

文章编号: 0253-2239(2010)06-1566-05

干涉型光纤传感系统偏振分集接收实验研究

王 潇 张学亮 胡正良 曹春燕 胡永明

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 针对干涉型光纤传感器中存在的偏振诱导信号衰落现象,对偏振分集器(PDR)抗衰落原理进行了理论推导与软件仿真。设计并搭建了基于相位产生载波(PGC)调制解调、全光纤偏振分集器接收的光纤迈克耳孙型干涉传感实验系统,系统得出的信号与压电陶瓷光纤相位调制器产生的模拟信号基本相符。通过静态扭动干涉臂光纤改变干涉仪偏振状态,测量了PDR三通道可视度,得出信号稳定性、系统本底噪声与可视度的关系。结果表明,选择可视度大于0.5的偏振分集器通道输出可抑制信号衰落并实现信号稳定输出。

关键词 光纤光学;偏振分集;光纤干涉仪;可视度;偏振衰落

中图分类号 TN 253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103006.1566

Experimental Research on Interferometric Fiber-Optic Sensing System with Polarization Diversity Receiver

Wang Xiao Zhang Xueliang Hu Zhengliang Cao Chunyan Hu Yongming

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

Abstract Aiming at polarization-induced signal fading phenomenon generally existing in interferometric fiber-optic sensor, the principle of polarization diversity receiver (PDR) is theoretically introduced and demonstrated by simulation. Experimental sensing system of fiber-optic Michelson interferometer based on phase generated carrier (PGC) is designed and set up. An all-fiber tri-cell polarization diversity receiver is designed to receive the signal from the sensing system. The demodulated signal is in good accordance with the simulation signal produced by a piezoelectric phase modulator in one arm of the interferometer. The fringe visibilities obtained from the three output-channels of PDR are observed with the polarization state of the interferometer changed by twisting the fiber of the interferometer. The relationship of the signal stability, self-noise of the system, and fringe visibility are obtained. The results show that polarization-induced signal fading can be inhibited by selecting an output-channel of PDR with the fringe visibility higher than 0.5.

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

1 引 言

干涉型光纤传感器利用光纤相干检测技术进行信号探测,它因灵敏度高、便于复用被广泛应用于水下军事、石油勘探、保密监听和地震波测量等领域^[1,2]。受技术条件和工艺水平的限制,国内外一般使用普通的低成本单模光纤制作光纤传感器,但是受外界环境影响单模光纤中传输光的偏振态随机变化导致传感系统出现偏振诱导信号衰落现

象^[3,4],针对这一现象国内外已做了大量研究,但偏振衰落仍是阻碍光纤传感系统走向实用的重要问题之一^[5]。

为了消除偏振衰落对信号解调的影响,目前已有光路全保偏光纤法、法拉第旋镜法和偏振分集接收等几种重要抗偏振衰落方案^[6]。全保偏光纤法对保偏光纤及其他保偏光学器件性能要求较高^[7];法拉第旋镜法被认为是最理想的抗偏振衰落技术,但

收稿日期: 2009-08-17; 收到修改稿日期: 2009-11-09

作者简介: 王 潇(1984—),男,硕士研究生,主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: w_x@163.com

导师简介: 胡永明(1960—),男,博士,教授,主要从事光纤器件、光纤传感技术、光信息采集处理技术等方面的研究。

E-mail: huyongming_nudt@hotmail.com

它的性能在某些恶劣环境,如强电磁场环境中会受到较大影响,且有较大的瑞利散射噪声^[8];偏振分集接收没有上述限制,且因其应用领域广、易于实现等优点受到关注。本文将介绍偏振分集接收原理,通过软件仿真论证该方案的可行性,并搭建基于相位产生载波(PGC)调制解调的光纤迈克耳孙型干涉传感系统,对偏振分集接收方法进行实验研究。

2 偏振分集接收抗偏振衰落的原理

偏振分集接收法一般采用三分集法^[6,9],其结构如图 1 所示。将马赫-曾德尔干涉仪输出信号送入一个 3×3 耦合器,在耦合器的输出端接 3 个偏振方向在空间上互为 60°的检偏器,经过三路检偏后总能得到可视度不为零的输出,选择一路可视度较大的信号可避免偏振引起的完全衰落^[10]。

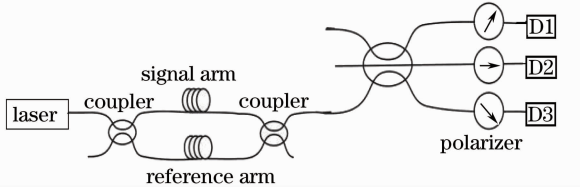
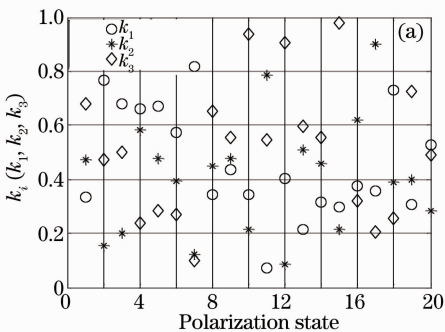


图 1 三分集接收结构图

Fig. 1 Schematic diagram of tri-polarizer polarization diversity receiver

不失一般性,设干涉仪中经信号臂(s)与参考臂(r)传输的光在检偏前为椭圆偏振光,假设耦合器分光比为 1:1,则两臂归一化光矢量可用琼斯矩阵表示为^[11]

$$\begin{bmatrix} E_{sx} \\ E_{sy} \end{bmatrix} = \exp(i\alpha_s) \begin{bmatrix} \cos \theta_s \cos \chi_s - i \sin \theta_s \sin \chi_s \\ \sin \theta_s \cos \chi_s + i \cos \theta_s \sin \chi_s \end{bmatrix}, \quad (1)$$



$$\begin{bmatrix} E_{rx} \\ E_{ry} \end{bmatrix} = \exp(i\alpha_r) \begin{bmatrix} \cos \theta_r \cos \chi_r - i \sin \theta_r \sin \chi_r \\ \sin \theta_r \cos \chi_r + i \cos \theta_r \sin \chi_r \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 $\chi_{s/r}$ 表示两臂光偏振态对应的椭率角,当 $-\pi/4 < \chi_{s/r} < 0$ 时表示右旋椭圆光, $0 < \chi_{s/r} < \pi/4$ 时表示左椭圆旋光, $\chi_{s/r} = \pm \pi/4$ 分别表示左、右旋圆偏振光, $\chi_{s/r} = 0$ 表示线偏振光; $\theta_{s/r}$ 表示光偏振态对应椭圆长轴与 x 轴的方位角,且 $-\pi/2 \leq \theta_{s/r} \leq \pi/2$ 。 α_s, α_r 分别表示两臂光的相位。当两光束相干后经过与 x 轴成 β 角的检偏器,得到光强为

$$I_\beta = 2 + \sqrt{a_\beta^2 + b_\beta^2} \cos(\phi - \zeta), \quad (3)$$

式中 $\phi = \alpha_s - \alpha_r$ 为两臂的相位差, $\zeta = \arctan(b_\beta/a_\beta)$:

$$a_\beta = \cos(\chi_r - \chi_s) \cos(\theta_r - \theta_s) + \cos(\chi_r + \chi_s) \cos(\theta_r + \theta_s - 2\beta), \quad (4)$$

$$b_\beta = \sin(\chi_r + \chi_s) \sin(\theta_r - \theta_s) + \sin(\chi_r - \chi_s) \sin(\theta_r + \theta_s - 2\beta). \quad (5)$$

定义检偏后各路信号可视度为

$$k_\beta = \frac{I_{\beta\max} - I_{\beta\min}}{I_{\beta\max} + I_{\beta\min}} = \frac{\sqrt{a_\beta^2 + b_\beta^2}}{2}. \quad (6)$$

3 仿真与分析

将表示干涉仪两臂光偏振态的参数 χ_r, χ_s, θ_r 和 θ_s 在各自取值范围内取随机值,模拟两束光干涉前各自的偏振态,代入(6)式即得经三分集检偏后三路光的可视度 k_i ,其中 $i=1, 2, 3$,分别对应(6)式中不同的 β 。将多次随机取值与计算得到的 k_i 绘制成图,如图 2(a)所示,横坐标为取随机状态的次数。由图可知就检偏后单路信号来看信号可视度仍在 0~1 之间,任何一路总是存在可视度很小的状态,即偏振诱导信号严重衰落状态;但是同时采得的三路信号中,总有一路信号可视度相对较大,即是总有

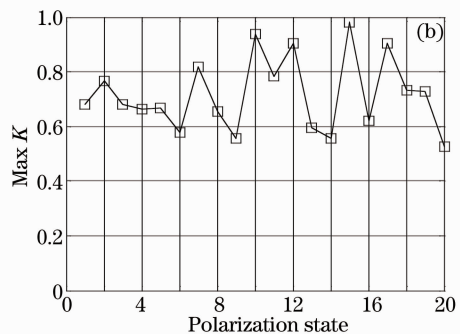


图 2 三通道可视度随干涉光偏振态变化

Fig. 2 Visibilities of the three-channel versus different polarization states by simulation

一路信号受偏振诱导衰落影响较小。从 k_1, k_2, k_3 中选取对应位置上最大值组成新的数组 K , 则 K 代表了通过判断得到的最大可视度, 如图 2(b) 所示, K 值均大于 0.4。

4 实验系统与测试

为了从实验上验证三分集接收法抗偏振衰落的可行性, 搭建了图 3 所示的光纤迈克耳孙干涉仪实验系统。该系统使用波长为 1549 nm 的超窄带宽光纤激光器, 信号光经过光隔离器后, 经引导光纤传输到 3 dB 耦合器分成两束, 分别进入干涉仪两臂, 经光纤端面反射后回到耦合器进行干涉, 干涉信号送入自制的全光纤偏振分集器, 分集器输出的各路光经探测器转换成电信号, 用每通道采样率为 50 kHz 的数字采集卡对三路电信号采样, 得到供后续信号处理的三路数字光信号。干涉仪一臂用频率 f_0 为 6.25 kHz, 幅度为 1.2 V 的正弦信号驱动压电陶瓷相位调制器 PZT ω_0 对光源进行 PGC 外调制, 产生 2.4 rad 相位调制; 在另一臂用频率 f_s 为 1 kHz,

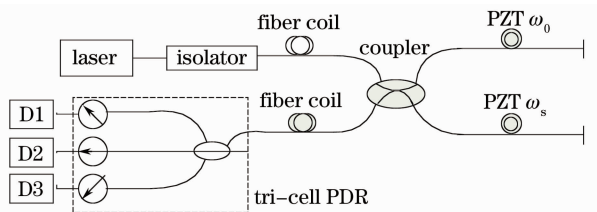


图 3 实验示意图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup

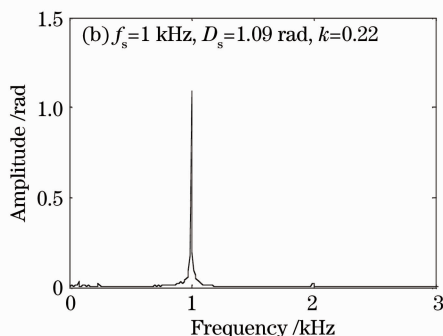
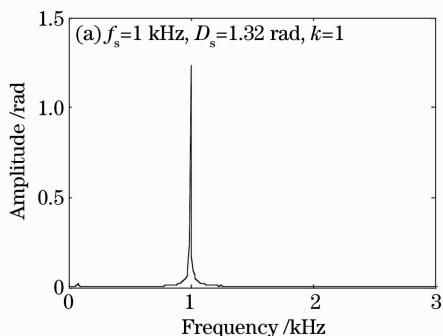


图 4 不同可视度对应信号解调结果

Fig. 4 Results of demodulated signal with different visibility

5 信号稳定性、噪声特性与可视度的关系

对表 1 中干涉仪处于偏振状态 A 对应的各路信号分别进行多次测试, 测试间隔为 3 s。实验记录了每次测量得到的信号幅值, 将其以测量时间为横

幅度为 1 V 的正弦信号驱动转换系数为 1.29 rad/V 的压电陶瓷相位调制器 PZT ω_s 产生模拟传感信号。

实验中通过多次扭动图 3 中干涉臂的光纤以调整光的偏振态, 得到干涉仪在不同偏振状态下经偏振分集器输出的三路信号可视度 k_1, k_2, k_3 的变化情况, 这里列举干涉仪在 6 种典型偏振状态(用 A, B, C, D, E, F 表示)下 k_1, k_2, k_3 的变化情况, 如表 1 所示。由表可知 k_1, k_2, k_3 随干涉仪偏振状态的改变在 0~1 之间变化, 但三路信号不同时为零, 且总有一路信号可视度相对较大, 这与前面仿真分析的结果一致, 表明该偏振分集器设计合理。

表 1 不同偏振态时三通道的信号可视度

Table 1 Experimental visibilities of the three-channel versus different polarization state

Visibility	Polarization states of the interferometer					
	A	B	C	D	E	F
k_1	0.96	0.99	0.75	1.00	0.94	0.20
k_2	0.98	0.99	0.91	0.99	0.42	0.89
k_3	0.50	0.28	0.22	0.38	0.67	0.96

图 4 为可视度 $k=1$ 与 $k=0.22$ 对应通道解调出的信号频域图。由图得到当 $k=1$ 时解调信号频率 $f_s=1$ kHz, 幅度 $D_s=1.32$ rad 与驱动压电陶瓷产生的模拟信号 (1.29 rad) 基本吻合, 有 0.03 rad 幅度的偏差。当 $k=0.22$ 时解调信号与目标信号频率相同, 信号幅度为 $D_s=1.09$ rad, 与模拟信号相比有 0.2 rad 的偏差。因此考虑研究可视度与信号稳定性是否存在一定关系。

坐标绘图, 得到该偏振状态下偏振分集器三通道获得的信号波动规律, 如图 5 所示。

由图 5 可见, 通道 2 得到最大可视度 0.98, 测量时间内的信号波动为 ± 0.43 dB, 通道 3 得到最小可视度 0.5, 测量时间内的信号波动为 ± 1.03 dB。

可见该实验系统中信号可视度与信号幅度波动具有一定关系。多次改变干涉仪偏振状态,将实验测得的可视度与对应的信号波动值绘制成图,如图 6 所示。由图可知信号幅度波动大小随可视度增加呈衰减趋势;当 $k > 0.5$ 以后,信号波动小于 1 dB,信号波动随可视度变化平缓,此时可认为信号平稳输出^[12]。因此在该偏振分集系统中选择可视度大于 0.5 的一路信号解调不仅可消除偏振衰落,还能实现信号稳定输出。实际应用中,针对不同要求,当允许的波动标准降低时,可选择可视度更低的信号进行解调。

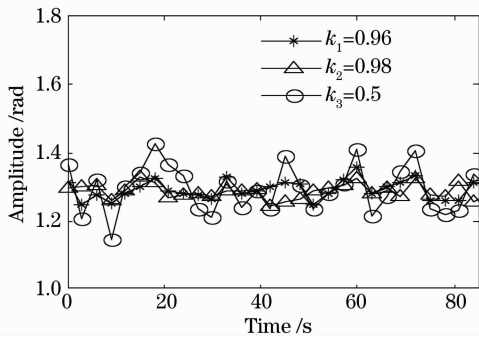


图 5 三路解调信号波动情况

Fig. 5 Amplitude fluctuation of the demodulated signals from the three-channel

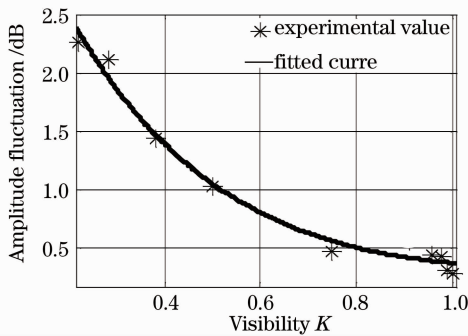


图 6 信号波动随可视度变化关系图

Fig. 6 Signal amplitude fluctuation versus visibility

系统本底噪声是衡量系统好坏的重要指标之一,在理想情况下偏振分集器三通道是简并的,因此可选择任一通道进行本底噪声测试。实验通过改变干涉仪偏振状态测量了不同可视度对应的系统本底噪声,如图 7 所示。由图可知,当可视度为 0.12 时系统噪声为 -86 dB,随着可视度增大噪声逐渐下降,当可视度大于 0.5 时,噪声趋于一稳定值 -98 dB。该测试结果是在一般的实验环境下得到的,因此本底噪声偏大,但这并不影响噪声随可视度的变化趋势。

实验中是采取人为挤压、扭曲光纤的方法改变

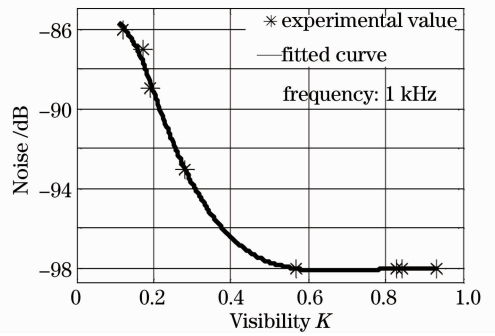


图 7 本底噪声与可视度的关系

Fig. 7 Self-noise versus visibility

干涉仪中偏振态的变化,进而导致干涉仪输出可视度的变化,对光纤的挤压、扭曲会导致干涉仪传输光偏振耦合,最终导致实验中解调信号的波动,且可视度较小时信号波动较大。但是,对于干涉仪中由光强分配引起的可视度衰落与解调信号波动并无直接关系。有关偏振态扰乱造成信号波动加剧的原因仍有待进一步深入的理论与实验研究。

6 结 论

从理论上介绍了三分集接收法的原理,并进行了软件仿真,搭建了基于 PGC 调制解调的全光纤迈克耳孙干涉传感实验系统,并验证了自制全光纤偏振分集接收器的性能。实验结果表明,该系统中随着可视度增大信号稳定性变好,当可视度大于 0.5 时信号波动小于 ±1 dB;在一般的实验环境下系统本底噪声随可视度增大逐渐变小,当可视度大于 0.5 时噪声趋于稳定值 -98 dB。研究结果表明,基于信号波动小于 ±1 dB 的标准,选择可视度大于 0.5 的偏振分集器通道作为系统输出可抑制偏振诱导信号衰落并实现信号稳定输出。

参 考 文 献

- 1 Wang Zefeng, Hu Yongming. A passive method for resolving phase shifting of interferometric fiber-optic sensors[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10): 1417~1421
王泽锋, 胡永明. 干涉型光纤传感器相位漂移的无源解决办法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(10): 1417~1421
- 2 Wang Zefeng, Hu Yongming, Meng Zhou *et al.*. Physical mechanism and solution of aliasing in phase generated carrier modulation-demodulation of interferometric fiber-optic hydrophone[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 92~98
王泽锋, 胡永明, 孟 洲 等. 干涉型光纤水听器相位载波调制-解调中信号混叠产生的机理及解决方案[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 92~98
- 3 L. A. Ferreira, J. L. Santos, F. Farahi. Polarization-induced noise in a fiber-optic michelson interferometer with faraday rotator mirror elements [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34** (28): 6399~6402

- 4 M. Tur, Y. S. Boger, H. J. Shaw. Polarization-induced fading in fiber-optic sensor arrays[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(7): 1269~1276
- 5 Zhang Xueliang, Zhou Xiaojun, Hu Yongming *et al.*. All polarization-maintaining fiber earth magnetic field sensor [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(11): 1515~1518
张学亮, 周晓军, 胡永明 等. 全保偏光纤地磁传感器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(11): 1515~1518
- 6 Ni Ming. Investigation of the Key Technologies of Fiber-Optic Hydrophone [D]. Beijing: Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, 2003. 40~50
倪 明. 光纤水听器关键技术研究[D]. 北京:中国科学院声学所, 2003. 40~50
- 7 Y. S. Boger, M. Tur. Polarization-induced visibility limits in interferometric fiber-optic sensor arrays[J]. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(8): 622~623
- 8 Shen Liang. The Study of the Technique to Eliminate the Polarization-Induced-Fading in Interferometric Fiber-Optic Sensor Array[D]. Hongzhou: Zhejiang University, 2002. 14~19
沈 梁. 干涉型光纤水听器阵列消偏振衰落技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2002. 14~19
- 9 Ni Ming, Yang Huayong, Xiong Shuidong *et al.*. Investigation of polarization induced fading in fiber-optic interferometers with polarization based polarization diversity receivers [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(11): 1~4
- 10 Cao Jianian, Zhang Likun. Elimination of polarization-induced-fading in two-beam interferometric fiber-optic sensors[J]. *Opt. Fiber Electric Cable*, 1994, (4): 22~27
曹家年, 张立昆. 双光束干涉型光纤传感器抗偏振衰落技术[J]. *光纤与电缆及其应用*, 1994, (4): 22~27
- 11 Ji Jiarong. Advanced Course of Optics [M]. Beijing: Science Press, 2007. 40~41
季家镛. 高等光学教程[M]. 北京: 科学出版社, 2007. 40~41
- 12 Ni ming, Hu Yongming, Meng Zhou *et al.*. Dynamic range of fiber optic hydrophone using digitized phase generated carrier[J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(2): 33~37
倪 明, 胡永明, 孟 洲 等. 数字化 PGC 解调光纤水听器的动态范围[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, **42**(2): 33~37