 0 to 0.1

3 实验及结果

为验证偏振分集技术基本原理，在实验室搭建了偏振分集测试系统，如图 4 所示。窄线宽光源发出激光，经光纤隔离器后经过 6.5km 光纤盘，在输入一个迈克耳孙干涉仪前，由偏振控制器 (PC1) 控制输入偏振态，干涉仪输出光又经过一个 6.5 km 光纤盘，输出光由一个 1×3 光纤耦合器分光后采用三个不同夹角的光纤偏振器检偏，光信号分别由三个光电探测器 A, B, C 接收。系统中所有光纤都采用一般单模光纤。偏振分集技术验证主要由 4 个偏振控制器来实现，偏振控制器 PC1 调整输

入偏振态，PC2, PC3, PC4 则调整输出偏振态与各偏振器的夹角，以达到设计角度。信号检测采用内调制相位载波 (PGC) 调制解调技术^[11]，光源的调制频率为 ω_0 ，信号则通过调制干涉仪一个臂上的相位调制器产生。

实验对三路检偏器输出信号可测度变化与检偏夹角之间的关系进行研究。图 5(a), (b) 分别显示输入偏振态为椭圆或线偏振情况下，三个检测通道可测度随输入偏振态方位角的变化曲线。在图 5(a) 中，通过调整 PC2, PC3 使后端检测偏振器平行，另一个偏振器则通过调整 PC4 使其与前两个垂直。在图 5(b)

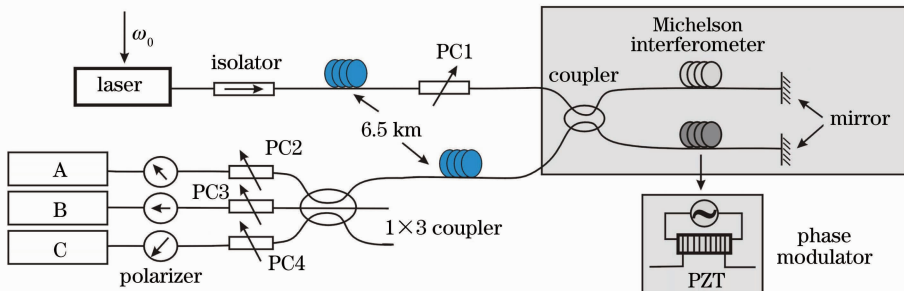


图 4 含有 PDR 的光纤迈克耳孙干涉仪实验系统原理结构图

Fig. 4 Schematic diagram of a fiber Michelson interferometer test system with PDR

中,通道 A,B 的偏振器是正交的,通道 C 的偏振器与通道 B 的平行。从图 5(a),(b)可以得出,输入系统偏振态为椭圆或线偏振情况下,干涉仪远端接收端正交的两个偏振器检测信号,干涉仪可视度作反向变化;干涉仪远端接收端平行的两个偏振器检测信号,干涉仪可视度作同向变化。

下面分析夹角 90° 双态 PDR 的消偏效果。从图 5(b)中,选择通道 A 和 B 的最大值,得到双态 PDR 的可视度,该可视度随输入偏振态的变化曲线如图 5(c)所示。比较图 5(b),(c),没有 PDR,即单个偏振器检测时,信号最小可视度接近 0,而采用双态 PDR 检测信号时,信号最小可视度为 0.4,也就是说,采用双态 PDR 将大大缓解干涉仪的偏振衰落。

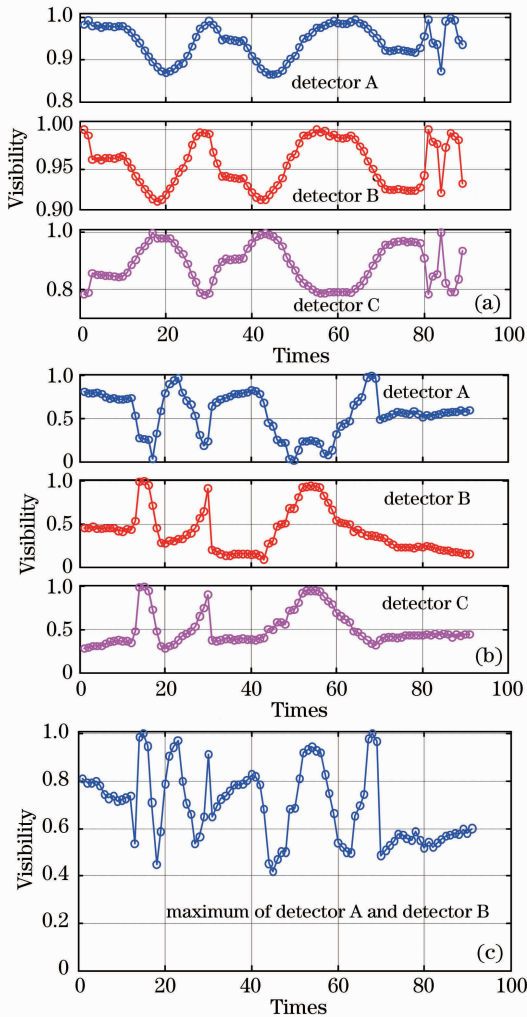


图 5 可视度随着输入偏振态变化。(a)椭圆偏振态;(b)线偏振态;(c)线偏振态,选择通道 A,B 的最大值检测信号
 Fig. 5 Visibility changes with the input state of polarization. (a) Ellipse polarization; (b) linear polarization; (c) bi-state PDR using detector A and detector B with linear polarization

4 在传感器中的应用

讨论在采用偏振分集技术的光纤传感系统中,如何得到传感信号。实验系统如图 4 所示,系统采用光源内调制 PGC 调制解调技术,干涉仪输出的光信号经光电探头转换为电信号

$$U = A + B\cos[C\cos\omega_0 t + \phi(t)], \quad (3)$$

式中 A 是干涉信号的直流成分, B 是交流部分的幅度,反映干涉仪的可见度, C 是 PGC 调制深度, ω_0 是调制的角频率, $\phi(t) = \phi_s(t) + \phi_0(t)$,由信号 $\phi_s(t)$ 与低频慢漂 $\phi_0(t)$ 组成。

4.1 高可视度情况下信号检测

大部分情况下三态 PDR 的三路输出信号可视度或 B 值都比较大,解调的信号 ϕ_s 都是可用的,针对单频信号进行了实验。如图 4 所示,信号由相位调制器产生,PGC 调制频率为 10 kHz,数据采样率为 80 kHz,解调信号如图 6 所示,信号为单频正弦波信号,频率为 500 Hz,信号采样率 6.67 kHz,三路解调信号基本重合。计算它们的相关系数,第一路与第二路信号的相关系数为 0.999,第一路与第三路信号的相关系数为 0.999,第二路与第三路信号的相关系数为 1.000。由此可以得出,三态 PDR 输出的三个通道在可视度满足要求的情况下,检测信号基本没有差别,都可以作为系统输出信号。

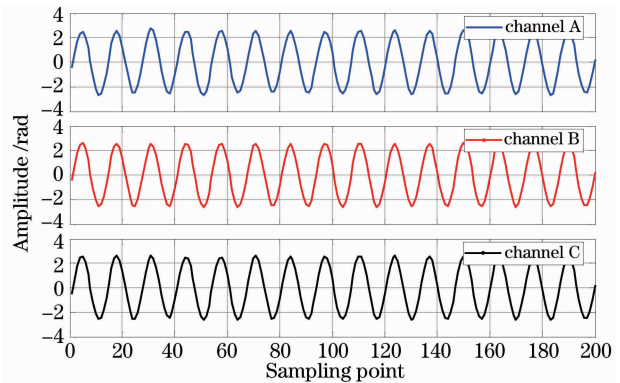


图 6 三态 PDR 高可视度情况检测信号波形
 Fig. 6 Signal waveforms detected by tri-state PDR with high visibility

4.2 一般情况下信号检测

由(3)式,系统三路输出信号隔直后写成:

$$U_1 = B_1 \cos[C\cos\omega_0 t + \phi_s(t) + \phi_{01}(t)], \quad (4)$$

$$U_2 = B_2 \cos[C\cos\omega_0 t + \phi_s(t) + \phi_{02}(t)], \quad (5)$$

$$U_3 = B_3 \cos[C\cos\omega_0 t + \phi_s(t) + \phi_{03}(t)]. \quad (6)$$

各路输出低频慢漂 $\phi_{01}(t)$, $\phi_{02}(t)$, $\phi_{03}(t)$ 幅度大,对 PGC 解调影响大,定义

$$\begin{cases} \phi_{21} = \phi_{02} - \phi_{01}, \\ \phi_{31} = \phi_{03} - \phi_{01}. \end{cases} \quad (7)$$

在如图4所示的实验系统中,多次测量了通道间的低频相位差,测量结果如表1所示。从表中可以看出,PGC调制三路输出信号间相位没有确定的关系,该现象也可以通过观察原始信号的波形得出相同的结论。

表1 PGC调制三路输出信号间相位关系

Table 1 Phase relation of three output signals by PGC modulation

Serial number	$\phi_{21}/(^{\circ})$	$\phi_{31}/(^{\circ})$
1	130.8	-34.3
2	85.8	-35.9
3	127.2	-38.4
4	126.9	-38.7
5	119.4	302.8
6	34.8	82.6
7	17.2	-17.3
8	68.2	-37.8

由于各路输出低频慢漂 $\phi_{01}(t)$, $\phi_{02}(t)$, $\phi_{03}(t)$ 没有确定的关系,这样PGC解调前信号(4)~(6)式难以合成后解调,建议对于一个传感器系统,信号检测采用如下方法:1)多路信号分别解调,解调后信号相加作为系统输出信号;2)选择可视度最大的一路解调,解调信号作为系统输出信号。

4.3 传感阵列应用

对于一个光纤传感器阵列,如果要求各探测单元信号都必须稳定检测,系统需采用三态PDR,三个偏振器相互夹角成 60° ,选择干涉信号的最大值进行解调或解调后信号相加,一个完全的偏振衰落将被消除。

为分析采用双态PDR光纤传感阵列出现偏振衰落(可视度小于0.1)的情况,以48单元光纤传感阵列为例,计算了采用双态PDR和没有PDR情况下出现偏振衰落单元数的概率分布。如图7所示,没有PDR时,出现偏振衰落概率最大的是9个单元,出现的概率为14.6%,其次是8个单元同时衰落,其概率为14.3%,而偏振衰落单元数很大的概率很小,没有偏振衰落(即出现偏振衰落的单元数为0)概率也很小,为 4.8×10^{-5} 。而采用双态PDR时,没有偏振衰落的概率为72.4%,1个单元出现衰落的概率为23.5%,2个单元出现衰落的概率为3.73%,所以说采用双态PDR光纤传感阵列,偏振衰落问题大大缓解。2002年1月搭建了一套32基元1 km

传输光纤水听器阵列,系统没有采取偏振控制技术,测试中常有8个基元信号出现消隐无法使用,这个结果与图7结果基本一致。

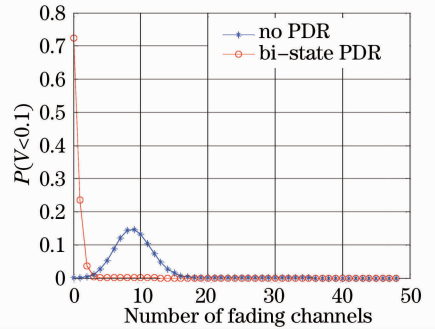


图7 48单元光纤传感阵列出现偏振衰落(可视度小于0.1)单元数的概率分布

Fig. 7 Probability distribution of a 48-element fiber optic sensors array experiencing a polarization-induced signal fading

实际应用中,双态PDR经常被光纤传感阵列采用,因为双态PDR相比三态PDR,减少电子元件及信号处理要求为原来的 $2/3$,系统造价大大减小,而性能下降可以接受。采用PGC解调信号,三个通道解调的信号幅度与相位都几乎完全一致,系统噪声本底为 $(1 \text{ kHz})7.7 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

5 结 论

在建立的理论模型基础上,计算机仿真结果表明,三态PDR偏振器夹角 60° 方案较优,而双态PDR偏振器夹角 90° 方案较优;采用三态PDR时,光纤干涉仪的偏振衰落将被完全消除,且最小可视度为0.37;双态PDR不能完全消除偏振衰落,但出现小可视度情况大大缓解,与没有PDR的情况相比,可视度小于0.1的概率减小到没有PDR时的 $1/28$ 。演示了一个双态PDR光纤干涉仪系统,实验得到的最小可视度为0.4,而如果不采用PDR系统最小可视度接近0。实验系统采用内调制PGC调制解调技术,在高可视度情况下三路检测信号高度一致,可选择其中一路作为传感器信号输出,同时得到系统的本底噪声为 $(1 \text{ kHz})7.7 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。对于一个光纤传感阵列,采用三态PDR可完全消除偏振衰落,而采用双态PDR可大大缓解偏振衰落,且大幅降低系统造价。以一个48单元光纤传感阵列为例,没有PDR时出现1个以上单元衰落的概率为99.95%,而采用双态PDR时出现1个以上单元衰落的概率为4.1%,实际应用中常采用双态PDR来抗偏振衰落。

参 考 文 献

- 1 Ni Ming. Investigation of the Key Technologies of Fiber Optic Hydrophone[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2003. 33~50
倪 明. 光纤水听器关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院, 2003, 33~50
- 2 Meng Zhou, Hu Yongming, Xiong Shuidong *et al.*. All polarization maintaining fiber hydrophone array[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **29**(5): 415~417
孟 洲, 胡永明, 熊水东 等. 全保偏光纤水听器阵列[J]. 中国激光, 2002, **29**(5): 415~417
- 3 A. D. Kersey, M. J. Marrone, M. A. Davis. Polarisation-insensitive fibre optic Michelson interferometer[J]. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(6): 518~520
- 4 N. J. Frigo, A. Dandridge, A. B. Tveten. Technique for elimination of polarization fading in fibre interferometers[J]. *Electron. Lett.*, 1984, **20**(8): 319~320
- 5 C. K. Kirkendall, A. Dandridge. Polarization induced phase noise in fiber optic interferometers with polarizer based polarization diversity receivers[C]. 15th Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest (OFS2002), 2002. 375~378
- 6 A. D. Kersey, M. J. Marrone, A. Dandridge. Experimental investigation of polarization-induced fading in interferometric fibre sensor arrays[J]. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(7): 562~563
- 7 Li Zhineng, Shen Liang, Zhou Xiaodong. Modulated polarization insensitive interferometric fiber-optic sensor[J]. *J. Zhejiang University (Engineering Science)*, 2002, **36**(1): 56~59
李志能, 沈 梁, 周效东. 偏振态调制干涉型光纤传感器[J]. 浙江大学学报(工学版), 2002, **36**(1): 56~59
- 8 G. A. Cranch, R. Crickmore, C. K. Kirkendall *et al.*. Acoustic performance of a large-aperture, seabed, fiber-optic hydrophone array[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2004, **115**(6): 2848~2858
- 9 Zhou Xiaodong, Zhou Wen. Development of an interferometric fiber-optic sensor and its array's divide/combine polarization-induced-fading eliminated technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(6): 773~778
周效东, 周 文. 干涉型光纤传感器及阵列的分集检测消偏振衰落技术的研究[J]. 光学学报, 1998, **18**(6): 773~778
- 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
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
- 11 Ni Ming, Xiong Shuidong, Meng Zhou *et al.*. Realization of digital demodulation of phase generated carrier technique in fiber optic hydrophone systems[J]. *Applied Acoustics*, 2004, **23**(6): 5~11
倪 明, 熊水东, 孟 洲 等. 数字化相位载波解调方案在光纤水听器系统中的实现[J]. 应用声学, 2004, **23**(6): 5~11