

利用正交偏振切换抗偏振衰落和抑制偏振噪声

胡正良 蒋鹏 马丽娜 胡永明

国防科学技术大学海洋科学与工程研究院, 湖南 长沙 410073

摘要 干涉型光纤传感器是一种高灵敏度的传感器,在许多领域都具有重要应用价值,而偏振衰落是这种传感器中需要解决的一个重要问题。提出采用脉冲正交偏振切换及基于相位生成载波(PGC)的信号合成算法来实现抗偏振衰落。阐述了正交偏振切换方法的基本理论,分析了以 PGC 解调为基础的正交偏振切换合成算法的原理,搭建了实验系统进行实验研究。结果表明,当光纤中偏振态受到扰动时,通过正交偏振切换及合成算法,合成的结果等效干涉度可以稳定在 0.93~0.94 之间;解调结果的噪声可以达到四路偏振通道噪声的最低水平。该方法可以消除传输光纤中偏振扰动所造成的低频相位漂移,使解调结果不受传输光纤中偏振态扰动的影响。长时间的噪声监测结果表明,PGC 调制频率为 8 kHz 时,系统噪声达到了 $-96 \text{ dB}/\sqrt{\text{Hz}}$ (1 kHz),与同一系统中采用法拉第旋镜作为反射镜测得的本底噪声相当。该方法为解决干涉型光纤传感器时分复用阵列,特别是基于光纤光栅的干涉型准分布式光纤传感器和分布式传感系统中的偏振衰落问题提供了一种可行的途径。

关键词 传感器; 光纤传感器; 偏振衰落; 偏振切换;

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0910001

Suppression of Polarization Induced Signal Fading and Phase Noise Utilizing Orthogonal-Polarization Switching Method

Hu Zhengliang Jiang Peng Ma Lina Hu Yongming

Academy of Ocean Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha,
Hunan 410073, China

Abstract The interferometric fiber sensor is applicable in many fields for its high sensitivity, but the polarization induced signal fading is a serious problem. We proposed an orthogonal-polarization switching method and a signal synthesis algorithm based on the phase generated carrier (PGC) scheme to solve the problem for the pulse interrogation. The principle of the method was demonstrated and an algorithm for signal synthesis was derived based on the PGC scheme. The experimental results show that the equivalent visibility is steady between 0.93 and 0.94, and the background noise of the synthesized signal is lower than that of all the four polarization channels. The method can eliminate the polarization induced low frequency phase drift as well, making the synthesis results not influenced by perturbation of polarization states. The long time measurement results demonstrate that the background noise can reach $-96 \text{ dB}/\sqrt{\text{Hz}}$ at 1 kHz when the frequency of the PGC demodulation was 8 kHz. This result is equivalent to that of the system with the Faraday rotator mirrors. This method is applicable for solving the signal fading problem in the time division multiplexing sensor array especially for the inline interferometric fiber sensor array based on fiber Bragg gratings and the distributed sensor array.

Key words sensors; fiber sensor; polarization induced signal fading; polarization switching

OCIS codes 280.4788; 060.2310; 060.2370

1 引言

干涉型光纤传感器利用光学相干技术进行信号检测,具有灵敏度高、不受电磁干扰、便于复用等优点,已经广泛应用于水下军事、地震波检测和石油勘探等领域^[1]。为节约成本,一般的干涉型光纤传感器更多地采

收稿日期: 2016-04-11; 收到修改稿日期: 2016-05-11

基金项目: 国家自然科学基金(11274384,11304388,11574397)

作者简介: 胡正良(1979—),男,博士,副教授,主要从事光纤传感、水声方面的研究。E-mail: zheng_liang_hu@163.com

用普通单模光纤及器件构成。在这种单模系统中,偏振衰落是需要考虑的一个重要问题^[2]。目前,解决偏振衰落问题比较成熟的方案有法拉第旋镜法(FRM)^[3]、输入偏振态控制法^[4]、高速偏振调制法^[5]和偏振分集接收法^[6]等。法拉第旋镜法可以彻底解决偏振衰落问题,但是只可用于迈克耳孙干涉仪中,适用范围有限;输入偏振态控制法通过调节输入偏振态实现传感通道的抗偏振衰落,但是在时分复用结构中,无法实现所有通道的抗偏振衰落;高速偏振调制法虽然可以在输入端实现抗偏振衰落,但是无法消除传输光纤偏振扰动带来的相位噪声;偏振分集方法在接收端对二路或三路干涉光强进行选择,提取出干涉度最高的信号,可以在一定程度上实现抗偏振衰落,但是受到偏振态扰动时提取的干涉度具有跳跃性,会导致解调信号之间初相位的不连续^[7]。Waagaard等^[8]曾经提出一种基于连续光的正交偏振切换方法,该方法以铌酸锂偏振切换器为基础,将入射光的偏振态在两个正交偏振态之间来回切换,通过测量传感通道的琼斯矩阵实现抗偏振衰落。目前,铌酸锂晶体的电光偏振切换特性已经用于偏振编码^[9]和偏振双波长滤波器^[10]等领域。根据铌酸锂晶体的这种偏振切换特性,本课题组曾对正交偏振切换方法抗偏振衰落进行了研究^[11],初步证实这种方法可以获得较大的干涉度,同时可以正确解调信号。但是该方法仅考虑了正交线偏振光入射,且没有研究系统的噪声问题。为使这一原理更具适用性,Rϕnnekleiv^[12]提出了基于双脉冲外差询问的正交偏振切换方法,这一方法可以更加有效地解决时分复用系统中的偏振衰落问题,对干涉型光纤传感系统的组阵更具有现实意义,但是该方法的具体实现过程并没有给出。

本文主要研究了双脉冲询问的正交偏振切换方法。首先从正交偏振切换基本原理出发,推导出以任意正交偏振光进行询问均可实现抗偏振衰落的结论,同时指出这一方法可以消除输入偏振态扰动所带来的相位噪声;提出了基于相位生成载波(PGC)解调的正交偏振切换合成算法的原理;搭建了双脉冲询问的偏振切换实验系统,取得了良好的效果。这一方法适用于解决时分系统中的偏振衰落问题,特别是为干涉型光纤光栅时分传感阵列和分布式传感系统提供了解决偏振衰落问题的一种有效途径。

2 基本原理

2.1 偏振切换方法抗偏振衰落机理

双脉冲询问传感系统基本结构如图1所示。窄线宽激光器的输出光被声光调制器(AOM)调制为脉冲光,该脉冲光经过一个非等臂的马赫-曾德尔干涉仪后被分为两个具有一定时延的脉冲光。非等臂马赫-曾德尔干涉仪的长臂上绕有一个压电陶瓷环(PZT),施加用于PGC解调的正弦调制信号。非等臂干涉仪的输出光再经过一个偏振切换器(PS)进行偏振态的周期性切换。偏振态切换后的光脉冲注入到传感单元中。传感单元的输出光由光电探测器(PD)探测,然后经过数模转换(AD)后输入到信号处理单元。在未进行偏振切换的普通单模系统中,非等臂马赫-曾德尔干涉仪输出的双脉冲直接经过环形器后注入到传感通道中,传感通道为一非等臂迈克耳孙干涉仪结构,反射端面为普通的反射镜。该非等臂干涉仪的臂差为匹配干涉仪臂差的一半。因此,由非等臂马赫-曾德尔干涉仪短臂输出的脉冲0经过传感单元长臂返回的信号光和匹配干涉仪长臂输出的脉冲1经过传感单元短臂返回的参考光重叠干涉,产生的干涉光强即为这一传感通道的原始干涉输出。

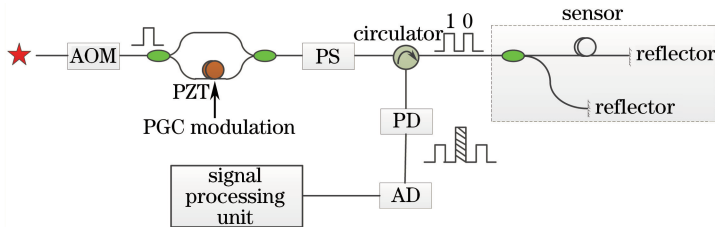


图1 匹配干涉型光纤传感系统

Fig. 1 Fiber sensor system based on path-matching interference

首先,在无偏振切换的前提下讨论正交偏振切换抗偏振衰落的一般原理。假设两入射脉冲分别为

$$\mathbf{E}_{in0} = \begin{bmatrix} E_{0,x} \\ E_{0,y} \end{bmatrix}, \mathbf{E}_{in1} = \begin{bmatrix} E_{1,x} \\ E_{1,y} \end{bmatrix} \exp(j\phi_c), \quad (1)$$

则参考光 E_r 与信号光 E_s 分别为

$$E_r = \overleftarrow{B}_0 \overleftarrow{C} B_1 \overrightarrow{R} B_1 \overrightarrow{C} B_0 E_{in1}, \quad (2)$$

$$E_s = \overleftarrow{B}_0 \overleftarrow{C} B_2 \overrightarrow{R} B_2 \overrightarrow{C} B_0 E_{in0}, \quad (3)$$

式中 C 为 3 dB 耦合器的琼斯矩阵, R 为反射端面的琼斯矩阵, B_0 、 B_1 和 B_2 分别为传输光纤、传感单元短臂和传感单元长臂的单程传输琼斯矩阵, 左箭头表示下行传输, 右箭头表示上行传输。光经过耦合器分束和经过反射端面反射的过程与偏振无关, C 和 R 可分别写为

$$C = \frac{\sqrt{2}}{2} I, R = rI, \quad (4)$$

式中 r 为反射端面的幅度反射率, I 为单位矩阵。假设光纤中的相位调制与偏振无关, 则 B_0 、 B_1 和 B_2 可分别写为

$$B_i = U_i \exp(j\phi_i), i = 0, 1, 2, \quad (5)$$

式中 ϕ_i 为光纤中引入的相位调制, U_i 为表示光纤双折射的琼斯矩阵。根据(2)式和(3)式, 传感单元的干涉光强可以表示为

$$I = I_r + I_s + \text{Re}(E_r^\dagger E_s) = I_r + I_s + \frac{r^2}{4} \text{Re}(E_{in1}^\dagger \overrightarrow{B}_0^\dagger \overrightarrow{B}_1^\dagger \overleftarrow{B}_1^\dagger \overleftarrow{B}_0^\dagger \overleftarrow{B}_0 \overrightarrow{B}_2 \overrightarrow{B}_2 \overrightarrow{B}_0 E_{in0}), \quad (6)$$

定义

$$\mathcal{R} = \frac{r^2}{4} \overrightarrow{B}_0^\dagger \overrightarrow{B}_1^\dagger \overleftarrow{B}_1^\dagger \overleftarrow{B}_0^\dagger \overleftarrow{B}_0 \overrightarrow{B}_2 \overrightarrow{B}_2 \overrightarrow{B}_0 \quad (7)$$

为系统的响应矩阵。由于单模光纤的琼斯矩阵为酉矩阵^[12], (5)式满足 $B_i^\dagger B_i = I$, 则系统响应矩阵也应该为酉矩阵。如果可以得到系统的响应矩阵, 根据酉矩阵的性质和(7)式, 表示外界施加信号的相位项可以通过计算系统响应矩阵的行列式的平方根得到, 即

$$\sqrt{\det \mathcal{R}} = \frac{r^2}{4} \exp(j\phi_s), \quad (8)$$

式中 $\phi_s = 2\phi_1 - 2\phi_2$ 为信号光和参考光分别在传感单元的传感光纤和参考光纤中往返传输后引入的相位差, 即为传感单元响应的外界施加信号, ϕ_1 和 ϕ_2 分别为光经过传感单元短臂和长臂后的相位变化。

(8)式中, 无论是 $\sqrt{\det \mathcal{R}}$ 的模还是其相位项, 均与光纤中的双折射无关。根据后面的分析, 可以进一步发现, $\sqrt{\det \mathcal{R}}$ 的模与偏振态无关, 相当于干涉光强取得了最大的干涉度。 $\sqrt{\det \mathcal{R}}$ 的相位项与偏振无关则说明解调结果中的偏振诱导相位噪声可以消除。

2.2 基于 PGC 解调的正交偏振切换合成算法

根据以上分析, 正交偏振切换法消除偏振衰落的关键在于获得系统的响应矩阵并计算出该响应矩阵的行列式。在脉冲正交偏振切换法中, 在匹配干涉仪后加入一个铌酸锂偏振切换器将输入脉冲的偏振态在两个正交偏振态(X, Y)中来回切换以获取响应矩阵。脉冲和偏振切换的时序如图 2 所示。其中, 偏振切换的频率为脉冲重复频率的 1/4。可以得到四组不同偏振态组合的入射脉冲, 即 XX、XY、YY 和 YX, 其琼斯矩阵表达式为

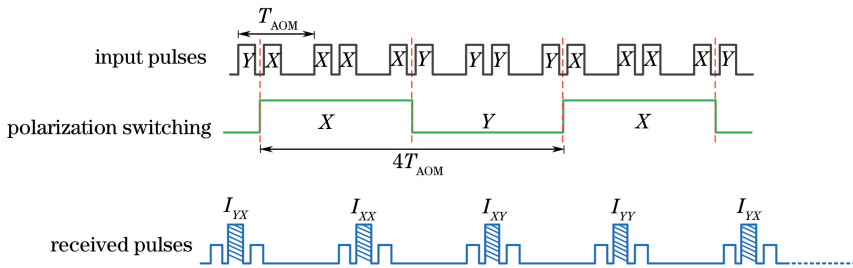


图 2 脉冲正交偏振切换时序

Fig. 2 Time sequence of the polarization switching based on pulse interrogation

$$\mathbf{E}_{0X} = \begin{bmatrix} E_{X,x} \\ E_{X,y} \end{bmatrix}, \mathbf{E}_{1X} = \begin{bmatrix} E_{X,x} \\ E_{X,y} \end{bmatrix} \exp(j\phi_c); \quad (9)$$

$$\mathbf{E}_{0X} = \begin{bmatrix} E_{X,x} \\ E_{X,y} \end{bmatrix}, \mathbf{E}_{1Y} = \begin{bmatrix} E_{Y,x} \\ E_{Y,y} \end{bmatrix} \exp(j\phi_c); \quad (10)$$

$$\mathbf{E}_{0Y} = \begin{bmatrix} E_{Y,x} \\ E_{Y,y} \end{bmatrix}, \mathbf{E}_{1Y} = \begin{bmatrix} E_{Y,x} \\ E_{Y,y} \end{bmatrix} \exp(j\phi_c); \quad (11)$$

$$\mathbf{E}_{1Y} = \begin{bmatrix} E_{Y,x} \\ E_{Y,y} \end{bmatrix}, \mathbf{E}_{1X} = \begin{bmatrix} E_{X,x} \\ E_{X,y} \end{bmatrix} \exp(j\phi_c). \quad (12)$$

(9)~(12)式中下标 X, Y 表示两个正交的偏振态, 下标 x, y 表示各偏振态琼斯矩阵的两个分量。以上各琼斯矩阵满足

$$E_{X,x}^* E_{Y,x} + E_{X,y}^* E_{Y,y} = 0. \quad (13)$$

系统响应矩阵可以表示为

$$\mathcal{R} = \begin{bmatrix} \mathcal{R}_{xx} & \mathcal{R}_{xy} \\ \mathcal{R}_{yx} & \mathcal{R}_{yy} \end{bmatrix}. \quad (14)$$

由于系统的响应矩阵为酉矩阵, 根据(7)式和(8)式有 $\mathcal{R}_{xx}\mathcal{R}_{yy} - \mathcal{R}_{xy}\mathcal{R}_{yx} = \left[\frac{r^2}{4} \exp(j\phi_s) \right]^2$ 。

通过偏振切换, 在接收端可以获得四路偏振通道的干涉光强, 表示为

$$\begin{cases} I_{XX} = I_r + I_s + \frac{r^2}{4} \operatorname{Re}\{ [(U_{xx}E_{X,x}^* + U_{yx}E_{X,y}^*)E_{X,x} + (U_{yy}E_{X,y}^* + U_{xy}E_{X,x}^*)E_{X,y}] \exp[j(\phi_c + \phi_s)] \} \\ I_{XY} = I_r + I_s + \frac{r^2}{4} \operatorname{Re}\{ [(U_{xx}E_{X,x}^* + U_{yx}E_{X,y}^*)E_{Y,x} + (U_{yy}E_{X,y}^* + U_{xy}E_{X,x}^*)E_{Y,y}] \exp[j(\phi_c + \phi_s)] \} \\ I_{YY} = I_r + I_s + \frac{r^2}{4} \operatorname{Re}\{ [(U_{xx}E_{Y,x}^* + U_{yx}E_{Y,y}^*)E_{X,x} + (U_{yy}E_{Y,y}^* + U_{xy}E_{Y,x}^*)E_{X,y}] \exp[j(\phi_c + \phi_s)] \} \\ I_{YX} = I_r + I_s + \frac{r^2}{4} \operatorname{Re}\{ [(U_{xx}E_{Y,x}^* + U_{yx}E_{Y,y}^*)E_{Y,x} + (U_{yy}E_{Y,y}^* + U_{xy}E_{Y,x}^*)E_{Y,y}] \exp[j(\phi_c + \phi_s)] \} \end{cases}, \quad (15)$$

式中 I_r 和 I_s 分别为参考光和信号光的光强。此时已经得到各偏振通道的干涉光强, 而响应矩阵的四个元将从(15)式中提取。可以将(15)式中各偏振通道的干涉光强进一步表示为如下形式:

$$I_{MN} = I_r + I_s + \frac{r^2}{4} K_{MN} \sqrt{I_{in0} I_{in1}} \cos(\phi_c + \phi_s + \phi_{MN}), MN = XX, XY, YY, YX, \quad (16)$$

式中 I_{in0} 和 I_{in1} 分别为入射脉冲的光强, K_{MN} 为与双折射有关的系数, 最大值为 1, ϕ_{MN} 为与光纤双折射有关的相位项。

考虑到复数在光场运算中的便利性, 提出一种基于 PGC 解调的复数构造法来实现系统响应矩阵行列式的运算。复数的构造关键在于获取两个正交项, 这可以从 PGC 的算法设计中获得^[13], 即将(16)式分别与 $\cos(\omega_0 t)$ 和 $\cos(2\omega_0 t)$ 相乘, 然后滤除 ω_0 及其高阶谐波, 得到

$$\begin{cases} X_1 = -\frac{r^2}{4} K_{MN} \sqrt{I_{in0} I_{in1}} J_1(C) \sin(\phi_s + \phi_{MN}) \\ X_2 = -\frac{r^2}{4} K_{MN} \sqrt{I_{in0} I_{in1}} J_2(C) \cos(\phi_s + \phi_{MN}) \end{cases}, \quad (17)$$

式中 $J_1(C)$ 和 $J_2(C)$ 分别为一阶贝塞尔函数和二阶贝塞尔函数, 由此可以构造复数

$$H_{MN} = -\frac{X_2}{J_2(C)} - j \frac{X_1}{J_1(C)} = \frac{r^2}{4} K_{MN} \sqrt{I_{in0} I_{in1}} \exp[j(\phi_s + \phi_{MN})]. \quad (18)$$

对比(16)式和(18)式, 不难发现, 复数化的过程相当于将(16)式的交流项复数化, 同时去掉了调制项。根据这一结果, (15)式复数化后的结果为

$$\begin{cases} H_{XX} = \frac{r^2}{4} [(U_{xx}E_{X,x}^* + U_{yx}E_{X,y}^*)E_{X,x} + (U_{yy}E_{X,y}^* + U_{xy}E_{X,x}^*)E_{X,y}] \exp(j\phi_s) \\ H_{XY} = \frac{r^2}{4} [(U_{xx}E_{X,x}^* + U_{yx}E_{X,y}^*)E_{Y,x} + (U_{yy}E_{X,y}^* + U_{xy}E_{X,x}^*)E_{Y,y}] \exp(j\phi_s) \\ H_{YY} = \frac{r^2}{4} [(U_{xx}E_{Y,x}^* + U_{yx}E_{Y,y}^*)E_{X,x} + (U_{yy}E_{Y,y}^* + U_{xy}E_{Y,x}^*)E_{X,y}] \exp(j\phi_s) \\ H_{YX} = \frac{r^2}{4} [(U_{xx}E_{Y,x}^* + U_{yx}E_{Y,y}^*)E_{Y,x} + (U_{yy}E_{Y,y}^* + U_{xy}E_{Y,x}^*)E_{Y,y}] \exp(j\phi_s) \end{cases}, \quad (19)$$

将以上偏振通道作为新矩阵

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} H_{XX} & H_{XY} \\ H_{YX} & H_{YY} \end{bmatrix} \quad (20)$$

的四个元素,计算其行列式可得

$$H_{XX}H_{YY} - H_{XY}H_{YX} = \frac{r^2}{16} (E_{X,x}E_{Y,y}E_{X,x}^*E_{Y,y}^* + E_{Y,x}E_{X,y}E_{Y,x}^*E_{X,y}^* - E_{Y,x}E_{X,y}E_{X,x}^*E_{Y,y}^* - E_{X,x}E_{Y,y}E_{Y,x}^*E_{X,y}^*) \exp(2j\phi_s), \quad (21)$$

结合(14)式,可以进一步得到

$$\begin{aligned} \sqrt{H_{XX}H_{YY} - H_{XY}H_{YX}} &= \\ \frac{r^2}{4} \sqrt{(E_{X,x}^*E_{X,x} + E_{X,y}^*E_{X,y})(E_{Y,x}^*E_{Y,x} + E_{Y,y}^*E_{Y,y})} \exp(j\phi_s) &= \frac{r^2}{4} \sqrt{I_{in0}I_{inl}} \exp(j\phi_s). \end{aligned} \quad (22)$$

根据以上分析可知,这一合成算法合成了四路偏振通道的干涉光强,合成信号为复数形式。这一复数的系数正好为干涉光强干涉度为最大值时的系数,表明合成信号可等效为具有干涉光强理论上的最大干涉度;同时,各偏振通道中与双折射有关的相位项经合成算法后都被消除,从而可以推断这一方法能够消除单模系统中入射偏振态扰动产生的相位噪声。该方法基于光纤琼斯矩阵的西矩阵特性,无论是外界应力还是温度引起光纤双折射变化,光纤琼斯矩阵的西矩阵事实都不会发生改变,与双折射有关的琼斯矩阵均可通过行列式的计算得以消除,从而使最终的合成结果不会对偏振态敏感。施加在传感通道中的信号可以对(22)式采用微分交叉相乘(DCM)算法^[13]或反正切算法^[14]解调得到。这一结论是以入射光脉冲的偏振态在任意两个偏振态之间切换为前提取得的,因此可以说明进行切换的两个正交偏振态不一定为线偏振态,这一结论修正了文献[11]中的结论。

2.3 合成信号的等效干涉度

经过脉冲正交偏振切换及信号合成算法之后得到的信号为复数形式,其干涉度无法直接表征。对比(22)式与(16)式的系数可以看到,对四路偏振通道进行合成时,(22)式的系数正好为干涉光强干涉度最大(即 $K_{MN}=1$)时干涉光强的交流项系数。对(16)式用直流量进行归一化,得到

$$I_{MN} = 1 + V_{MN} \cos(\phi_c + \phi_s + \phi_{MN}), \quad (23)$$

式中 V_{MN} 为光强的干涉度,

$$V_{MN} = \frac{\frac{r^2}{4} K_{MN} \sqrt{I_{in0}I_{inl}}}{I_r + I_s}. \quad (24)$$

参考这一定义方法,利用 $I_r + I_s$ 归一化的(23)式的系数即为等效的干涉度,即

$$V_{PS} = \text{mod} \left(\frac{\sqrt{H_{XX}H_{YY} - H_{XY}H_{YX}}}{I_r + I_s} \right). \quad (25)$$

3 实验结果

如图2所示,实验系统采用一台窄线宽半导体固体激光器(RIO公司,美国)作为光源,高相干光被声光调制器调制为脉冲光,脉冲调制频率为256 kHz,脉冲光再经过一个不等臂的马赫-曾德尔匹配干涉仪后分为两个脉冲,匹配干涉仪的臂差为38 m。在不等臂匹配干涉仪的长臂上缠绕一压电陶瓷,引入用于PGC解

调的相位调制。匹配干涉仪输出的双脉冲再经过一个 LiNbO₃ 偏振切换器(Photoline 公司,法国),由于偏振切换器要求线偏光入射,因此系统中从光源到匹配干涉仪均采用保偏器件。偏振调制晶体对两入射脉冲的偏振态进行周期性调制,调制频率为 64 kHz,调制幅度的高低电平之差为 LiNbO₃ 晶体的半波电压。实际测得的 LiNbO₃ 晶体半波电压为 6.4 V。偏振态被周期性调制的两个入射脉冲入射到传感单元,传感单元为一不等臂的迈克耳孙干涉仪,包括一个 1×2 的耦合器、传感光纤、参考光纤以及两个反射端面,且不等臂迈克耳孙干涉仪的臂差为匹配干涉仪臂差的一半。

对于提出的方法,能够正确解调信号是进行其他测试的基础。在传感通道中的压电陶瓷上用信号源施加幅度为 1 V、频率为 500 Hz 的正弦信号,验证脉冲正交偏振切换对信号解调的影响。将采用 PGC 解调的四路偏振通道与采用脉冲正交偏振切换合成算法解调的结果进行对比,结果如图 3 所示。从图中可以看到,脉冲正交偏振切换合成算法能够还原所施加的信号。为检验该算法的解调准确性,对解调信号的幅度进行长时间监测,并统计解调信号的幅度随测量次数的变化,结果如图 4 所示。经过脉冲正交偏振切换合成算法后的信号幅度与四路偏振通道 PGC 解调结果一致,说明这一算法的解调准确性与传统 PGC 解调方法相当。在脉冲正交偏振切换中,由于合成的信号为复数形式,因此不能直接通过传统的干涉度来衡量是否发生偏振衰落。根据 2.3 节定义的等效干涉度来衡量脉冲偏振切换的效果。实验中人为扭曲光纤来改变偏振态,经过一段时间的监测,得到的测试结果如图 5 所示。结果表明,当光纤受到扰动时,四路偏振通道的干涉度会出现起伏,产生偏振衰落,但是脉冲正交偏振切换的合成结果等效干涉度始终保持在 0.93~0.94 之间,表明脉冲正交偏振切换有效地抑制了偏振衰落。

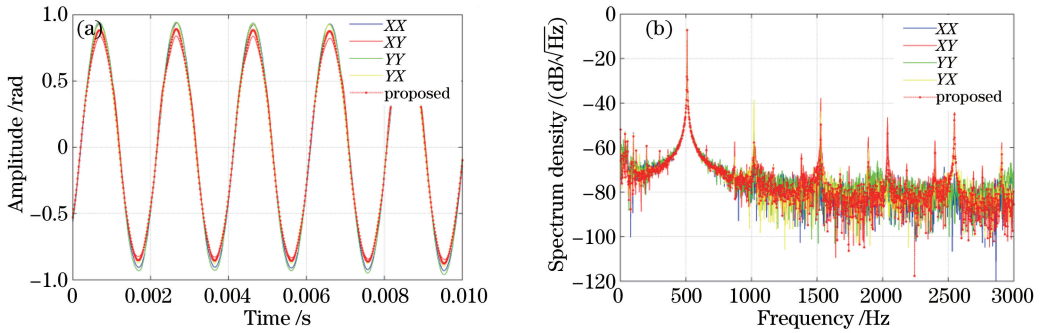


图 3 信号解调结果。(a) 时域波形; (b) 频谱

Fig. 3 Demodulation result of the applied signal. (a) Waveform in time domain; (b) frequency spectrum

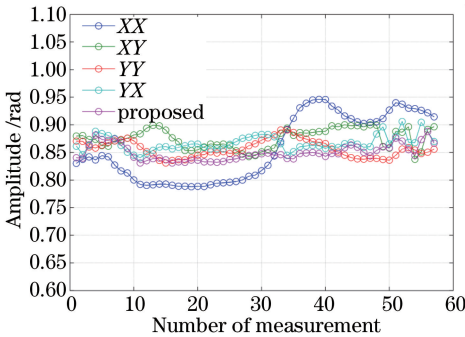


图 4 多次测量下解调信号的幅度分布

Fig. 4 Amplitude distribution of the applied signal for multiple measurements

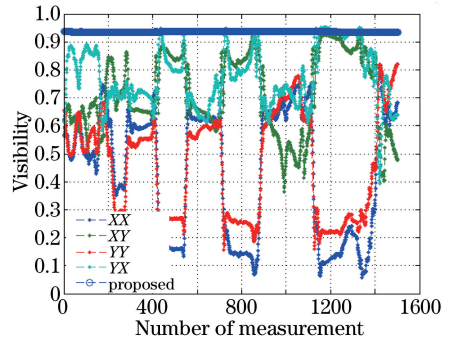


图 5 脉冲正交偏振切换方法得到的等效干涉度

Fig. 5 Equivalent visibility obtained with the proposed method

系统的本底噪声是衡量是否发生偏振衰落的一个重要指标,干涉度降低会使系统噪声升高。因此,对本系统的本底噪声进行测试,测试结果如图 6 所示。对比经过脉冲正交偏振切换合成算法解调得到的本底噪声和采用 PGC 解调获得的四路偏振通道的本底噪声,可以看到经过脉冲正交偏振切换合成算法处理之后,系统的本底噪声低于四路偏振通道的本底噪声,说明经过正交偏振切换之后,合成信号等效干涉度高于四路偏振通道之中的任何一路。

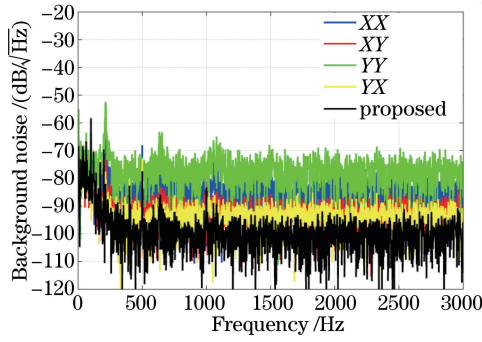


图 6 单次解调下系统本底噪声

Fig. 6 Background noise for a single measurement

测试该方法对消除传输光纤中偏振扰动的影响。将图 2 所示环形器与传感通道之间的一段传输光纤进行扭曲,引入双折射扰动,同时对脉冲正交偏振切换合成算法的解调结果和采用 PGC 解调的四路偏振通道的结果,结果如图 7 所示。由图可知,传输光纤中存在的双折射扰动在各路偏振通道中会引入低频相位漂移,而且 XX 和 YY 通道及 XY 和 YX 通道之间的相位漂移呈反相对称关系,这一特性使得经过正交偏振切换处理后的解调信号中相位漂移正好被消除,系统的噪声不再受到传输光纤中偏振扰动的影响。

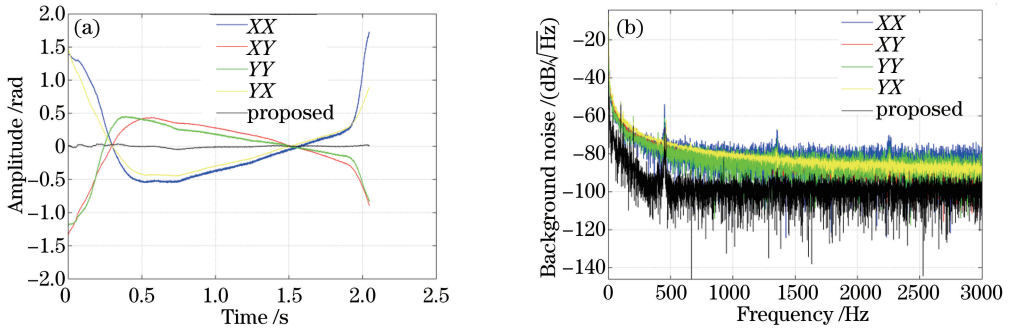


图 7 施加偏振扰动后的解调结果。(a) 时域波形; (b) 频谱

Fig. 7 Demodulation results with a polarization fluctuation in the leading fiber. (a) Waveform in time domain; (b) frequency spectrum

图 8 为系统的本底噪声长时间监测结果。结果表明在 1 kHz 下系统噪声为 $-96 \text{ dB}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。将传感通道的反射端面换为法拉第旋镜,采用 PGC 解调测得的系统噪声为 $-98 \text{ dB}/\sqrt{\text{Hz}}$ (1 kHz)。结果中本底噪声存在的 2 dB 差异可能为反射端面的反射率低于法拉第旋镜的反射率造成的两种系统光强差异引起的。这一结果表明脉冲正交偏振切换合成算法的抗偏振衰落效果与法拉第旋镜法相当。

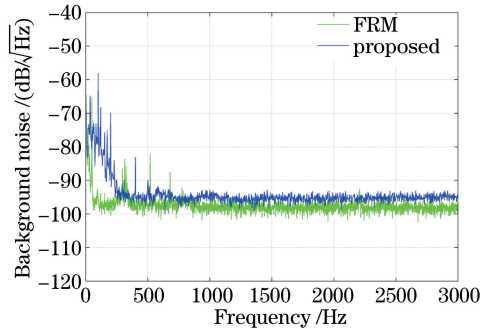


图 8 多次测量并平均后的系统本底噪声

Fig. 8 Average background noise for multiple measurements

4 结 论

将正交偏振切换的原理应用于脉冲询问中,提出了基于 PGC 解调的正交偏振切换合成算法,设计并搭建了实验系统。实验结果表明,利用正交偏振切换及信号合成算法,合成结果的等效干涉度可以稳定在 0.93~0.94 之间,不受光纤中偏振扰动的影响;利用该方法解调的噪声可以达到四路偏振通道噪声的最低水平,且该方法可以消除传输光纤中偏振扰动造成的低频相位漂移,实现降噪的目的。长时间的噪声监测结果表明,在 PGC 调制频率为 8 kHz 的条件下,系统噪声达到了 $-96 \text{ dB}/\sqrt{\text{Hz}}$ (1 kHz)。这一结果与在同一系统中采用法拉第旋镜作为反射镜测得的本底噪声相当。

参 考 文 献

- 1 Wang Zefeng, Luo Hong, Hu Yongming, *et al.* Signal detection technique for fiber-optic interferometric sensors[J]. *Journal of Applied Optics*, 2007, 28(1): 86-91.
王泽锋, 罗 洪, 胡永明, 等. 干涉型光纤传感器信号检测技术研究[J]. *应用光学*, 2007, 28(1): 86-91.
- 2 Li Dong, Zhang Xiaohui, Huang Junbin, *et al.* Analysis of polarization fading and phase noise in unbalanced fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. *Laser & Infrared*, 2005, 35(3): 217-220.
李 东, 张晓晖, 黄俊斌, 等. 非平衡光纤 Mach-Zehnder 干涉仪偏振衰落及相位噪声分析[J]. *激光与红外*, 2005, 35(3): 217-220.
- 3 Kersey A D, Marrone M J, Dandridge A, *et al.* Polarization insensitive fiber optic Michelson interferometer [J]. *Electronics Letters*, 1991, 27(6): 518-520.
- 4 Zhou Xiaodong. Theoretical analysis of interferometric fiber-optic sensors's(编者注:sensors') input polarization control [J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, 17(6): 794-798.
周效东. 干涉型光纤传感器输入偏振态反馈控制的理论分析[J]. *光学学报*, 1997, 17(6): 794-798.
- 5 Li Zhineng, Shen Liang, Zhou Xiaodong, *et al.* Modulated polarization insensitive interferometric fiber-optic sensor[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2002, 36(1): 56-59.
李志能, 沈 梁, 周效东, 等. 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.
- 6 Jing Zhenguo, Yin Kai, Zhang Min, *et al.* Polarization induced signal fading elimination technique for interferometric fiber sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(8): 2024-2028.
荆振国, 殷 锴, 张 敏, 等. 干涉型光纤传感器的消偏振衰落技术研究[J]. *光子学报*, 2009, 38(8): 2024-2028.
- 7 Ni Ming, Cao Chunyan, Hu Zhengliang, *et al.* Polarization diversity technology and its application in fiber optic sensors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(7): 0706005.
倪 明, 曹春燕, 胡正良, 等. 偏振分集技术及其在光纤传感器中的应用[J]. *光学学报*, 2011, 31(7): 0706005.
- 8 Waagaard O H, Rønnekleiv E. Method and apparatus for providing polarization-insensitive signal processing for interferometric sensors: US7081959[P]. 2006-07-25.
- 9 Wang Yixu, Wu Chongqing, Li Zhengyong, *et al.* Research on polarization stability of lithium niobate polarization encoder [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(9): 0906004.
王一旭, 吴重庆, 李政勇, 等. 铌酸锂偏振编码器的偏振稳定性研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(9): 0906004.
- 10 Zhang Ailing, He Peidong, Pan Honggang, *et al.* Design of electrically controlled double wavelength orthogonal polarization tunable filter[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(7): 072301.
张爱玲, 何培栋, 潘洪刚, 等. 电控可调谐的正交偏振双波长滤波器的设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(7): 072301.
- 11 Liu Yue, Jiang Peng, Ma Lina, *et al.* Experimental research on fiber optical sensing system based on interferometer with polarization switching[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(12): 120606.
刘 悦, 蒋 鹏, 马丽娜, 等. 干涉型光纤传感系统偏振切换技术原理及实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(12): 120606.
- 12 Rønnekleiv E. Elimination of polarization fading in unbalanced optical measuring interferometers: US6856401[P]. 2005-02-15.
- 13 Dandridge A, Tvelen A B, Glallorenzi T G. Homodyne demodulation scheme for fiber optic sensors using phase generated carrier[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics Letters*, 1982, 18(10): 1635-1641.
- 14 Rajan S, Wang S C, Inkol R, *et al.* Efficient approximations for the arctangent function[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2006, 23(3): 108-111.