

光学学报

基于光纤光栅的时分复用传感阵列相位噪声研究

尚凡, 戚悦, 马丽娜*, 蒋鹏, 陈羽, 王俊, 熊水东

国防科技大学气象海洋学院, 湖南 长沙 410073

摘要 针对采用相位生成载波(PGC)调制解调方案的光纤光栅时分复用(TDM)传感系统,研究传感阵列结构和调制解调参数对系统相位噪声的影响。理论分析结果表明,阵列的结构设计会制约系统调制解调参数的设计与选取,而且因光纤光栅传感系统中需采用偏振调制手段来抑制偏振诱导信号衰落,当时分复用数量越多和单基元传感光纤长度越长时,系统调制解调频率的上限越低。仿真分析 PGC 调制解调算法中的高频混叠效应,结果表明调制频率越小,系统的本底相位噪声越大。实验搭建 4 套不同设计结构的干涉型光纤光栅时分复用传感阵列,PGC 调制频率分别为 6,10,16,50 kHz。实验测得 4 套系统在 1 kHz 频点处,第一时分复用通道相位噪声分别为 -93, -96, -98 和 -99 dB/Hz^{1/2},与理论分析结果吻合。

关键词 光纤光学; 光纤传感; 光纤光栅; 相位噪声; 相位生成载波

中图分类号 O436.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1306011

Background Phase Noise of Interferometric TDM Sensing Array Based on Fiber Bragg Grating

Shang Fan, Qi Yue, Ma Lina*, Jiang Peng, Chen Yu, Wang Jun, Xiong Shuidong

College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract For a fiber-grating time-division multiplexing (TDM) sensing system adopting the phase-generated carrier (PGC) modulation and demodulation schemes, the influence of the structure of the sensor array and the modulation and demodulation parameters on the system phase noise is investigated. The theoretical analysis results show that the array will constrain system structure design of modem design and selection of parameters, and by using polarization modulation in the fiber Bragg grating sensing system means to suppress the induced polarization signal fading. When the number of time-division multiplexing is larger, the system frequency modulation demodulation of the lower limit. The simulation analysis of the high-frequency aliasing effect in the PGC modulation and demodulation algorithms show that the smaller the modulation frequency, the greater the background phase noise of the system. In the experiment, four sets of interferometric fiber Bragg grating time-division multiplexing sensor arrays with different design structures are constructed. The PGC modulation frequencies are 6, 10, 16, and 50 kHz. The experimental results show that the phase noises of the first time-division multiplexing channel for the four systems at the frequency of 1 kHz, are -93, -96, -98, and -99 dB/Hz^{1/2}, respectively, which are consistent with the theoretical analysis results.

Key words fiber optics; optical fiber sensing; fiber Bragg grating; phase noise; phase generated carrier

OCIS codes 060.2370; 060.2310; 060.3735

1 引言

基于光纤光栅的干涉型传感系统是将光纤光栅

作为传感端唯一的光纤器件,其可以通过相位检测的方式来拾取外界传感信号,具有传感结构高度集成、可靠性高、体积小、质量轻、灵敏度高和动态范围

收稿日期: 2021-03-01; 修回日期: 2021-04-12; 录用日期: 2021-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(61901488)

通信作者: *mln_c7@nudt.edu.cn

大等突出优势,在水下声学探测和地震波检测等领域有着重要的应用^[1-7]。

相位噪声是基于光纤光栅的干涉型传感阵列系统的关键技术指标之一,其决定了传感系统的最小可检测值,并且制约了系统传感的动态范围^[8-9]。一般而言,系统的相位噪声水平受多个因素的共同影响。在典型的基于光纤光栅的干涉型传感系统中,随机相位衰落和偏振诱导信号衰落依然是决定其本底相位噪声涨落的关键,两个问题的妥善解决是确保获取稳定相位噪声的基本条件。其中随机相位衰落抑制方案中的技术与传统迈克耳孙型干涉仪通用,如外差调制解调^[10]和相位生成载波(Phase Generated Carrier, PGC)调制解调^[11]等技术。针对偏振诱导信号衰落的问题,由于基于光纤光栅的干涉型传感阵列系统中传感端的极简设计,因此使用法拉第旋转镜抑制偏振诱导信号衰落的方法不再适用,而偏振切换(Polarization Switching, PS)和偏振分集是效果较好的两种解决方案^[12-16]。在有效抑制随机相位衰落及偏振诱导信号衰落的基础上,系统中本底噪声相位水平的高低主要取决于所使用的光电子元器件,如激光光源、光放大器、光调制器和传输链路光纤等,这些器件的选择和优化是目前的主要关注和研究热点^[17-19]。近年来,对于基于光纤光栅的干涉型传感阵列系统的研究发现,即使随机相位衰落与偏振诱导信号衰落都得到了良好的解决,但不同光学时分复用(TDM)结构的本底噪声相位水平仍会存在显著差异。文献[20]提出的 5 重时分复用结构的本底相位噪声在频率为 1 kHz 处约为 $10 \mu\text{rad} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$,即 $-100 \text{ dB} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。文献[21]提出的 8 重时分复用结构的本底相位噪声在频率为 1 kHz 处约为 $-98 \text{ dB} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。文献[22]

提出的 2 重时分复用结构的本底相位噪声在频率为 1 kHz 处约为 $-91 \text{ dB} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。综合研究结果发现,当技术路线和器件完全相同时,不同时分复用结构的本底相位噪声依然存在差异^[15, 21-22]。

针对基于 PGC 调制解调技术的光纤光栅干涉型传感阵列系统,本文重点研究时分复用结构对传感相位噪声的影响,通过理论仿真和实验分析来呈现制约系统的调制解调参数以改变本底相位噪声的现象,研究结果对光纤光栅传感阵列的设计具有重要的指导意义。此外,鉴于基于光纤光栅的干涉型传感系统与相位型分布式光纤传感系统均依赖于调制解调参数来获取低噪声传感信息^[23],因此本文研究对于分布式光纤传感系统也有一定的参考意义。

2 基本原理

2.1 基于 PGC 调制解调的光纤光栅干涉型时分复用传感阵列系统的基本原理

基于光纤光栅的干涉型时分复用阵列系统中传感端的光学结构如图 1 所示, B^{up} 和 B^{down} 分别为上、下行传输琼斯矩阵, FBG 为光纤布拉格光栅, n 为 FBG 顺序标号, S 为相邻 FBG 所组成的传感腔体, λ 为 FBG 的中心波长。将 $n+1$ 个参数相同的光纤光栅等间距地刻写在一根光纤上,由相邻光栅及其之间的光纤段构成一个传感基元,由 $n+1$ 个光栅及 n 段光纤构成 n 重时分复用阵列。当脉冲间隔与相邻光栅间的往返时间相同的双询问光脉冲注入阵列时,每个光栅均反射一对光脉冲。每个光栅所反射的第二个光脉冲会与后继相邻光栅所反射的第一个光脉冲在光路上完全重合,即发生干涉,而干涉相位中则携带两光栅间传感光纤所拾取的外界传感信息。

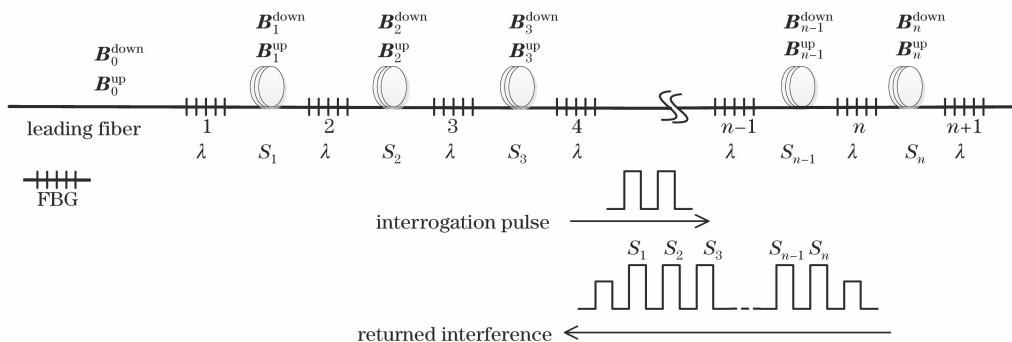


图 1 基于光纤光栅的干涉型时分复用传感阵列系统的结构

Fig. 1 Structure of interferometric time-division multiplexing sensor array system based on fiber Bragg grating

每个传感基元中传感光纤的传输琼斯矩阵 $B_i = \exp(-j\varphi_i)U_i$, 其中 $i = 1, 2, \dots, n$, φ 为光纤的

相位延迟,其含有外界传感信号, U 为光纤双折射矩阵,其由光纤双折射状态决定,又称为酉正矩阵^[24]。

假设光栅的反射谱相同,当 $i = 1$ 时,传感基元的干涉光电场可表示为

$$\begin{cases} \mathbf{E}_{r1} = \mathbf{B}_0^{\text{up}} \mathbf{r} \rho_0 \mathbf{B}_0^{\text{down}} \mathbf{E}_{\text{in}1} \\ \mathbf{E}_{s1} = t_0^2 \mathbf{B}_0^{\text{up}} \mathbf{B}_1^{\text{up}} \mathbf{r} \rho_1 \mathbf{B}_1^{\text{down}} \mathbf{B}_0^{\text{down}} \mathbf{E}_{\text{in}0} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: \mathbf{r} 为反射矩阵; $\mathbf{E}_{\text{in}0}$ 和 $\mathbf{E}_{\text{in}1}$ 分别为两个入射光脉冲的琼斯向量; \mathbf{E}_r 和 \mathbf{E}_s 分别为相邻 FBG 所反射的两个干涉光电场; ρ 为 FBG 的反射率; t 为 FBG

的透射率。当 $i \geq 2$ 时,传感基元的干涉光电场可表示为

$$\begin{cases} \mathbf{E}_{ri} = \prod_{k=0}^{i-2} t_k^2 \prod_{k=0}^{i-1} \mathbf{B}_k^{\text{up}} \mathbf{r} \rho_{i-1} \prod_{k=i-1}^0 \mathbf{B}_k^{\text{down}} \mathbf{E}_{\text{in}1} \\ \mathbf{E}_{si} = \prod_{k=0}^{i-1} t_k^2 \prod_{k=0}^i \mathbf{B}_k^{\text{up}} \mathbf{r} \rho_i \prod_{k=i}^0 \mathbf{B}_k^{\text{down}} \mathbf{E}_{\text{in}0} \end{cases}. \quad (2)$$

第 i 个传感基元的干涉光强可表示为

$$\begin{cases} I_1 = (\mathbf{E}_{s1} + \mathbf{E}_{r1})^\dagger (\mathbf{E}_{s1} + \mathbf{E}_{r1}) = I_{1\text{-DC}} + 2\rho_0 \rho_1 t_0^2 \text{Re}[\mathbf{E}_{\text{in}1}^\dagger (\mathbf{B}_0^{\text{down}})^\dagger (\mathbf{B}_1^{\text{down}})^\text{T} \mathbf{B}_1^{\text{down}} \mathbf{B}_0^{\text{down}} \mathbf{E}_{\text{in}0}], i = 1 \\ I_i = (\mathbf{E}_{si} + \mathbf{E}_{ri})^\dagger (\mathbf{E}_{si} + \mathbf{E}_{ri}) = \\ I_{i\text{-DC}} + 2\rho_{i-1} \rho_i t_{i-1}^2 \left(\prod_{k=0}^{i-2} t_k^4 \right) \text{Re} \left\{ \mathbf{E}_{\text{in}1}^\dagger \left[\prod_{k=0}^{i-1} (\mathbf{B}_k^{\text{down}})^\dagger \right] (\mathbf{B}_k^{\text{down}})^\text{T} \mathbf{B}_k^{\text{down}} \left(\prod_{k=i-1}^0 \mathbf{B}_k^{\text{down}} \right) \mathbf{E}_{\text{in}0} \right\}, i \geq 2 \end{cases}, \quad (3)$$

式中: \dagger 为矩阵共轭转置符号; $\text{Re}(\cdot)$ 为取实部; $I_{i\text{-DC}}$ 为相应干涉通道的直流光场强度。(3)式中 $(\mathbf{B}_i^{\text{up}})^\text{T} = \mathbf{r} \mathbf{B}_i^{\text{down}} \mathbf{r}$, 而且为酉正矩阵^[15,21], 即 $\mathbf{B}_i^\dagger \mathbf{B}_i = \mathbf{B}_i^\text{T} \mathbf{B}_i^* = \mathbf{I}$, 其中 \mathbf{I} 为单位矩阵, $*$ 为矩阵共轭符号。由(3)式可知,第 i 个传感基元的相位信号包含在 $(\mathbf{B}_i^{\text{down}})^\text{T} \mathbf{B}_i^{\text{down}}$ 中,但其与前序光纤的下行、上行传输琼斯矩阵为乘积关系。若从干涉信号中提取传感相位,则会受到光纤双折射状态随机波动的影响,即出现偏振诱导信号衰落的现象。

每个传感基元的冲击响应矩阵为

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_i &= \prod_{k=0}^{i-1} (\mathbf{B}_k^{\text{down}})^\dagger (\mathbf{B}_k^{\text{down}})^\text{T} \mathbf{B}_i^{\text{down}} \prod_{k=i}^0 \mathbf{B}_k^{\text{down}} = \\ &\exp(-i \cdot 2\varphi_i) \left[\prod_{k=0}^{i-1} (\mathbf{U}_k^{\text{down}})^\dagger (\mathbf{U}_k^{\text{down}})^\text{T} \mathbf{U}_i^{\text{down}} \prod_{k=i-1}^0 \mathbf{U}_k^{\text{down}} \right] = \\ &\exp(-i \cdot 2\varphi_i) \mathbf{U}'_i, \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{U}'_i = \prod_{k=0}^{i-1} (\mathbf{U}_k^{\text{down}})^\dagger (\mathbf{U}_k^{\text{down}})^\text{T} \mathbf{U}_i^{\text{down}} \prod_{k=i-1}^0 \mathbf{U}_k^{\text{down}}$, 而且为多个酉正矩阵的乘积。根据酉正矩阵的性质,求解与系统光纤双折射状态无关的传感相位信号 $2\varphi_i$, 表达式为

$$\begin{cases} I_{\text{XX}i} = I_{i\text{-DC}} + t'_i \cdot \text{Re}\{\exp[-i \cdot C \cos(2\pi f_{\text{PGC}} t)]\} \cdot \text{Re}\{\exp[-i \cdot (2\varphi_i)] U_{11i}\} \\ I_{\text{XY}i} = I_{i\text{-DC}} + t'_i \cdot \text{Re}\{\exp[-i \cdot C \cos(2\pi f_{\text{PGC}} t)]\} \cdot \text{Re}\{\exp[-i \cdot (2\varphi_i)] U_{12i}\} \\ I_{\text{YX}i} = I_{i\text{-DC}} + t'_i \cdot \text{Re}\{\exp[-i \cdot C \cos(2\pi f_{\text{PGC}} t)]\} \cdot \text{Re}\{\exp[-i \cdot (2\varphi_i)] U_{21i}\} \\ I_{\text{YY}i} = I_{i\text{-DC}} + t'_i \cdot \text{Re}\{\exp[-i \cdot C \cos(2\pi f_{\text{PGC}} t)]\} \cdot \text{Re}\{\exp[-i \cdot (2\varphi_i)] U_{22i}\} \end{cases}, \quad (7)$$

其中

$$t'_i = \begin{cases} 2\rho_{i-1} \rho_i t_0^2 |E_0|^2, i = 1 \\ 2\rho_{i-1} \rho_i t_{i-1}^2 \prod_{k=0}^{i-2} t_k^4 |E_0|^2, i \geq 2 \end{cases}, \quad (8)$$

式中: E_0 为询问光脉冲的电场幅度。每个偏振通道

$$\sqrt{\det \mathbf{R}_i} = \exp(-i \cdot 2\varphi_i), \quad (5)$$

式中: $\det(\cdot)$ 为取矩阵行列式。为了实时估计和测量 \mathbf{R}_i , 在实际系统中常采用偏振切换方法进行处理,该方法使用 4 种不同偏振态组合的询问脉冲对分时测量 \mathbf{R}_i 中的各矩阵元素,而 4 种询问光脉冲对的电场可表示为

$$\begin{cases} \mathbf{E}_{\text{in}0} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{E}_{\text{in}1} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \exp[-i \cdot C \cos(2\pi f_{\text{PGC}} t)] \\ \mathbf{E}_{\text{in}0} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{E}_{\text{in}1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \exp[-i \cdot C \cos(2\pi f_{\text{PGC}} t)] \\ \mathbf{E}_{\text{in}0} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \mathbf{E}_{\text{in}1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \exp[-i \cdot C \cos(2\pi f_{\text{PGC}} t)] \\ \mathbf{E}_{\text{in}0} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \mathbf{E}_{\text{in}1} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \exp[-i \cdot C \cos(2\pi f_{\text{PGC}} t)] \end{cases}, \quad (6)$$

式中: C 为调制幅度; f_{PGC} 为调制频率。(6)式中的 $\exp[-i \cdot C \cos(2\pi f_{\text{PGC}} t)]$ 为 PGC 调制信号。将(6)式依次代入(3)式,则第 i 个传感基元的 4 路偏振通道干涉光强分别为

的冲击响应分别为

$$\begin{cases} R_{\text{XX}i} = \exp(-i \cdot 2\varphi_i) U_{11i} \\ R_{\text{XY}i} = \exp(-i \cdot 2\varphi_i) U_{12i} \\ R_{\text{YX}i} = \exp(-i \cdot 2\varphi_i) U_{21i} \\ R_{\text{YY}i} = \exp(-i \cdot 2\varphi_i) U_{22i} \end{cases}. \quad (9)$$

将(9)式代入(5)式,则有

$$\sqrt{R_{XXi} \times R_{YYi} - R_{XYi} \times R_{YXi}} = \sqrt{\det \mathbf{R}_i} = \exp(-i \cdot 2\varphi_i) \quad (10)$$

由于解调算法混合使用了 PGC 调制解调与偏振切换技术,故称为 PGC-PS 调制解调方案^[7]。当使用 PGC-PS 调制解调方案时,系统中存在三个待选取的调制频率参数,即询问脉冲对重复频率 f_{AOM} 、偏振切换频率 f_{PS} 以及 PGC 调制频率 f_{PGC} 。设传感阵列中每个传感基元光纤的光学长度为 L (纤芯折射率与物理长度的乘积)和时分复用重数为 N ,则相邻两询问脉冲对的时间间隔 τ 必须满足

$$\tau > \frac{2L}{c}N, \quad (11)$$

才能确保干涉有效。式中: c 为真空中的光速。询问频率需满足

$$f_{AOM} < 1/\tau. \quad (12)$$

偏振切换频率需满足 $f_{PS} = f_{AOM}/4$ 。在 PGC 解调的过程中,通常需要使用 f_{PGC} 的四倍频项来完成传感信号的有效提取。为了满足所有偏振通道中干涉信号的整周期采样,一般取 $f_{PGC} = f_{PS}/16$ 。将(11)式和(12)式代入 $f_{PGC} = f_{PS}/16$ 中,可得 PGC 调制解调频率的选取上限,表达式为

$$f_{PGC} < \frac{1}{64NL}c. \quad (13)$$

由(13)式可以知, f_{PGC} 受限于时分复用阵列中的单基元光纤长度及复用数量,二者乘积的结果越大,则可选取的偏振调制频率及 PGC 调制频率的上限越小。

2.2 PGC 调制解调中的高频混叠与相位噪声

基于光纤光栅的干涉型传感阵列系统中,每个传感基元中发生干涉的两束光脉冲在相邻两个光栅上发生反射,干涉光束之间有恒定的相位差,该相位差即为干涉仪的工作点。受到外界环境的扰动,工作点的随机漂移将会导致干涉信号信噪比的随机涨落,从而引起传感系统本底相位噪声的提升,即发生随机相位衰落。PGC 调制解调作为抑制光纤干涉仪随机相位衰落的有效技术手段之一,在各类光纤传感系统中有着广泛的应用。基于光纤光栅的干涉型传感阵列系统中,PGC 调制解调需要与偏振切换算法混合使用,算法流程如图 2 所示,其中 DCM 为微分相乘。各偏振通道中的干涉信号经过光电转换后分别与 $\cos(2\pi f_{PGC}t)$ 项和 $\cos(4\pi f_{PGC}t)$ 项乘积以达到混频的目的,使用低通滤波来去除在 f_{PGC} 以上的高频成分后,通过复数化来获取(8)式各偏振通道的冲击响应。各偏振通道的冲击响应经过交叉相乘

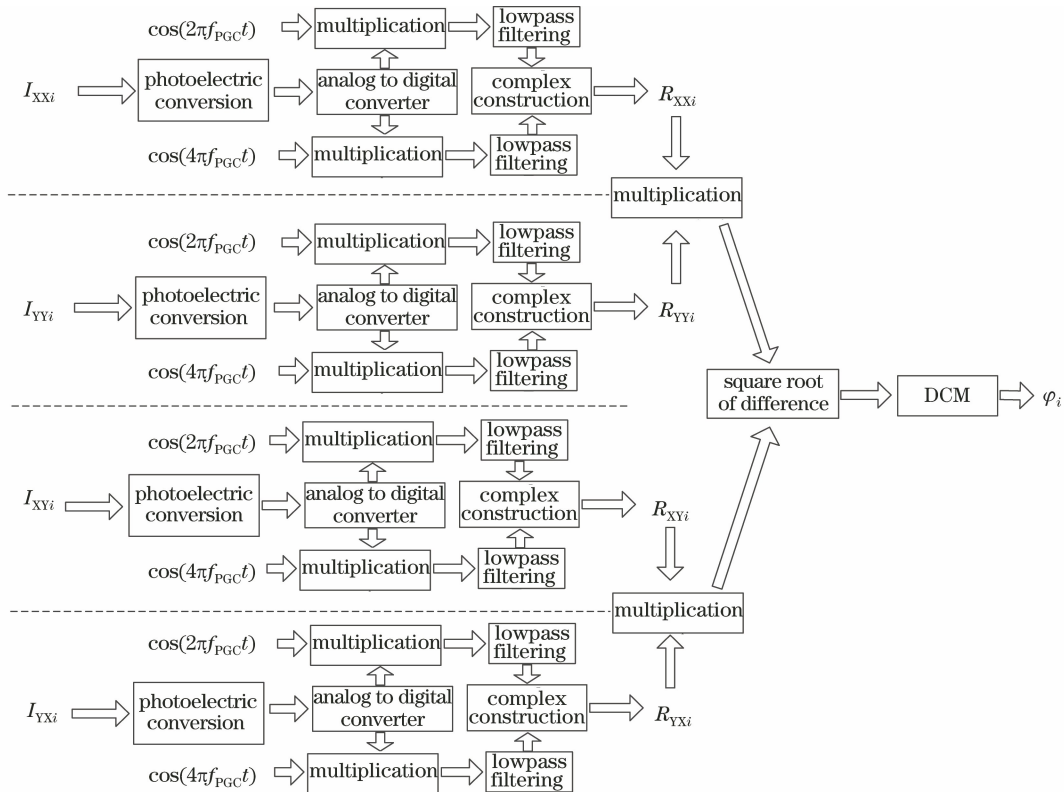


图 2 PGC-PS 解调流程

Fig. 2 PGC-PS demodulation process

和相减的处理后得到(10)式,可以消除偏振衰落所导致的干扰。最后,采用 DCM 算法^[25]或反正切算法可以提取得到传感相位信号。

采用 PGC-PS 算法首先消除随机相位衰落,接着消除偏振诱导信号衰落。图 3 为 PGC 调制解调算法消除随机相位衰落前后的频域解释。(13)式不考虑偏振诱导信号衰落,则 PGC 调制解调信号的通用表达式为

$$I(t) = I_{i_DC} + t'_i \cdot \text{Re}\{\exp[-i \cdot C \cos(2\pi f_{PGC}t)]\} \cdot \text{Re}\{\exp[-i \cdot (2\varphi_i)]\} \quad (14)$$

在 $I_{i_DC} = t'_i = 1, C = 2.37, f_{PGC} = 12.5 \text{ kHz}, 2\varphi_i = \phi_s(t) + \phi_0 + \phi_n, \phi_s(t) = 0.5 \cos(2\pi \times 500t)$ 和 $\phi_0 + \phi_n = \pi/5$ 的情况下,仿真得到的 PGC 调制载波信号频谱如图 3 所示,仿真过程中信号 $2\phi_i = \phi_s(t) + \phi_0 + \phi_n$,其中 $\phi_s(t)$ 为待传感信号, ϕ_0 为干涉仪工作点的初始相位, ϕ_n 为工作点的随机相位漂移量。图 3(a)为未施加调制载波项的干涉信号频谱,图 3(b)为施加载波项的干涉信号频谱。将干涉光强分别与 $\cos(2\pi f_{PGC}t)$ 项和 $\cos(4\pi f_{PGC}t)$ 项相乘后进行低通滤波处理,可以分别提取加载在 f_{PGC} 和 $2f_{PGC}$ 频率上的传感信号。由于 $\cos(2\pi f_{PGC}t)$ 项和 $\cos(4\pi f_{PGC}t)$ 项均为人为施加的稳定信号,所以不易受到环境的扰动,因此可以避免相位随机衰落现象的发生。

从图 3(b)可以看到,待测传感信号和噪声同时以各阶倍频的形式分别加载在直流及 f_{PGC} 各阶倍频的两侧。当传感信号与噪声的频带越宽和强度越大时,在各加载频率两侧占用的频带宽度就越宽。

表 1 PGC 调制解调噪声混叠的仿真参数

Table 1 Simulation parameters of PGC modulation and demodulation noise aliasing

I_{i_DC}/mW	C	f_{PGC}/kHz	$\phi_s(t) / \text{rad}$	ϕ_g / rad
$1 + 0.01 \cdot \omega$	2.37	50, 16, 10, 6	$5 \sum_{k=1}^{50} \omega \cdot \cos(2\pi kt)$	$(1 + 0.001 \cdot \omega)\pi/2$

由表 1 可知,干涉仪的工作点设置在 $\pi/2$ 附近,并加入 0.1% 的随机扰动噪声;发生反射的两束光光强设为 1,并加入 1% 的随机扰动噪声; $\phi_s(t)$ 项为频率从 1 Hz 到 50 Hz 的低频扰动,在每个频点上扰动的幅度为 0~5 中的随机数。从图 3 可以看到, $\phi_s(t)$ 及其各阶倍频项均加载在 $N'f_{PGC}$ ($N' = 0, 1, 2, 3$) 的两侧。从图 4(a)和图 4(b)可以看到,当 f_{PGC} 值较大,即 f_{PGC} 分别为 50 kHz 和 16 kHz 时,不同频域上的 $\phi_s(t)$ 均能够被显著区分。从图 4(c)可以看到,当 f_{PGC} 值减小至 10 kHz 时,加载在 $N'f_{PGC}$ 右侧的 $\phi_s(t)$ 开始与加载在 $(N'+1)f_{PGC}$ 左侧的

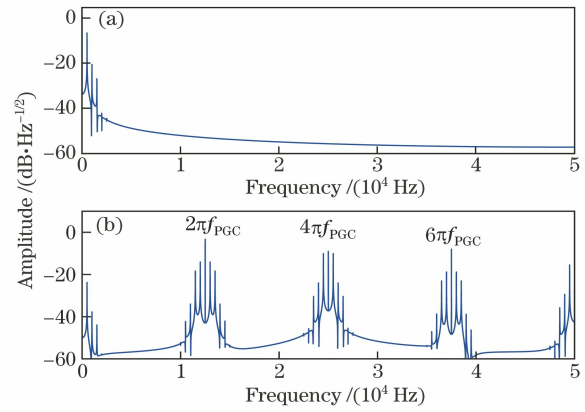


图 3 施加 PGC 调制载波信号前后的频谱特征。

(a) 施加前; (b) 施加后

Fig. 3 Spectrum characteristics before and after application PGC modulated carrier signal.

(a) Before application; (b) after application

当单侧加载信号的频带宽度达到 $f_{PGC}/2$ 时,加载在直流右侧的信号和噪声谱会与加载在 f_{PGC} 左侧的信号和噪声谱发生混叠,同理加载在 f_{PGC} 右侧的信号和噪声谱也会与加载在 $2f_{PGC}$ 左侧的信号和噪声谱发生混叠。若信号和噪声谱发生混叠,在提取 f_{PGC} 及 $2f_{PGC}$ 频点处的信号过程中,则混叠频谱成分也将一并提取。对于信号,混叠频谱成分将会导致信号失真,而且决定了 PGC 调制解调的动态范围上限。对于噪声,混叠频谱成分将会导致 PGC 调制解调过程中本底相位噪声的提升。图 4 为噪声与 PGC 调制频率的关系,其中所用参数如表 1 所示,其中 $I_{i_DC} = t'_i, \phi_g = \phi_0 + \phi_n, \omega$ 为服从 $[0, 1]$ 区间平均分布的随机变量。

$\phi_s(t)$ 发生混叠;从图 4(d)可以看到,当 f_{PGC} 值减小至 6 kHz 时,加载在所有 $N'f_{PGC}$ ($N' = 0, 1, 2, 3$) 项上的 $\phi_s(t)$ 均发生严重混叠。

当系统中光学器件的性能及外界环境扰动对干涉仪本底噪声的贡献相对固定时,若 f_{PGC} 值越小,则混叠的噪声频谱成分越多,解调信号的本底相位噪声就越大。当干涉仪中存在白噪声、频率为 $1/f$ 的噪声、频率为 $1/f^2$ 的噪声和混合噪声时,不同调制频率下的解调本底相位噪声如图 5 所示。从图 5 可以看到,对于任一类型的噪声,当采用 6, 10, 16, 50 kHz 的 PGC 调制频率时,系统中的本底相位噪

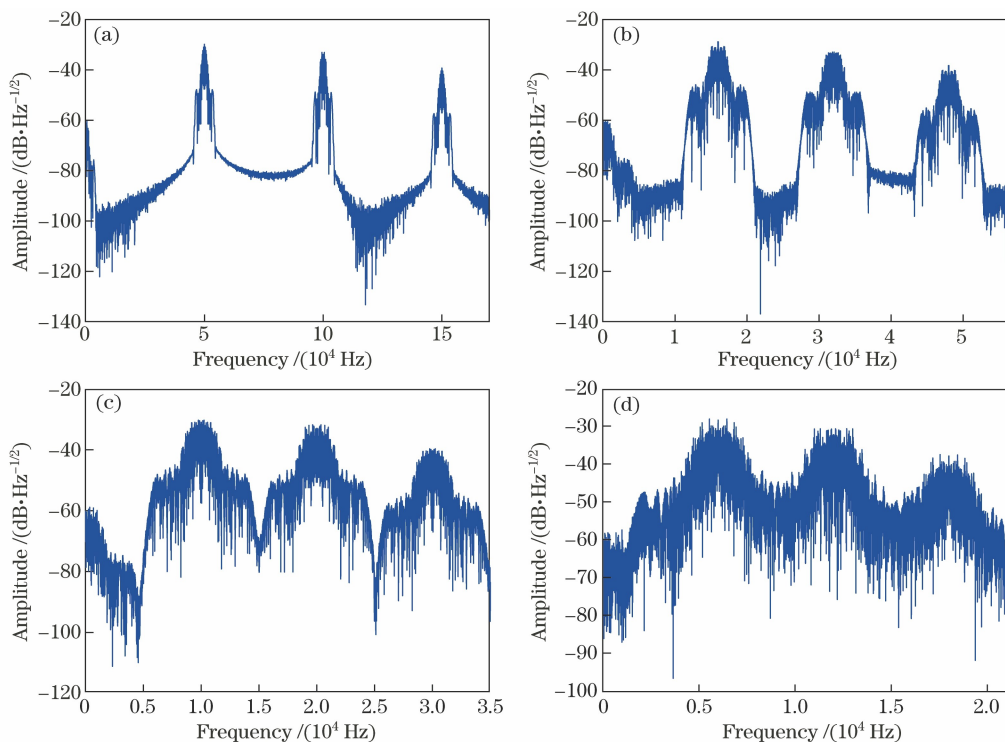


图 4 高频噪声与 PGC 调制频率的关系。(a) 50 kHz ; (b) 16 kHz ; (c) 10 kHz ; (d) 6 kHz

Fig. 4 Relationship between high frequency noise and PGC modulation frequency.

(a) 50 kHz ; (b) 16 kHz ; (c) 10 kHz ; (d) 6 kHz

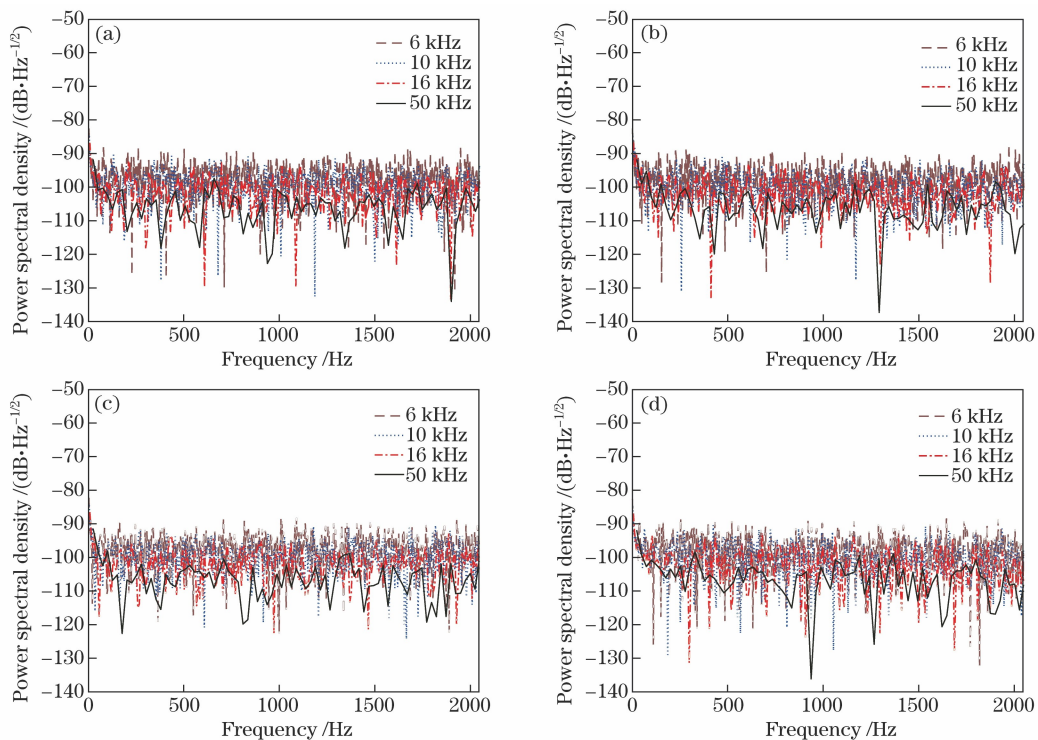


图 5 不同调制频率下的噪声解调结果。(a)白噪声;(b)频率为 $1/f$ 的噪声;(c)频率为 $1/f^2$ 的噪声;(d)混合噪声

Fig. 5 Noise demodulation results at different modulation frequencies. (a) White noise; (b) noise with frequency of $1/f$;

(c) noise with frequency of $1/f^2$; (d) mixed noise

声都会随着调制频率的增加而降低。

3 实验分析

实验中共搭建 4 套光纤光栅时分复用传感阵列系统,其主要设计结构及调制参数如表 2 所示。4 套系统全部采用 PGC 调制解调方案,使用的主要电子元器件基本相同。在控制反射率的基础上,不同

表 2 4 套光纤光栅传感阵列系统的主要设计结构及调制参数

Table 2 Main design structure and modulation parameters of 4 sets of fiber Bragg grating sensor array system

Parameter	1	2	3	4
Laser source type	Fiber laser	Fiber laser	Fiber laser	Laser diode
Relative intensity noise of laser at 1 kHz /dB	-120	-120	-120	-110
N	8	2	4	8
Reflectivity /%	0.6	0.6	0.6	0.1
Polarization control	PS	PS	PS	All polarization-maintaining
Fiber length of element /m	58.78	39.75	18.25	40.00
f_{AOM}/kHz	192	320	512	400
f_{PGC}/kHz	6	10	16	50

第 1 套为 8 重时分复用结构,系统的光路如图 6 所示。阵列中的材料采用普通的单模光纤,共刻写 9 枚反射中心波长为 1539.58 nm 的光纤光栅,光栅的反射率为 0.6%,相邻光栅之间的光纤长度为 58.78 m。根据(11)式可知,系统允许的最大 PGC 调制频率约为 6.9 kHz。系统采用自制的全保偏窄线宽环形腔光纤激光器,中心波长为 1539.58 nm,在 1 kHz 频率处的相对强度噪声小于 -120 dB。使用 GOOCH&HOUSEG 公司生产的声光调制器(Acoustic Optic Modulator, AOM)将激光器所输出的连续光调制为脉冲光,调制频率为询问脉冲的重复频率,即 192 kHz。将干涉仪两干

光栅之间的多重反射会提升位于时分复用结构后端的基元本底相位噪声,如当存在外界传感信号时,则会形成信道串扰。前期研究表明,当光栅的反射率低于 1%时,多重反射的反射光强是正常反射光强的 1/10000 以下,此时多重反射对系统传感的影响可忽略不计^[15,21-22,26],因此 4 套系统的光栅反射率都控制在 1%以下。

涉臂光纤长度差为 117.56 m 的全保偏马赫-曾德尔干涉仪作为匹配干涉仪(Compensation Interferometer, CIF),用来将输入光脉冲转换成询问光脉冲对。将 CIF 短臂中的部分光纤缠绕在压电陶瓷环(Piezoelectric ceramic transducer, PZT)上,可以产生 PGC 调制信号,调制频率为 6 kHz。CIF 输出脉冲对后,通过保偏尾纤的偏振切换器(Polarization Switching, PS)可以实现对每个脉冲的偏振态调制,偏振切换的频率为 48 kHz。在完成 PGC 调制和偏振调制后,激光脉冲对通过光纤环形器(Circulator)注入到光纤光栅传感阵列中,光纤环形器的三个端口尾纤均为普通的单模光纤。

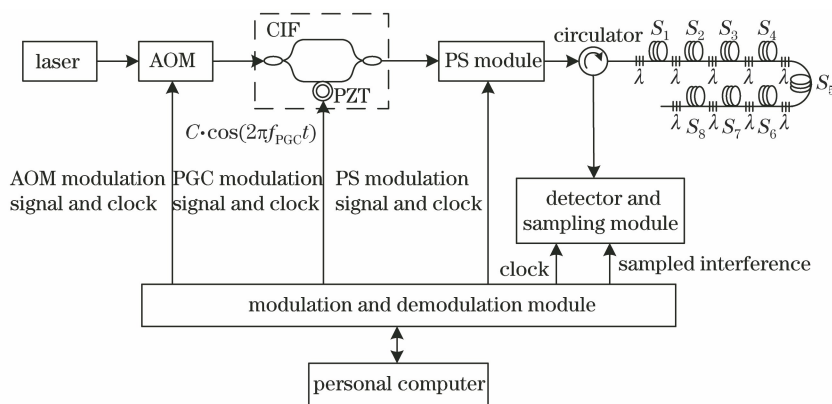


图 6 8 重时分复用单模光纤光栅传感阵列的实验系统

Fig. 6 Experimental system of 8-fold time-division multiplexed single-mode fiber Bragg grating sensing array

图 7 为 8 个时分复用通道中本底相位噪声的测量结果。从图 7 可以看到,在 1 kHz 频点处,8 个通

道的本底相位噪声均在 -93 ~ -90 dB/Hz^{1/2} 之间。

第 2 套为 2 重时分复用结构。阵列中刻写 3

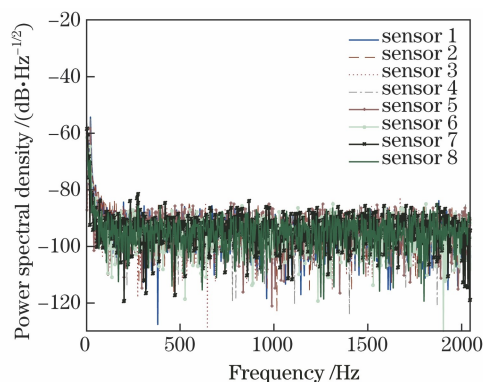


图 7 8 个时分复用通道中本底相位噪声的测量结果

Fig. 7 Measurement results of background phase noise in 8 time-division multiplexed channels

枚反射中心波长为 (1539.8 ± 0.01) nm 的光纤光栅,光栅的反射率为 0.6%。相邻光栅间的光纤长度为 39.75 m,阵列光纤为普通的单模光纤。系统使用自制的全保偏窄线宽环形腔光纤激光器,激光器的中心波长为 1539.8 nm,在 1 kHz 频率处的相对强度噪声小于 -120 dB。其他光电子学器件与第一套系统相同,AOM 询问频率为 320 kHz,PGC 调制频率为 10 kHz,偏振切换频率为 80 kHz。图 8 为两个时分复用通道中本底相位噪声的测量结果。从图 8 可以看到,在 1 kHz 频点处,两个通道的本底相位噪声分别为 -96 dB/Hz^{1/2} 和 -94 dB/Hz^{1/2}。

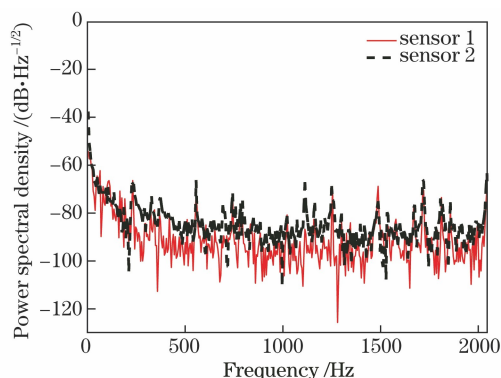


图 8 两个时分复用通道中本底相位噪声的测量结果

Fig. 8 Measurement results of background phase noise in two time-division multiplexed channels

第 3 套为 4 重时分复用结构。阵列中刻写 5 枚反射中心波长为 1533.42 nm 的光纤光栅,光栅的反射率为 0.6%。相邻光栅间的光纤长度为 18.25 m,阵列光纤为普通的单模光纤。系统使用的光源为自制的窄线宽环形腔光纤激光器,激光器的中心波长为 1533.42 nm。CIF 光纤长度差为 36.5 m,其他主要光电子学器件与第一套系统相同。AOM 询问频率为 512 kHz,PGC 调制频率为

16 kHz,偏振切换频率为 128 kHz。图 9 为 4 个时分复用通道中本底相位噪声的测量结果。从图 9 可以看到,在 1 kHz 频点处,4 个通道的本底相位噪声均在 -98 dB/Hz^{1/2} 附近。

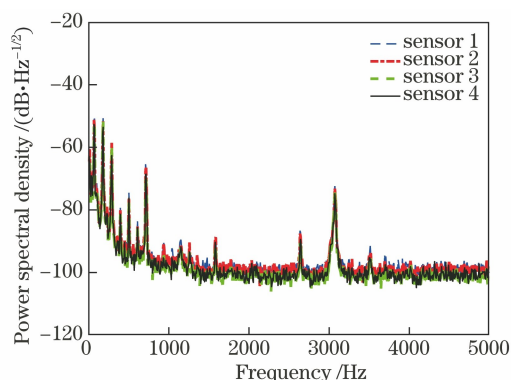


图 9 4 个时分复用通道中本底相位噪声的测量结果

Fig. 9 Measurement results of background phase noise in four time-division multiplexed channels

第 4 套为 8 重时分复用结构,光路结构如图 10 所示。阵列中刻写 9 枚反射中心波长为 1535.84 nm 的光纤光栅,光栅的反射率为 0.1%,相邻光栅间的光纤长度为 40 m。与前三套系统不同,为了提高 PGC 调制频率,本系统采用全保偏光纤方案来抑制偏振诱导信号衰落。系统使用窄线宽半导体激光器作为光源,中心波长为 1535.84 nm,在 1 kHz 频率处的相对强度噪声小于 -110 dB。系统使用的声光调制器与前 3 套系统相同,AOM 询问频率为 400 kHz。CIF 中的两臂差为 80 m,PGC 调制频率为 50 kHz。图 11 为全保偏 8 个时分复用通道中本底相位噪声的测量结果。从图 11 可以看到,在 1 kHz 频点处,8 个通道的本底相位噪声均接近 -99 dB/Hz^{1/2}。

需要说明的是,在第 4 套系统中使用的窄线宽半导体激光器的噪声大于前 3 套系统使用的环形腔光纤激光器。通常而言,激光器自身的噪声越大,时分复用光纤光栅系统的本底相位噪声越大。然而由于实验中第 4 套系统的 PGC 调制频率远大于前三套,该系统的本底相位噪声依然为 4 套系统中的最优。若采用波长合适的自制窄线宽环形腔光纤激光器作为光源,则第 4 套系统的本底相位噪声还可以得到进一步的提升。

通过搭建 4 套不同设计结构与调制参数的光纤光栅传感系统,可以获得 4 种不同的本底相位噪声。鉴于实验过程中需要更改设计参数和结构,所以难以在完全相同的环境扰动中进行测试。由于环境扰

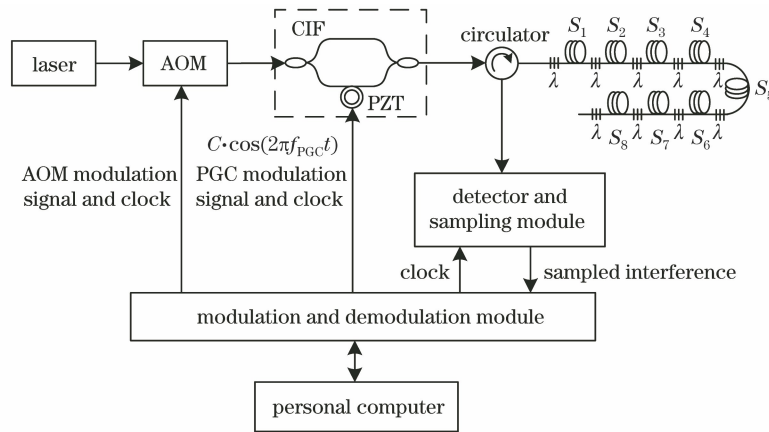


图 10 8 重时分复用保偏光纤光栅传感阵列的实验系统

Fig. 10 Experimental system of 8 time-division multiplexing polarization-maintaining fiber Bragg grating sensor array

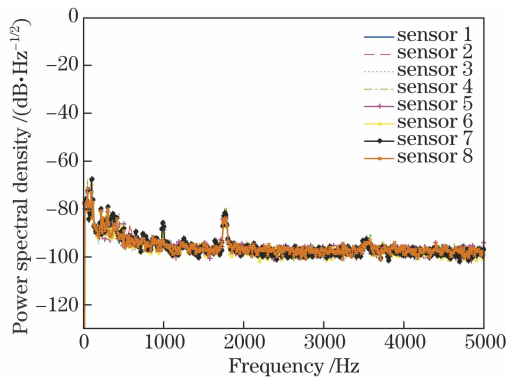


图 11 全保偏 8 个时分复用通道中本底相位噪声的测量结果
Fig. 11 Measurement results of background phase noise in all polarization-maintaining 8 time-division multiplexing channels

动主要影响低频段噪声,因此系统在较高频点处测量得到的噪声更能反映结构设计和调制参数对相位噪声的影响。4 套系统在 1 kHz 频点处,第一时分复用通道的相位噪声如图 12 所示。从图 12 可以看到,当 PGC 调制频率大于 6 kHz 时,由于高频混叠

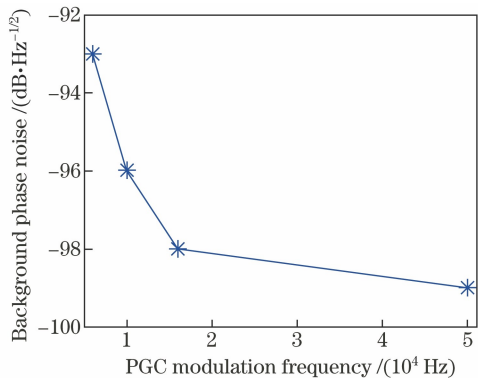


图 12 1 kHz 频点处相位噪声与 PGC 调制频率的关系
Fig. 12 Relationship between phase noise and PGC modulation frequency at 1 kHz frequency

的现象显著减少,则系统的本底相位噪声水平迅速下降;当调制频率高于 10 kHz 时,已经显著避开了高频混叠区,则系统的本底相位噪声水平依然随着调制频率的提高而下降,但下降的斜率逐渐变缓。

4 结 论

本文深入研究基于 PGC 调制解调的光纤光栅干涉型传感阵列相同的相位噪声,重点关注阵列结构与调制解调参数对本底相位噪声的影响。阵列时分复用数量、单基元光纤长度和调制解调参数等诸多因素均会影响本底相位噪声水平,其中阵列时分复用数量和单基元光纤长度通过制约调制解调参数来影响阵列的相位噪声。在调制解调参数的过程中,直接影响相位噪声水平的是 PGC 调制频率,调制频率越小,阵列的相位噪声越高,仿真结果表明该现象主要由 PGC 调制高频区域混叠导致的。基于光纤光栅的干涉型传感阵列通常采用偏振调制方案来抑制偏振诱导信号衰落,当时分复用数量与单基元光纤长度增加时,PGC 调制频率会受到限制,最终导致相位噪声的提升情况更为严重。实验测试 4 种不同结构的光纤光栅时分复用阵列的相位噪声。由于单基元光纤长度、时分复用数量和偏振调制手段不同,而 4 套系统所采用的 PGC 调制频率分别为 6, 10, 16, 50 kHz, 实验测得 4 套系统在 1 kHz 频点处,第一时分复用通道的相位噪声分别为 -93, -96, -98, -99 dB/Hz^{1/2}。本文从调制解调的角度来分析相位噪声与系统参数设计之间的关系。当实际传感应用对阵列规模和基元灵敏度有特殊要求时,本文给出系统相位噪声的提升与动态范围降低的评估方法,对基于光纤光栅的干涉型传感阵列系统的设计具有重要的支撑意义。

参 考 文 献

- [1] Okawara C, Saijyou K. Fiber optic interferometric hydrophone using fiber Bragg grating with time division multiplexing [J]. *Acoustical Science and Technology*, 2007, 28(1): 39-42.
- [2] Tao X, Jiang S, Song K. Low-cost and long-perimeter system based on weak grating array and its alarm mechanism [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(4): 0406001.
陶鑫, 江山, 宋珂. 基于弱光栅阵列低成本大长周界系统及其报警机制[J]. *中国激光*, 2020, 47(4): 0406001.
- [3] 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.
- [4] Zhang W C, Zhao H, Liu T, et al. Acoustic detection technology based on fiber Bragg grating Fabry-Perot interferometer in liquid medium [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(9): 0906001.
张伟超, 赵洪, 刘通, 等. 基于光纤光栅法布里-珀罗干涉仪的液体介质声波检测技术研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(9): 0906001.
- [5] Guo Z, Gao K, Yang H, et al. 20-mm-diameter interferometric hydrophone towed array based on fiber Bragg gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(11): 1106003.
郭振, 高侃, 杨辉, 等. 外径 20 mm 的光纤光栅干涉型拖曳水听器阵列[J]. *光学学报*, 2019, 39(11): 1106003.
- [6] Kirkendall C, Barock T, Tveten A, et al. Fiber optic towed arrays [R]. Washington, DC: U. S. Naval Research Laboratory Optical Sciences Division, 2007: 121-123.
- [7] Jiang Y, Chen S F. Direct demodulation for signal from fiber grating sensors by interferometer based on 3×3 coupler [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(11): 1487-1490.
江毅, 陈淑芬. 用 3×3 耦合器的干涉仪直接解调光纤光栅传感器的信号[J]. *光学学报*, 2004, 24(11): 1487-1490.
- [8] Ma L N, Yu Y, Wang J, et al. Analysis on real-time phase delay in an interferometric FBG sensor array using polarization switching and the PGC hybrid processing method [J]. *Optics Express*, 2020, 28(15): 21903-21915.
- [9] Kumar S S, Khansa C A, Praveen T V, et al. Assessment of dynamic range in interferometric fiber optic hydrophones based on homodyne PGC interrogator [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(22): 13418-13425.
- [10] Zhang N, Rao W, Meng Z, et al. Investigation on the maximum signal handling capability of fiber optic interferometric sensor based on the digital heterodyne demodulation scheme [J]. *Optik*, 2014, 125(19): 5771-5775.
- [11] Dandridge A, Tveten A, Giallorenzi T. Homodyne demodulation scheme for fiber optic sensors using phase generated carrier [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1982, 18(10): 1647-1653.
- [12] Ming N, Yang H Y, Xiong S D, et al. Investigation of polarization-induced fading in fiber-optic interferometers with polarizer-based polarization diversity receivers [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(11): 2387-2390.
- [13] Kersey A D, Marrone M J. Input-polarisation scanning technique for overcoming polarisation-induced signal fading in interferometric fibre sensors [J]. *Electronics Letters*, 1988, 24(15): 931-933.
- [14] Ferreira L A, Santos J L, Farahi F. Polarization-induced noise in a fiber-optic Michelson interferometer with Faraday rotator mirror elements [J]. *Applied Optics*, 1995, 34(28): 6399-6402.
- [15] Ma L N, Wang J, Hu Z L, et al. An ultra-low crosstalk and polarization independent inline interferometric fiber Bragg grating sensor array [C]// 26th International Conference on Optical Fiber Sensors (OFS26), September 24-28, 2018, Vaud, Switzerland. Washington, DC: OSA, 2018: ThE77.
- [16] Waagaard O H, Ronnekleiv E. Method and apparatus for providing polarization insensitive signal processing for interferometric sensors: US7081959 [P/OL]. 2006-07-25 [2021-03-12]. <https://patents.google.com/patent/US7081959B2/en>.
- [17] Tu J X, Huang J B, Gu H C, et al. Phase noise of fiber laser hydrophone demodulation interferometer [J]. *Ship Electronic Engineering*, 2016, 36(12): 165-169.
涂吉祥, 黄俊斌, 顾宏灿, 等. 光纤激光水听器解调干涉仪相位噪声研究[J]. *舰船电子工程*, 2016, 36(12): 165-169.
- [18] Cao C Y, Yao Q, Rao W, et al. Linewidth measurement using unbalanced fiber-optic interferometer for narrow linewidth lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(5): 0508005.
曹春燕, 姚琼, 饶伟, 等. 窄线宽激光器线宽的非平衡光纤干涉仪测量法[J]. *中国激光*, 2011, 38(5): 0508005.
- [19] Yu Y L, Tan L, Li Q, et al. Influence of thermal

- effect caused by piezoelectric transducer on interferometric demodulation for fiber Bragg grating sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34 (5): 0506005.
- 余有龙, 谭玲, 李茜, 等. 压电陶瓷发热对光纤光栅传感信号干涉解调的影响 [J]. *光学学报*, 2014, 34 (5): 0506005.
- [20] Ronnekleiv E, Waagaard O H, Thingbo D, et al. Suppression of Rayleigh scattering noise in a TDM multiplexed interferometric sensor system[C]//OFC/NFOEC 2008 - 2008 Conference on Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference, February 24-28, 2008, San Diego, CA, USA. Washington, DC: OSA, 2008: OMT4.
- [21] Jiang P, Ma L N, Hu Z L, et al. An 8-TDM inline fiber Fabry-Perot sensor array based on ultra-weak fiber Bragg gratings [C]//Asia Communications and Photonics Conference 2015, November 19-23, 2015, Hong Kong, China. Washington, DC: OSA, 2015: AM1D.4.
- [22] 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.
- [23] Cai H W, Ye Q, Wang Z Y, et al. Distributed optical fiber acoustic sensing technology based on coherent Rayleigh scattering [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(5): 050001.
- 蔡海文, 叶青, 王照勇, 等. 基于相干瑞利散射的分布式光纤声波传感技术 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(5): 050001.
- [24] Liao Y B, Li M. *Fiber optics*[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 72-74.
- 廖延彪, 黎敏. *光纤光学*[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2013: 72-74.
- [25] Ma L N. *Fiber laser hydrophone* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010: 41-42.
- 马丽娜. *光纤激光水听器技术* [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010: 41-42.
- [26] Zhou S L. *Crosstalk suppression technology in optical fiber grating hydrophone arrays*[J]. *Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications*, 2016(3): 26-31.
- 周少玲. *光纤光栅水听器阵列串扰抑制技术* [J]. *光纤与电缆及其应用技术*, 2016(3): 26-31.