

激光与光电子学进展

弱光纤布拉格光栅阵列的偏振补偿解调

刘文¹, 丁朋^{1,2}, 黄俊斌^{1*}, 顾宏灿¹, 姚高飞¹

¹海军工程大学兵器工程学院, 湖北 武汉 430033;

²海军工程大学电子工程学院, 湖北 武汉 430033

摘要 针对弱光纤布拉格光栅阵列的偏振衰落现象, 通过理论推导分析了双折射效应诱发的传输脉冲光偏振态变化对干涉光强信号的影响, 指出交流项系数耦合是引起零差对称算法解调信号失真的主要原因。为减小该影响, 提出了一种基于实时偏振态测量、可消除交流项耦合系数的偏振补偿方法。仿真结果表明, 偏振补偿的零差对称算法能在大动态范围内实现稳定的解调输出, 有效解决了常规零差对称算法解调过程中出现的信号大范围跳变问题。

关键词 光纤光学; 光纤布拉格光栅; 弱反射; 匹配干涉; 偏振补偿

中图分类号 TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0706005

Demodulation with Polarization Compensation for Weak Fiber Bragg Grating Array

Liu Wen¹, Ding Peng^{1,2}, Huang Junbin^{1*}, Gu Hongcan¹, Yao Gaofei¹

¹College of Weapons Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China;

²College of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China

Abstract To ease the polarization fading phenomenon of weak fiber Bragg grating array, the influence of the polarization variation of the light pulses induced by the birefringence effect on the interference intensity is analyzed theoretically, and the coupling coefficient of the alternating item is found to cause the distortion of phase signal, which is demodulated by the zero difference symmetry algorithm. In order to reduce the impact of the polarization fading phenomenon, we propose a kind of polarization compensation method based on real-time polarization measurement, by which the coupling coefficient of the alternating item is eliminated. The simulation results show that the polarization compensated zero difference symmetry algorithm can achieve stable demodulation results in a large dynamic range, and solve the large-range jump problem of the signals in the demodulation process of the conventional zero difference symmetric algorithm.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating; weak reflection; matching interference; polarization compensation

1 引言

光纤水听器具有灵敏度高、抗电磁干扰能力强等优势, 逐渐发展为水下信息感知的重要手段。随

着信号频段的扩展, 10 Hz 以下的低频、甚低频信号探测成为光纤水听器的主要发展方向^[1-2]。传统光纤水听器拖曳阵由分立元件组装而成, 结构复杂, 而弱光纤布拉格光栅(WFBG)阵列技术可在单根

收稿日期: 2021-05-21; 修回日期: 2021-06-19; 录用日期: 2021-07-02

基金项目: 国家自然科学基金(11774432)、湖北省自然科学基金(2018CFB788)

通信作者: *tsyj98@163.com

光纤上连续刻写多个 WFBG,为实现超细缆径甚低频光纤水听器拖曳阵的设计提供了新思路。Morey 等^[3]首次提出采用成对光纤布拉格光栅(FBG)构成光纤干涉仪的构想。为使下行光经过多个 FBG 反射后仍有足够高的功率,WFBG 被用于组建 FBG 法布里-珀罗(FBG-FP)谐振腔,并发展出了 TB-33 光纤细线拖曳阵^[4]。TB-33 采用分立 FBG 器件两两匹配干涉,通过缠绕弹性体提高灵敏度,单个探头的直径约为 10 mm。该 WFBG 阵列基于匹配干涉原理制作,且阵列无熔接点,采用非缠绕线型探头设计,单个 WFBG 水听器的长度为 m 量级,可通过增大 WFBG 水听器单元的长度,增大拖曳阵阵元间隔,结合零差对称(NPS)算法或相位生成载波(PGC)算法,可对甚低频水声信号进行有效探测^[5-8];通过高分子材料的二次涂覆,可实现约 40 dB 的水声增敏效果,阵列直径仅为 0.4 mm^[9]。

为了保证有效匹配干涉,必须对 WFBG 反射脉冲串的偏振状态进行控制,解决方法有偏振分集接收、偏振复合脉冲等。Waagaard 等^[10]采用偏振组合脉冲解调 WFBG 阵列,解调信号的信噪比相比未采用偏振组合时的脉冲增加了 15~20 dB,并在此基础上提出了基于偏振脉冲信号矩阵化的脉冲串扰抑制方法^[11]。Jiang 等^[12]将偏振组合脉冲与 PGC 算法相结合,有效降低了 WFBG 阵列的本底噪声。Wu 等^[13]将参考光与 WFBG 阵列的反射脉冲光合束进行混频正交偏振分集接收,系统的信噪比可达到 70 dB。Ren 等^[14]构造的相位正交脉冲、Wang 等^[15]构造的偏振复合脉冲均显著减小了偏振衰落效应对干涉信号对比度的影响。采用偏振分集接收和偏振复合脉冲均能有效抑制偏振衰落,但偏振分集接收方法对光脉冲进行强制分束,降低了接收光强的信噪比;偏振复合脉冲方法的驱动脉冲生成复杂,且对脉冲的偏振态要求较高。

为了减小偏振态变化对 WFBG 阵列的影响、保证匹配干涉信号的有效解调,本文分析了脉冲光偏振态对干涉信号的影响。结果表明,偏振方位角变化通过交流项系数耦合影响干涉光强,经 NPS 微分运算引入计算误差,导致解调结果产生随机漂移。为去除偏振方位角对干涉信号的影响,提出了一种实时监测脉冲光偏振态并对 NPS 算法进行补偿的方法。仿真结果表明,偏振补偿后的 NPS 算法能在大动态范围内实现稳定的解调输出,有效解决了常规 NPS 算法解调过程中出现的信号大范围跳变问题。

2 双偏振光束干涉原理

2.1 匹配干涉原理

单纵模激光脉冲在 N 元 WFBG 阵列中传输的示意图如图 1 所示。WFBG 阵列的栅距为 L ,各光栅的反射率、中心波长均相同且具有较大的 3 dB 带宽,类似于宽谱反射镜;脉冲光的线宽较窄,且波长位于 WFBG 反射谱范围内。只考虑 WFBG 的单次反射,光脉冲经历长为 $(i-1)L$ 的光纤后,被第 i 个 WFBG 反射并按原路返回。

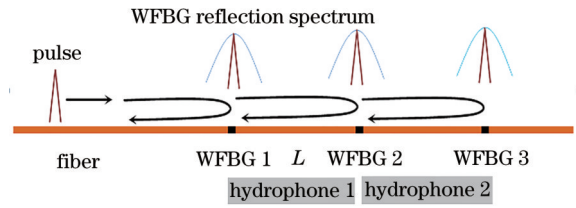


图 1 光脉冲在 WFBG 阵列中的传输示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the laser pulse transmission in WFBG array

光脉冲在相邻 WFBG 之间的往返传输时间为 $2n_{\text{eff}}L/c$,其中, n_{eff} 为纤芯的有效折射率, c 为真空中的光速。光脉冲被不同的 WFBG 依次反射,通常采用臂长差为 L 的 Michelson 干涉仪对 WFBG 阵列进行解调,使相邻两个 WFBG 中前一个光栅反射的光脉冲经干涉仪长臂传输,后一个光栅反射的光脉冲经干涉仪短臂传输,且两束光同时进入光电探测器,这两束光脉冲会发生重叠干涉,该现象也被称为基于 Michelson 干涉仪的匹配干涉。3 元 WFBG 阵列经过匹配干涉形成的单个周期光脉冲时序如图 2 所示,其中, τ 为脉冲宽度, $T_1 \sim T_5$ 表示不同时刻。

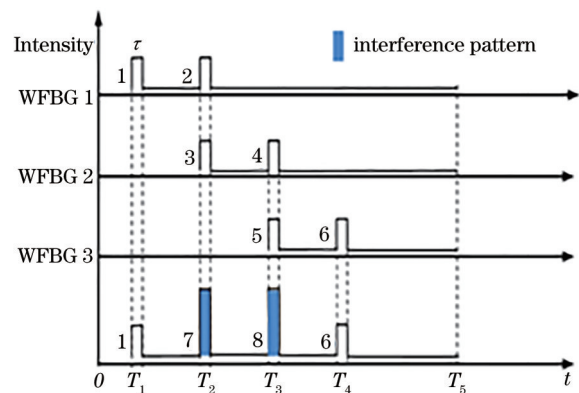


图 2 3 元 WFBG 阵列反射脉冲的时序图

Fig. 2 Timing diagram of pulses reflected by 3-WFBG array

宽度为 τ 、周期为 $T_5 T_1$ 的光脉冲进入 WFBG 阵列, WFBG 1 反射的光脉冲通过 Michelson 干涉仪后经光电探测器接收, 形成脉冲 1 和脉冲 2, 二者的时间差 $T_2 T_1$ 由阵列栅距及干涉仪臂长差 L 决定, 可表示为 $T_2 T_1 = 2n_{\text{eff}} L / c$; 为保证脉冲 1 和脉冲 2 不混叠, 使 $\tau < T_2 T_1$ 。同理, WFBG 2 形成脉冲 3、脉冲 4, 脉冲 2 和脉冲 3 在时间上重叠, 形成干涉脉冲 7。当外界声信号作用在 WFBG 1 和 WFBG 2 之间的光纤上时, 光脉冲往返传输的光程发生变化, 脉冲 1 和脉冲 3 的时间差发生变化, 导致干涉脉冲 7 的相位发生变化, 引起的光强信号变化可由光电探测器检测, 并通过 NPS 算法计算出相位变化, 从而反映外界的声信号变化。此时, WFBG 1 和 WFBG 2 及其之间的光纤构成了水听器 1。同理, WFBG 2 和 WFBG 3 及其之间的光纤构成了水听器 2。周期性的光脉冲进入 WFBG 阵列后, 为保证周期之间的脉冲信号不发生混叠, 还要保证脉冲周期 $T_5 T_1 > (N+1) T_2 T_1$ 。连续多个干涉脉冲组成了干涉光强信号, 最后经 NPS 算法计算出干涉相位信号。

采用 Michelson 干涉仪解调栅距为 L 的 N 元 WFBG 阵列时, 设 WFBG 的反射光谱符合高斯函数分布, 波长为 λ 的单纵模激光被第 i 个 WFBG 反射, 被反射的脉冲光强 I_i 可表示为

$$I_i = I_0 R_i \left[\prod_{l=1}^{i-1} (1 - R_{l-1}) \right]^2, \quad i \geq 2, \quad (1)$$

式中, I_0 为入射光脉冲的光强, R_i 为第 i 个 WFBG 的反射率。将光脉冲在第 i 段长度为 L 的光纤中往返传输时的相位变化量记为 $\Delta\varphi_i$, 被第 i 个 WFBG 反射回的光脉冲经干涉仪长臂后进入光电探测器时的电场强度可表示为

$$E_i = I_i^{1/2} \cos \left[\omega t + (i-1) \varphi_0 + \sum_0^{i-1} \Delta\varphi_i + \varphi_0 \right], \quad (2)$$

式中, φ_0 为初相位, ω 为光脉冲的角频率。被第 $i+1$ 个 WFBG 反射回的光脉冲经干涉仪短臂传输后进入光电探测器的电场强度可表示为

$$E_{i+1} = I_{i+1}^{1/2} \cos \left(\omega t + i\varphi_0 + \sum_0^i \Delta\varphi_i \right). \quad (3)$$

上述两束光进入光电探测器后发生干涉, 干涉光强可表示为

$$I = (E_i + E_{i+1})(E_i + E_{i+1})^* = I_i + I_{i+1} + 2(I_i I_{i+1})^{1/2} \cos(\Delta\varphi_i), \quad (4)$$

式中, 上标*表示共轭。

2.2 偏振对匹配干涉解调的影响

理想的单模光纤直径均匀, 两个正交偏振模式简并, 而实际光纤沿轴向存在加工误差, 且横向应力也会破坏光纤的圆柱对称性, 产生的双折射效应使两个正交偏振模不再简并^[16]。引入模式双折射度 B_m , 将其定义为

$$B_m = \left| \bar{n}_x - \bar{n}_y \right|, \quad (5)$$

式中, \bar{n}_x 、 \bar{n}_y 分别为两个正交偏振模的模式折射率。双折射效应导致光波在光纤中传输时两个偏振分量之间出现周期性功率交换, 该周期也被称为光纤的拍长 L_B , 可表示为

$$L_B = \lambda / B_m. \quad (6)$$

当光波的工作波长位于 1550 nm 附近时, 常规单模光纤拍长的典型值为 15 m。根据 WFBG 水听器的工作原理, 长度为 L 的 WFBG 水听器对于波长小于 $2L$ 的声波响应较弱, 相当于一个本征低通滤波器^[5]。为了探测低频水声信号, 设置 WFBG 阵列的栅距为 50 m, 则相邻 WFBG 之间的光纤包含了多个拍长, 且双折射沿轴向随机变化, 导致两个偏振分量的大小和方向都随机变化。光脉冲在相邻 WFBG 之间的光纤内往返传输后, 光纤双折射使光脉冲的偏振态发生随机变化, 因此经相邻 WFBG 反射的两束光脉冲偏振态不同。

采用 Jones 矩阵法^[17] 将两束偏振光脉冲的电场强度表示为

$$\mathbf{E}_i = E_i \exp(j\omega t + \varphi_i) \begin{bmatrix} \cos \theta_i \cos \epsilon_i - j \sin \theta_i \sin \epsilon_i \\ \sin \theta_i \cos \epsilon_i + j \cos \theta_i \sin \epsilon_i \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中, θ_i 为方位角, ϵ_i 为椭圆率角, j 为虚数单位, $i = 1, 2$ 。当两束线偏振光发生干涉时, $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 0$, 则干涉光强可表示为

$$I = I_i + I_{i+1} + 2(I_i I_{i+1})^{1/2} \cos(\theta_1 - \theta_2) \cos(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (8)$$

相比不考虑偏振的干涉结果, 线偏振光的干涉光强中交流项系数多了 $\cos(\theta_1 - \theta_2)$, 表明两束脉冲光的偏振方位角变化通过交流项系数影响干涉光强的大小; 对于 WFBG 水听器, 双折射效应会对水声信号的探测结果产生显著影响。

3 带偏振补偿的零差对称解调算法

3.1 基于 3×3 耦合器的零差对称解调算法

为求解携带水声传感信息的相位信号, 采用基于 3×3 耦合器的 NPS 算法对干涉光强信号进行解调。令 $\theta_1 - \theta_2 = \theta$, $\varphi_1 - \varphi_2 = \varphi$, 则 3×3 耦合器的三路

输出光强为

$$I_m = D + b \cos \theta \cos \left[\varphi - \frac{2(m-1)\pi}{3} \right], m = 1, 2, 3, \quad (9)$$

式中, D 为直流分量, b 为交流分量系数。经直流运算, 得到 3 路干涉光强的交流信号为

$$\alpha_m = b \cos \theta \cos \left[\varphi - \frac{2(m-1)\pi}{3} \right]. \quad (10)$$

为进行数值计算, 对(10)式进行离散化, 得到

$$\alpha_m = b \cos [\theta(n)] \cos \left[\varphi(n) - \frac{2(m-1)\pi}{3} \right], \quad (11)$$

式中, n 为采样点数。记 α_m 的微分为 α'_m , 经差分法以及微分运算后执行 NPS 算法, 即 $\alpha_1(\alpha'_2 - \alpha'_3) + \alpha_2(\alpha'_3 - \alpha'_1) + \alpha_3(\alpha'_1 - \alpha'_2)$ 运算, 输出信号可表示为

$$\begin{aligned} N_{\text{NPS}} = & \alpha_1(n)[\alpha_2(n) - \alpha_2(n-1) - \alpha_3(n) + \alpha_3(n-1)] + \\ & \alpha_2(n)[\alpha_3(n) - \alpha_3(n-1) - \alpha_1(n) + \alpha_1(n-1)] + \\ & \alpha_3(n)[\alpha_1(n) - \alpha_1(n-1) - \alpha_2(n) + \alpha_2(n-1)] = \\ & -\alpha_1(n)\alpha_2(n-1) + \alpha_1(n)\alpha_3(n-1) - \alpha_2(n)\alpha_3(n-1) + \\ & \alpha_2(n)\alpha_1(n-1) - \alpha_3(n)\alpha_1(n-1) + \\ & \alpha_3(n)\alpha_2(n-1), \end{aligned} \quad (12)$$

将(11)式代入(12)式, 得到

$$N_{\text{NPS}} = \frac{3\sqrt{3}}{2} b^2 \cos [\theta(n)] \cos [\theta(n-1)] \times \sin [\varphi(n) - \varphi(n-1)], \quad (13)$$

执行“ $\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \alpha_3^2$ ”运算, 输出信号

$$S_{\text{NPS}} = \frac{3}{2} b^2 \cos^2 [\theta(n)], \quad (14)$$

执行“ $N_{\text{NPS}}/S_{\text{NPS}}/3^{1/2}$ ”运算及积分运算, 得到

$$\varphi(n) = \varphi(n-1) + \frac{\cos [\theta(n-1)]}{\cos [\theta(n)]} \times \sin [\varphi(n) - \varphi(n-1)]. \quad (15)$$

由(15)式可知, 当 $\theta(n)$ 缓慢变化, $\theta(n)$ 与 $\theta(n-1)$ 没有正负号跳变且 $\varphi(n)$ 连续变化时, 能够准确计算出 $\varphi(n)$ 。而上述任意一个条件不满足时, 都会导致 $\varphi(n)$ 失真。相对低频信号, 高频信号探测更容易被双折射效应引发的解调失真影响。

3.2 偏振补偿原理

为确保 $\varphi(n)$ 不失真, 在 NPS 解调算法的基础上进行偏振态补偿, 通过实时监测两束光脉冲的偏振态 θ_1, θ_2 , 用(11)式除以 $\cos \theta$, 将三路干涉光强信号的交流分量系数变为常数, 从而消除 $\cos \theta$ 变化导致的 NPS 微分运算误差。以 2 元 WFBG 阵列为例, 为消除双折射效应对信号解调稳定性的影响, 基于常规 Michelson 干涉仪系统和 NPS 算法, 在 3×3 耦

合器的空闲端接入高速偏振分析仪, 构建带偏振补偿的 Michelson 匹配干涉仪解调系统。激光器输出的连续激光被声光调制器 (AOM) 调制为脉冲激光, 经过掺铒光纤放大器 (EDFA) 放大后注入环形器 1 的端口 1, 被该环形器端口 2 的 WFBG 阵列反射后, 脉冲信号通过该环形器端口 3 的 Michelson 干涉仪进行解调, 并采用法拉第旋镜 (FRM) 减小偏振态变化对干涉信号对比度的影响, 其光路结构如图 3 所示。根据高速偏振分析仪获得的光脉冲偏振态, 对 NPS 算法进行补偿, 并将其记为 PNPS 算法。

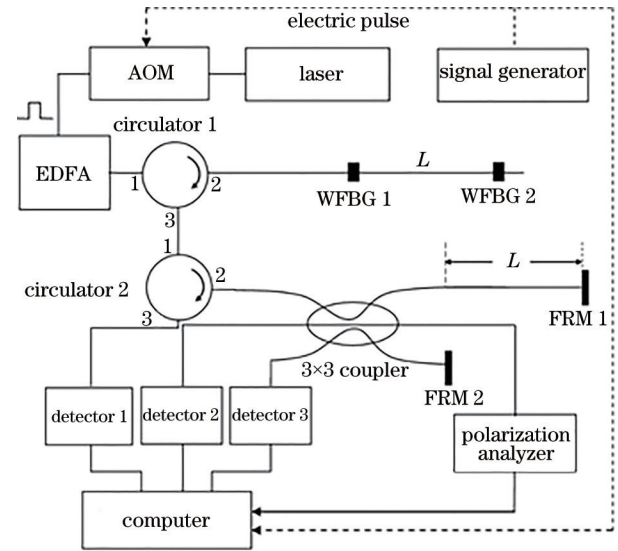


图 3 带偏振补偿的 Michelson 匹配干涉仪解调系统光路图
Fig. 3 Optical path diagram of Michelson matching interferometer demodulation system with polarization compensation

由 WFBG 1 反射的光脉冲 01 进入 3×3 耦合器输入端, 1 路进入 Michelson 干涉仪短臂, 由 FRM 反射进入光电探测器, 记为脉冲 1; 1 路进入 Michelson 干涉仪长臂, 由 FRM 反射返回进入光电探测器, 记为脉冲 2; 1 路进入偏振分析仪, 记为脉冲 8。由 WFBG 2 反射的脉冲光 02 进入 3×3 耦合器的输入端, 1 路进入 Michelson 干涉仪短臂, 由 FRM 反射进入光电探测器, 记为脉冲 3; 1 路进入 Michelson 干涉仪长臂, 由 FRM 反射进入光电探测器, 记为脉冲 4; 1 路进入偏振分析仪, 记为脉冲 9。带偏振态监测的 2 元 WFBG 阵列反射脉冲时序如图 4 所示。

设置 Michelson 干涉仪的臂长, 使脉冲 1 和脉冲 8 的时序一致、脉冲 3 和脉冲 9 的时序一致。理想情况下, 耦合器、环形器不改变偏振态, 则脉冲 8 和脉冲 01 的偏振态相同。经旋转角为 45° 的 FRM 反射, 往返传输的光脉冲偏振态不发生变化^[18]; 脉冲 1、2

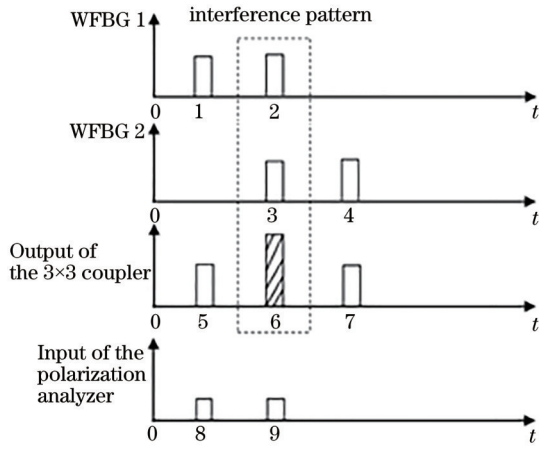


图 4 带偏振态监测的 2 元 WFBG 阵列反射脉冲时序图
Fig. 4 Timing diagram of pulses reflected by 2-WFBG array with polarization monitoring

与脉冲 01 的偏振态相同,也与脉冲 8 的偏振态相同;同理,脉冲 3、4 与脉冲 9 的偏振态相同,从而通过监测脉冲 8、9 的偏振态补偿干涉脉冲 6 的解调。

3.3 仿真结果

为了对偏振补偿解调算法进行检验,设置严苛的仿真条件,选择大振幅、高频的正弦信号作为待解调的干涉相位信号,观察考虑双折射效应时脉冲的偏振态变化对信号解调的影响。设置相位传感信号的振幅为 25 rad、频率为 10 kHz,相位 θ 在 $[0, \pi/2]$ 内随机变化,分别采用 NPS 算法和带偏振补偿的 PNPS 算法对相位传感信号进行仿真计算,解调结果如图 5 所示。可以发现,当 θ 在 $[0, \pi/2]$ 内随机变化时, $\cos \theta \in [0, 1]$, 此时 NPS 算法和 PNPS 算法的解调结果都能观察到周期接近完整的正弦信号。

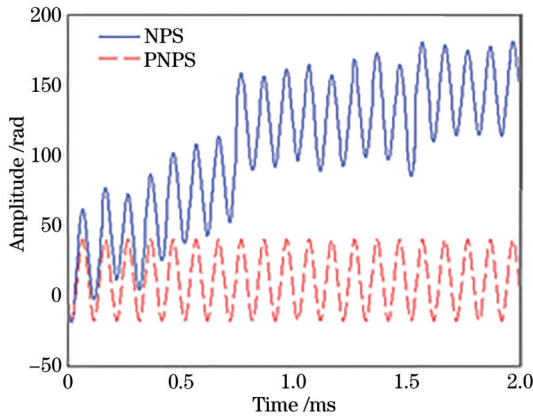


图 5 NPS 和 PNPS 算法对 $\theta \in [0, \pi/2]$ 内随机变化干涉信号的仿真结果
Fig. 5 Simulation results of NPS and PNPS algorithms for randomly varying interference signal in $\theta \in [0, \pi/2]$

尽管 NPS 算法计算的相位信号能得到相对稳定的解调结果,但出现了明显的相位漂移现象。原因是相位信号计算过程受 $\cos \theta$ 的小幅度调制,而 PNPS 算法的计算结果非常稳定,没有出现相位漂移情况。

为了进一步对比 NPS 算法和 PNPS 算法的解调效果,保持振幅和频率不变,将相位传感信号的相位随机变化范围扩大到 $[0, \pi]$,继续采用 NPS 算法和 PNPS 算法对相位传感信号进行仿真计算,结果如图 6 所示。可以发现:当 θ 在 $[0, \pi]$ 区间内随机变化时, $\cos \theta \in [-1, 1]$, NPS 算法无法得到相对稳定的解调结果,计算出的相位信号出现大范围跳变现象,整体无规律且伴随正负号跳变,这表明双折射效应会显著影响 NPS 算法的解调结果;经过偏振态补偿后,PNPS 算法仍然能够得到稳定的解调结果,计算出的相位信号能很好地还原单频正弦信号,验证了 PNPS 算法的抗偏振衰落效果。

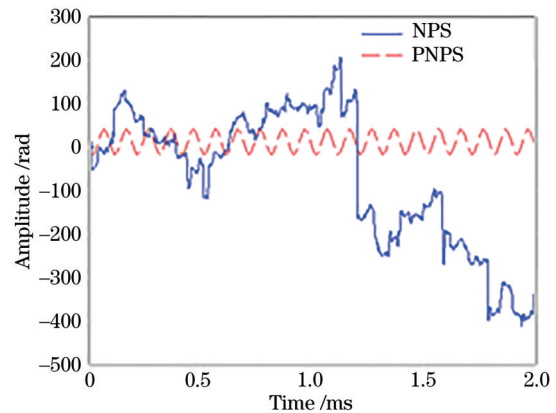


图 6 NPS 和 PNPS 算法对 $\theta \in [0, \pi]$ 内随机变化干涉信号的仿真结果

Fig. 6 Simulation results of NPS and PNPS algorithms for randomly varying interference signal in $\theta \in [0, \pi]$

要想达到良好的实时偏振补偿效果,脉冲 8、9 的偏振态测试必须满足 WFBG 阵列的信号采集要求。由于单模光纤中偏振态漂移为慢变量,采用索雷博公司的 DPC5500 型偏振控制器(连续模式下平均时间为 $10 \mu\text{s} \sim 300 \text{ms}$,偏振态的测量精度为 $\pm 0.25^\circ$)实现偏振复用光纤通信系统的实时光纤信道偏振补偿^[19];对于 WFBG 水听器,在进行相位-声压灵敏度测试时,典型 WFBG 阵列系统的采样频率为 50 MHz、激光脉冲宽度为 300 ns、周期为 $5 \mu\text{s}$ ^[5],而典型高速偏振分析仪(General Photonics 公司 POD-201)的采样率可达 2 MHz,满足相对缓慢变化的光脉冲偏振态测试需求。用(10)式对 θ 求导,得到

$$\frac{\partial \alpha_m}{\partial \theta} = -b \sin \theta \cos \left[\varphi - \frac{2(m-1)\pi}{3} \right]. \quad (16)$$

可以发现:当 $\theta = \pm \pi/2$ 时,(16)式的模取得极大值,即 θ 的变化对干涉光强交流信号 α_m 的影响最大;当 θ 为其他值时, θ 的变化对干涉光强交流信号 α_m 的影响相对较小。因此,主要分析 θ 在 $\pm \pi/2$ 附近变化时对干涉解调结果的影响。典型高速偏振分析仪的偏振态测量精度为 $\pm 0.25^\circ$,将光脉冲偏振态工作点设置在 $\pi/2$ 附近,令 θ 在 $[\pi/2 - 0.25\pi/180, \pi/2 + 0.25\pi/180]$ 区间内随机变化,采用PNPS算法对相位传感信号进行仿真计算,结果如图7所示。可以发现:当 θ 在 $[\pi/2 - 0.25\pi/180, \pi/2 + 0.25\pi/180]$ 区间内随机变化时,除了 $\theta = \pi/2$ 外,PNPS算法计算出的相位信号均能得到相对稳定的解调结果,偏振态测试误差对于干涉解调的影响表现为一定程度的相位漂移;当 $\theta = \pm \pi/2$ 时,出现了明显的相位跳变情况,原因是 $\cos \theta = 0$,在偏振补偿过程中 $\cos \theta$ 为分母,该点为PNPS算法的奇点。由光的干涉条件可知,当 $\theta = \pm \pi/2$ 时,两束线偏振光的相位相互正交,无法发生有效干涉,WFBG阵列也无法正常工作。尽管采用PNPS算法时存在两个奇点,但当 θ 为其他值时,均能在当前偏振态测量精度下通过偏振补偿实现稳定解调,不会出现常规NPS算法解调结果中的持续相位跳变情况,这表明PNPS算法极大拓展了稳定干涉解调的动态范围。由于对光纤施加横向应力可导致双折射效应,理论上使裸纤偏振态的相位变化 π 对应的应力为10.71 N,因此,可以在环形器2的端口2尾纤处对光纤施加横向应力,使光脉冲偏振态偏离 $\pm \pi/2$ 的奇点位置;还

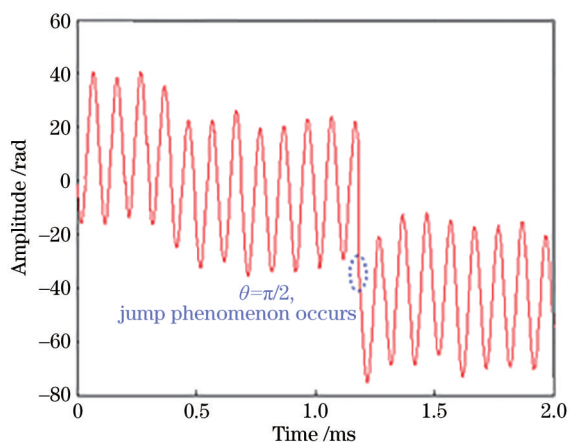


图7 PNPS算法对随机变化干涉信号的仿真结果

Fig. 7 Simulation results of PNPS algorithm for randomly changing interference signal

可以通过插入偏振控制器,实现对光脉冲偏振态工作点的精确控制,保证采用PNPS算法总是能得到相对稳定的干涉解调结果。

4 结 论

通过研究WFBG阵列中双折射效应引起的脉冲信号偏振态变化对信号解调的影响,提出了一种采用实时监测光脉冲偏振态、在NPS微分运算前利用光脉冲偏振态补偿干涉光强的PNPS解调算法。仿真结果表明:当传感信号相位变化较大时,常规NPS算法无法得到稳定的解调结果;而PNPS算法通过偏振补偿,除两个奇点位置外,在较大动态范围内均能减小干涉光强偏振耦合交流分量系数的影响,有效抑制偏振衰落现象。本算法利用 3×3 耦合器的空闲输出端进行偏振态监测,无需构造复杂的偏振复合脉冲,也不必对干涉信号进行强制分束,在简化系统结构、保证干涉脉冲信噪比的同时,极大拓展了稳定干涉解调的动态范围,有利于提高基于匹配干涉的WFBG阵列信号解调精度。下一步工作将对仿真结果进行实验验证,并开展更大复用容量WFBG阵列信号解调抗偏振衰落的实验研究,进一步提高WFBG水听器阵列的工作稳定性,为推动其向高精度、大规模阵列的发展提供指导。

参 考 文 献

- [1] Plotnikov M Y, Lavrov V S, Dmitraschenko P Y, et al. Thin cable fiber-optic hydrophone array for passive acoustic surveillance applications[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(9): 3376-3382.
 - [2] Lavrov V S, Plotnikov M Y, Aksarin S M, et al. Experimental investigation of the thin fiber-optic hydrophone array based on fiber Bragg gratings[J]. Optical Fiber Technology, 2017, 34: 47-51.
 - [3] Morey W W, Dunphy J R, Meltz G. Multiplexing fiber Bragg grating sensors[J]. Proceedings of SPIE, 1992, 1586: 216-224.
 - [4] Kirkendall C, Barock T, Tveten A, et al. Fiber optic towed arrays[J]. NRL Review, 2007: 121-123.
 - [5] Ding P, Wu J, Kang D, et al. Detection of acoustic wave direction using weak-reflection fiber Bragg gratings[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0506002.
- 丁朋, 吴晶, 康德, 等. 采用弱反射光纤布拉格光栅的声波方向检测[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0506002.

- [6] Pang Y D. Research on key technology for ultrathin fiber-optic hydrophone based on draw tower fiber Bragg grating array[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020: 31-47.
庞彦东. 基于拉丝塔光栅阵列的超细线光纤水听器关键技术研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020: 31-47.
- [7] Ding P, Huang J B, Wang Y Y, et al. Extraction of interference signal of weak reflection fiber Bragg grating by wavelet transform[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(19): 190603.
丁朋, 黄俊斌, 汪云云, 等. 采用小波变换提取弱反射光纤布拉格光栅干涉信号[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(19): 190603.
- [8] Huang J B, Ding P, Tang J S. Progress in fabrication, demodulation and application of weak fiber Bragg grating array[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(17): 1700005.
黄俊斌, 丁朋, 唐劲松. 弱反射光纤光栅阵列制备、解调与应用进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(17): 1700005.
- [9] Ding P, Huang J B, Yao G F, et al. Weak reflection fiber Bragg grating hydrophone with secondary coating sensitization[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(9): 0906003.
丁朋, 黄俊斌, 姚高飞, 等. 二次涂覆增敏型弱反射光纤布拉格光栅水听器[J]. 中国激光, 2021, 48(9): 0906003.
- [10] Waagaard O H, Rønnekleiv E, Forbord S, et al. Reduction of crosstalk in inline sensor arrays using inverse scattering[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7004: 70044Z.
- [11] Waagaard O H, Rønnekleiv E, Forbord S, et al. Suppression of cable induced noise in an interferometric sensor system[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7503: 75034Q.
- [12] Jiang P, Ma L N, Hu Z L, et al. Low-crosstalk and polarization-independent inline interferometric fiber sensor array based on fiber Bragg gratings[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(18): 4232-4239.
- [13] Wu M S, Fan X Y, Liu Q W, et al. Highly sensitive quasi-distributed fiber-optic acoustic sensing system by interrogating a weak reflector array[J]. Optics Letters, 2018, 43(15): 3594-3597.
- [14] Ren Z J, Cui K, Zhu R H, et al. Efficient and compact inline interferometric fiber sensor array based on fiber Bragg grating and rectangular-pulse binary phase modulation[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(23): 9556-9561.
- [15] Wang F, Liu Y, Wei T, et al. Polarization fading elimination for ultra-weak FBG array-based Φ -OTDR using a composite double probe pulse approach[J]. Optics Express, 2019, 27(15): 20468-20478.
- [16] Liao Y B. Fiber optics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000: 74-77.
廖延彪. 光纤光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000: 74-77.
- [17] Yu D Y, Tan H Y. Engineering optics[M]. 4th ed. Beijing: China Machine Press, 2015.
郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 4版. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [18] Li Z N, Shen L, Ye X F. Study of polarization-insensitive fiber optic Michelson interferometric sensors [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2002, 36(1): 44-46.
李志能, 沈梁, 叶险峰. 偏振无关的 Michelson 光纤传感器的研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2002, 36(1): 44-46.
- [19] Huang Y, Zhao J Y, Wang J D, et al. A real-time polarization compensation system based on wavelength-division multiplexing for optical fiber communication systems[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(14): 1406003.
黄媛, 赵家钰, 王金东, 等. 一种基于波分复用的实时光纤信道偏振补偿系统[J]. 光学学报, 2020, 40(14): 1406003.