

## 光开关消光比对光纤检波器阵列串扰的影响

刘飞<sup>1</sup>, 周娴<sup>1</sup>, 张敏<sup>2,3</sup>

(1. 北京科技大学计算机与通信工程学院, 北京 100083; 2. 北京大学北京天然气水合物国际研究中心, 北京 100871;  
3. 北京大学东莞光电研究院, 广东 东莞 523808)

**摘要:** 光开关是时分复用光纤检波器阵列的重要器件, 对阵列串扰有着不可忽视的影响。在基于差分延时外差的解调方案下, 分析了光纤检波器阵列中串扰的来源, 推导了有限消光比下检波器所受串扰的表达式。通过仿真得到了在不同的阵列规模下, 光开关消光比与检波器串扰之间的关系, 即串扰基本随着光开关消光比增大而线性减小, 随着阵列规模增大而线性增大。实验中搭建了8基元的检波器阵列, 采用具有不同消光比的光开关(声光调制器和电光调制器)产生脉冲光信号, 验证了理论推导以及仿真结果的正确性。

**关键词:** 光纤检波器阵列; 时分复用; 消光比; 串扰

**中图分类号:** TP247; TN249

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.2096-3750.2022.00297

## Influence of the optical switch's extinction ratio on the crosstalk in fiber-optic seismometer array

LIU Fei<sup>1</sup>, ZHOU Xian<sup>1</sup>, ZHANG Min<sup>2,3</sup>

1. School of Computer and Communication Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China  
2. Beijing International Center for Gas Hydrate, Peking University, Beijing 100871, China  
3. Dongguan Institute of Opto-electronics, Peking University, Dongguan 523808, China

**Abstract:** Optical switch is one of the key components in the time-division multiplexing fiber-optic seismometer array and has significant influence on the crosstalk of the array. The source of crosstalk in the array was analyzed based on differential delay heterodyne demodulation scheme. The expression of crosstalk appearing in the seismometer's output was deduced with the limited extinction ratio. Via simulation, the relationship between the extinction ratio of optical switch and the seismometer's crosstalk was presented under different array scales, i.e. basically the crosstalk decreases linearly with the increase of optical switch's extinction ratio, and increases linearly with the increase of the array scale. Finally, an 8-element fiber-optic seismometer array was set up in the experiment, on which different optical switches (acousto-optic modulator and electro-optic modulator) owning distinct extinction ratios could be applied to generate pulse light. Experimental results verified the theoretical analysis as well as the simulation results.

**Key words:** fiber-optic seismometer array, time-division multiplexing, extinction ratio, crosstalk

### 0 引言

光纤检波器是一类采用光纤传感技术构成的传感器, 包括检测声音的光纤水听器<sup>[1-3]</sup>以及感受振

动信号的光纤加速度传感器<sup>[4-5]</sup>等。得益于光纤本身的特点以及所采用的干涉解调方法, 与同类型的电子检波器相比, 光纤检波器具备灵敏度高、抗电磁干扰、稳定性好等优势, 广泛应用于水声探测<sup>[1, 6]</sup>、

收稿日期: 2022-03-21; 修回日期: 2022-07-30

通信作者: 刘飞, lfei20@ustb.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.61905004); 中央高校基本科研业务费资助项目(No.FRF-TP-20-067A1Z)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.61905004), The Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.FRF-TP-20-067A1Z)

油气资源勘探开发<sup>[7-9]</sup>、周界安防<sup>[10]</sup>、灾害监测<sup>[11]</sup>等领域。

在实际应用中，为了降低系统成本，扩大声波或振动信号的检测范围，需要将多个检波器复用在一起，形成检波器阵列或者网络<sup>[12]</sup>。常用的复用方法包括空分复用 (SDM, spatial-division multiplexing)、波分复用 (WDM, wavelength-division multiplexing) 和时分复用 (TDM, time-division multiplexing) <sup>[13-14]</sup>等。而这其中又以时分复用的性价比最高，其采用光开关将连续光信号调制为脉冲光信号，阵列中不同的检波器返回的光脉冲信号时延不同，由此可以将各检波器的信号分别拾取出来<sup>[14]</sup>。在时分复用的基础上，再结合其他的复用手段，可以构成更大规模的检波器阵列或网络。

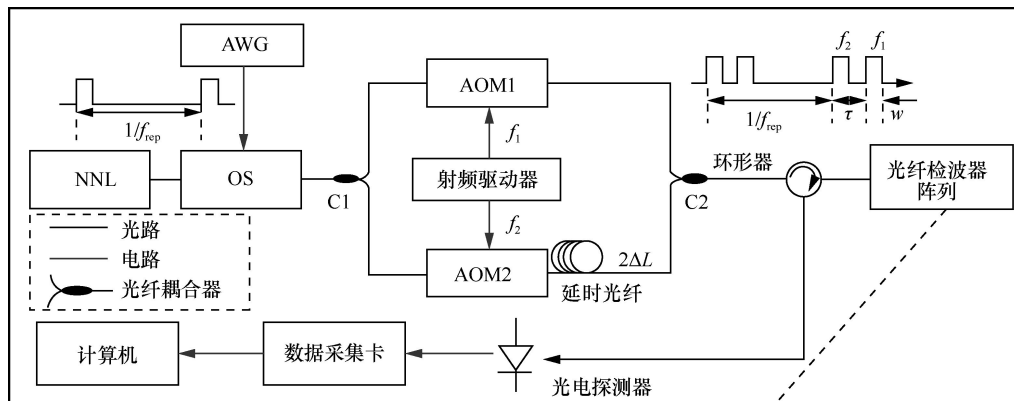
由于引入的光开关具备有限的消光比，即在开关关断期间仍有光信号泄露，因此阵列中某一个检波器所检测到的信号中也会混入其他检波器的信号，由此造成串扰<sup>[15]</sup>。已有的工作已经就阵列中的光电探测器电路带宽<sup>[16]</sup>、波分复用器<sup>[17]</sup>、光纤延时环<sup>[18]</sup>等因素引入的串扰进行了分析，但是阵列中光开关对串扰的影响还未被充分研究。

为了探究光开关对光纤检波器阵列串扰的影响，本文基于差分延时外差 (DDH, differential delay

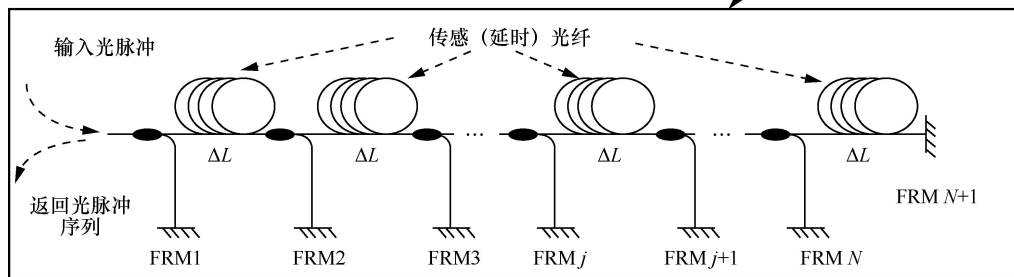
heterodyne) 的解调方案，分析了在有限消光比下检波器受到串扰的来源，并推导了其中任一检波器所受串扰的表达式。基于此，仿真给出了在不同的阵列规模下，串扰与光开关消光比的关系，同时在实验中予以验证。仿真和实验结果对在实际应用中光纤检波器阵列的光开关选取具有指导意义。

### 1 基于 DDH 的光纤检波器阵列

在光纤检波器系统中，需要特定的信号调制解调方案将各检波器接收到的信息恢复出来，比较常用的有相位生成载波 (PGC, phase-generated carrier) 方案<sup>[19]</sup>，3×3 耦合器方案<sup>[20]</sup>以及 DDH 方案<sup>[21]</sup>。与 PGC 等方案相比，DDH 方案具有动态范围大，对突变信号响应好等优势<sup>[8,22]</sup>，因此，本文采用 DDH 方案构建光纤检波器阵列，基于 DDH 的光纤检波器阵列结构如图 1 所示。窄线宽激光器 (NLL, narrow-linewidth laser) 发出的连续光被一个光开关 (OS, optical switch) 调制为重复频率为  $f_{rep}$ ，宽度为  $w$  的脉冲光。光开关的脉冲信号来自一个任意波形发生器 (AWG, arbitrary waveform generator)。此脉冲光经过 1 个 50:50 的光纤耦合器 C1 后被分为两路，分别被两个声光调制器 (AOM, acousto-optic modulator) 移频  $f_1$  和  $f_2$ 。这



(a) DDH调制解调整体框图



(b) 光纤检波器阵列光路结构

图 1 基于 DDH 的光纤检波器阵列结构

两个 AOM 被一个射频驱动器所驱动,  $f_1$  和  $f_2$  也由该射频驱动器确定。移频为  $f_2$  的脉冲光还经过一段长度为  $2\Delta L$  的延时光纤。这样, 再经过另一个光纤耦合器 C2 合束后, 就会产生如图 1(a)中所示的差分脉冲对, 其中, 时间在前的光脉冲移频量为  $f_1$ , 在后的移频量为  $f_2$ , 两个脉冲在时间上相差  $\tau$  ( $\tau=2n\Delta L/c$ ,  $n$  为光纤折射率,  $c$  为光速)。脉冲对的重复周期为  $f_{\text{rep}}$ 。

产生的差分延时脉冲对经过一个环形器后输入到一个光纤检波器阵列中, 其采用 in-line Michelson 结构将  $N$  个检波器时分复用在一起, 具有简单高效的优点<sup>[23]</sup>, 具体结构如图 1(b)所示。每个检波器由 1 个光纤耦合器, 两个法拉第旋镜 (FRM, Faraday rotator mirror) 和一段传感光纤构成, 光纤检波器阵列返回的光脉冲序列示意图如图 2 所示。由于每段传感光纤的长度均为  $\Delta L$ , 即 AOM2 之后延时光纤的一半, 因此相邻两个 FRM 反射的不同移频量的脉冲会叠加在一起形成干涉脉冲信号。例如, 对于第  $j$  个检波器, 第  $j$  个法拉第旋镜(FRM $_j$ )返回的移频量为  $f_2$  的光脉冲会和第  $j+1$  个法拉第旋镜(FRM $_{j+1}$ )返回的移频量为  $f_1$  的光脉冲重叠在一起, 产生一个干涉脉冲信号, 此脉冲干涉信号中所包含的相位信息与第  $j$  个检波器所检测到的信号相对应, 在理想情况下即第  $j$  段传感光纤所感受到的声波或振动信号。图 1(b)所示的光纤检波器阵列会返回  $N$  个脉冲干涉信号, 经过光电探测器转为电信号, 被数据采集卡接收转为数字信号, 最后由计算机进行分析处理。数据分析可以得到每个检波器所对应的不同延时参数<sup>[24]</sup>, 从而利用采用解时分算法恢复出每个检波器返回的干涉信号, 表示为

$$I(t) = I_0 \{1 + v \cos[2\pi\Delta f t + \delta\phi(t) + \delta\varphi]\} \quad (1)$$

其中,  $I_0$  为干涉信号的直流强度;  $v$  为干涉信号对比度, 在采用 FRM 作为光脉冲反射单元后,  $v$  可以保持在一个较高的数值(0.8~0.9);  $\Delta f$  为外差频率 (也

称载波频率), 等于脉冲对中两个脉冲移频量的差值, 即  $\Delta f = f_1 - f_2$ ;  $\delta\phi(t)$  为外界引入的相位差, 即检波器所要探测的信息;  $\delta\varphi$  为检波器干涉信号相位的直流分量, 受激光器频率漂移、外界温度波动等因素影响。

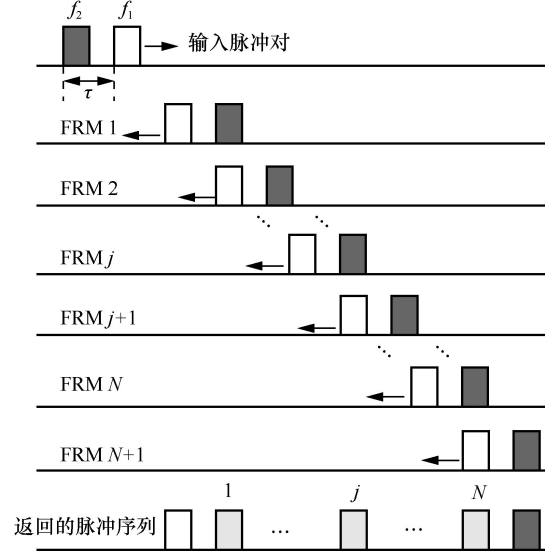


图 2 光纤检波器阵列返回的光脉冲序列示意图

式(1)中的相位差信息  $\delta\phi(t)$  可以采用正交解调算法恢复, 干涉信号解调流程如图 3 所示。首先, 干涉信号与载波的同相分量( $\cos(2\pi\Delta f_c t)$ )和正交分量( $\sin(2\pi\Delta f_c t)$ )进行混频, 然后, 混频后的信号经过一个低通滤波器 (LPF, low-pass filter), 滤除高于载波频率  $\Delta f$  的信号, 即可得到相位信息的同相分量  $i(t)$  和正交分量  $q(t)$ 。通过相除反正切和解卷绕算法可以计算得到式(1)中的相位信息。其中包含  $\delta\phi(t)$  和  $\delta\varphi$  两项, 可以再经过滑动平均 (MA, moving average) 去除直流相位差  $\delta\varphi$  的影响, 仅保留与待检测信号相关的相位差  $\delta\phi(t)$ 。

## 2 消光比对串扰影响的分析

### 2.1 串扰的定义

假设第  $l$  个检波器的传感光纤感受到外部声音或振动, 引起该检波器的相位差出现相应的变化。由于串扰分析往往在频域进行, 为了使得信号的频

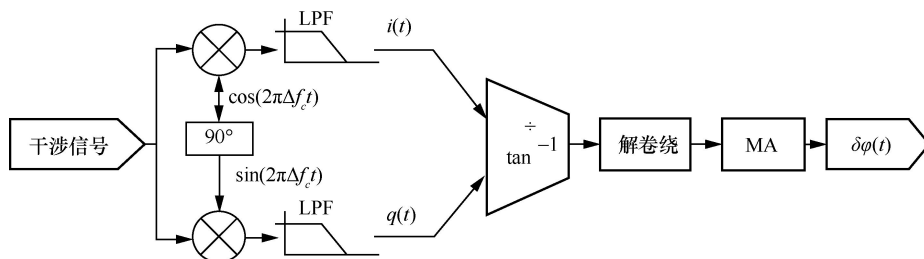


图 3 干涉信号解调流程

谱尽可能简单以简化分析, 可以假设检波器的相位差呈余弦变化 (或正弦变化)<sup>[18]</sup>, 即

$$\delta\phi_l(t) = D \cos(2\pi f_{\text{sig}} t) \quad (2)$$

其中,  $f_{\text{sig}}$  为所加信号频率,  $D$  为信号作用在该检波器上所产生的相位差变化的幅度。在理想情况下, 如果阵列中其他检波器未受到外部声波或振动影响, 其输出的相位差变化为 0。但是在实际中应为  $D_j \cos(2\pi f_{\text{sig}} t)$ 。定义第  $j$  个检波器受到第  $l$  个检波器的串扰为

$$\text{CR}_{j-l} = 20 \lg \left( \frac{D_j}{D} \right) \quad (3)$$

## 2.2 有限消光比造成的串扰

造成串扰的因素有很多, 如电路带宽<sup>[16]</sup>、波分复用器<sup>[17]</sup>等。这里我们主要考虑系统中光开关 (图 1(a) 的 OS) 有限消光比所引起的串扰。假设光开关在打开和关断时通过的光功率分别为  $A_{\text{on}}$  和  $A_{\text{off}}$ , 则可光开关的消光比 (ER, extinction ratio) 可表示为

$$\text{ER} = 10 \lg \left( \frac{A_{\text{on}}}{A_{\text{off}}} \right) \quad (4)$$

在时分复用阵列中, 串扰分为强度迭加串扰和相干迭加串扰两种<sup>[25]</sup>。由于系统中采用的是窄线宽光源, 其相干长度较长, 因此这里以相干迭加串扰为主。假设在某一检波器上施加一定的外部信号, 此时考察另一个检波器 (记为第  $j$  个检波器) 的光场复振幅为

$$E_j = E_b^j + E_a^{j+1} + \sum_{k=1, k \neq j}^{N+1} E_b^k + \sum_{k=1, k \neq j+1}^{N+1} E_a^k \quad (5)$$

其中,  $E_a^k$  ( $E_b^k$ ) 表示从第  $k$  个 FRM 返回的光频移为  $f_1$  ( $f_2$ ) 的光场复振幅, 式(5)中各项的表达式分别为

$$\begin{aligned} E_a^j &= \sqrt{A_{\text{on}}} \exp\{i[2\pi(f_0 + f_1)t + \varphi_a^j]\} \\ E_b^j &= \sqrt{A_{\text{on}}} \exp\{i[2\pi(f_0 + f_2)t + \varphi_b^j]\} \\ E_a^k &= \sqrt{A_{\text{off}}} \exp\{i[2\pi(f_0 + f_1)t + \phi_a^k(t) + \varphi_a^k]\} \\ E_b^k &= \sqrt{A_{\text{off}}} \exp\{i[2\pi(f_0 + f_2)t + \phi_b^k(t) + \varphi_b^k]\} \end{aligned} \quad (6)$$

其中,  $f_0$  为窄线宽激光器发出的连续光波的频率;

$\phi_a^k(t)$  ( $\phi_b^k(t)$ ) 为当有外界信号作用时, 第  $k$  个 FRM 返回的频移量为  $f_1$  ( $f_2$ ) 的光波中所携带的相位信息;  $\varphi_a^k$  ( $\varphi_b^k$ ) 为第  $k$  个 FRM 返回的频移量为  $f_1$  ( $f_2$ ) 光波的直流相位, 受激光器频率漂移、检波器所处的环境等因素影响, 是个随机变量。在串扰分析中, 考察当外部信号施加在其他检波器上时, 第  $j$  个检波器受到的串扰 (此时其不受外界信号作用), 因此式(6)中  $E_a^j$  和  $E_b^j$  的相位项中并不包含  $\phi_a^k(t)$  或  $\phi_b^k(t)$ 。由于在 DDH 方案中, 采取正交解调算法求取的干涉信号相位差信号与干涉信号的强度无关, 因此式(6)暂时忽略了光纤连接、耦合器等对光场复振幅幅度的影响。

由式(6)可以得到在光开关有限消光比下, 第  $j$  个检波器的  $\delta\phi_j(t)$  干涉信号光强为

$$I_j = E_j E_j^* \approx P_j + P_{c1} + P_{c2} + P_{c3} + P_{c4} \quad (7)$$

式(7)忽略了两束光均在光开关关断情况下产生的干涉信号 (由于关断情况下光场幅度较弱, 相互干涉产生的光强相对其他几项可以看作是一个二阶小量)。  $P_j$  为无串扰下的光强,  $P_{c1} \sim P_{c4}$  为由串扰产生的光强, 分别表示为

$$\begin{aligned} P_j &= 2A_{\text{on}} + 2A_{\text{on}} \cos[2\pi f_c t + \varphi_b^j - \varphi_a^{j+1}] \\ P_{c1} &= 2 \times 10^{-\text{ER}/20} A_{\text{on}} \sum_{k=1, k \neq j}^{N+1} \cos[\phi_a^k(t) + \varphi_a^k - \varphi_a^{j+1}] \\ P_{c2} &= 2 \times 10^{-\text{ER}/20} A_{\text{on}} \sum_{k=1, k \neq j}^{N+1} \cos[2\pi f_c t + \phi_a^k(t) + \varphi_a^k - \varphi_b^j] \\ P_{c3} &= 2 \times 10^{-\text{ER}/20} A_{\text{on}} \sum_{k=1, k \neq j+1}^{N+1} \cos[\phi_b^k(t) + \varphi_b^k - \varphi_b^j] \\ P_{c4} &= 2 \times 10^{-\text{ER}/20} A_{\text{on}} \sum_{k=1, k \neq j+1}^{N+1} \cos[2\pi f_c t + \phi_b^k(t) + \varphi_b^k - \varphi_a^{j+1}] \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)的推导运用了式(4)关于消光比的定义。利用如图 3 所示的正交解调算法, 可以得到此时第  $j$  个检波器的输出为

$$\delta\phi_j(t) = \arctan \frac{\sin(\delta\phi_{1j}) - 10^{-\text{ER}/20} \sum_{k=1, k \neq j+1}^{N+1} \sin[\phi_a^k(t) + \delta\varphi_{2k}] + 10^{-\text{ER}/20} \sum_{k=1, k \neq j}^{N+1} \sin[\phi_b^k(t) + \delta\varphi_{3k}]}{\cos(\delta\phi_{1j}) + 10^{-\text{ER}/20} \sum_{k=1, k \neq j+1}^{N+1} \cos[\phi_a^k(t) + \delta\varphi_{2k}] + 10^{-\text{ER}/20} \sum_{k=1, k \neq j}^{N+1} \cos[\phi_b^k(t) + \delta\varphi_{3k}]} \quad (9)$$

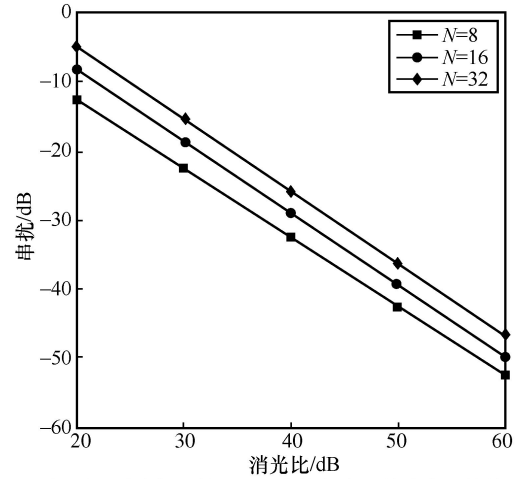
其中,  $\delta\varphi_{1j} = \varphi_b^j - \varphi_a^{j+1}$ ,  $\delta\varphi_{2k} = \varphi_a^k - \varphi_b^j$ ,  $\delta\varphi_{3k} = \varphi_b^k - \varphi_a^{j+1}$ 。从式(9)可以看出第  $j$  个检波器所受的串扰与消光比和时分复用的数目  $N$  有关。一般检波器由于串扰所造成的信号幅度较小, 需要通过频谱分析得到特定频率  $f_{\text{sig}}$  处的幅度  $D_j$ , 再利用式(3)即可计算出此时第  $j$  个检波器所受串扰的大小。注意这里推导得到的结果均假定信号没有加载在第  $j$  个检波器上, 其有被施加外部信号, 仍考虑其对其他检波器产生的串扰情况, 只需要将式(9)中变量的下标或上标中的“ $j$ ”和“ $k$ ”互换即可。

### 3 仿真分析

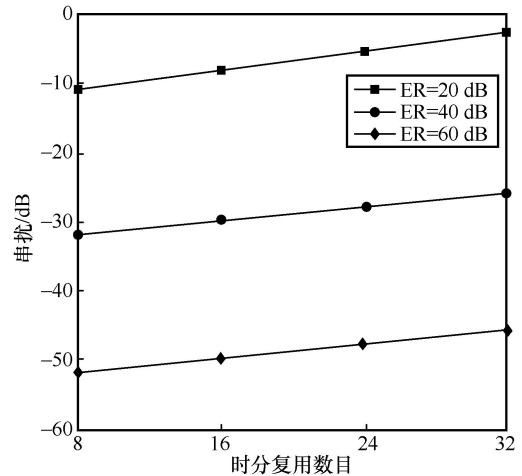
以式(9)为基础, 采用 MATLAB 作为仿真平台, 消光比、时分复用数目与阵列串扰的关系如图 4 所示。设置外界信号作用后引入的相位变化幅度  $D=1$  rad, 频率  $f_{\text{sig}}=160$  Hz。这里考虑串扰最大的一种情形: 将信号加在第 1 个检波器上, 即图 1(b)中第 1 段传感光纤上, 考察第 2 个检波器所受到的串扰情况, 此时第 2~ $N+1$  个 FRM 返回光信号电场的相位中都会携带有加载在第 1 段传感光纤上的信号, 并且会混入到第 2 个检波器的光场中。由于干涉信号中直流相位存在随机的慢漂, 仿真中设置  $\delta\varphi_{1j}$ ,  $\delta\varphi_{2k}$ ,  $\delta\varphi_{3k}$  服从  $[0, 2\pi)$  的均匀分布。为了尽量贴近实际, 在仿真中设置时分复用的数目为 8~32<sup>[14]</sup>, 而消光比则设置在 20~60 dB (20 dB 为电光调制器的典型消光比, 60 dB 为声光调制器的典型消光比)。第一种情况下, 考虑时分复用数目分别为 8、16、32 共 3 种情况, 消光比从 20 dB 开始以 5 dB 的间隔增大到 60 dB。每次仿真进行 1 000 次, 取每次仿真得到的串扰平均值作为该点处的最终仿真结果, 如图 4(a)中的各点所示, 可以看出, 随着 ER 的增加, 串扰基本上呈现线性下降, 图 4(a)也给出了对应的线性拟合直线。对于检波器阵列来说, 一般要求其串扰低于 -40 dB<sup>[26-27]</sup>, 则对于 8 时分的阵列, 要求光开关的 ER 高于 48 dB; 对于 16 时分的阵列, 要求 ER 高于 51 dB; 对于 32 时分的阵列, 则要求 ER 高于 54 dB。

同理, 针对消光比为 20 dB、40 dB 和 60 dB 的 3 种情形, 仿真了串扰随时分复用数目  $N$  的变化关系, 仿真中  $N$  从 8 按间隔为 4 增加到 32, 其余设置与前述相同。仿真结果如图 4(b)所示, 可以看出, 随着复用数目的增加, 串扰整体上呈现逐渐增加的

趋势, ER 为 20 dB 或 40 dB 时难以满足串扰低于 -40 dB 的要求; 若 ER 达到 60 dB, 即使是在  $N=32$  也能使串扰低于 -45 dB。



(a) 不同时分复用数目下, 串扰与光开关消光比的关系



(b) 不同消光比下, 串扰与时分复用数目的关系

图 4 消光比、时分复用数目与阵列串扰的关系

根据上述仿真分析, 可以看出, 针对一定串扰水平的要求, 需要结合时分复用的数目合理地确定光开关的消光比。反之, 若光开关消光比确定, 则对时分复用数目也有一定的限制。例如, 若希望阵列达到低于 -40 dB 的串扰水平, 对于时分复用数目为 32 的系统, 则要求光开关的消光比达到 54 dB 以上。

### 4 实验验证

按照图 1 中的结构, 搭建了实验系统。NLL 采用 NKT E15 系列光纤激光器, 其线宽  $< 1$  kHz<sup>[28-29]</sup>。两个 AOM 的移频量分别为  $f_1=100$  MHz,  $f_2=100.05$  MHz<sup>[30]</sup>。AOM2 之后的延时光纤长度为

40 m, 即脉冲对之间的时间间隔约为 200 ns。光纤检波器阵列为 1 个 8 时分的光纤水听器阵列, 其中的传感光纤长度均约为 20 m。光电探测器为 Thorlabs 公司的 PDB570C。数据采集卡的采样频率为 100 MSPS, 量化位数为 16 bit。为了与仿真中保持一致, 将第 1 段传感光纤缠绕在 1 个压电陶瓷上, 并使用信号发生器产生正弦信号作用在该压电陶瓷上, 来模拟外界施加在检波器上声音信号。作用在压电陶瓷上的信号频率为 160 Hz, 信号峰峰值为 1 V。

为了探究消光比对信号串扰的影响, 这里使用了两种不同的光开关, 分别是声光调制器 (Brimrose AMM-100-20-25-2FP) 和电光调制器 (Thorlabs LN81S-FC), 前者的消光比为 60 dB, 后者为 20 dB。8 时分光纤检波器阵列中第 1 个检波器和第 2 个检波器解调所得到的功率谱密度 (PSD, power spectrum density) 曲线如图 5 所示, 此曲线为 10min 内数据的平均值, 以此来降低直流相位慢漂对串扰数值的随机影响。其中, 图 5(a) 为采用声光调制器获得的数据, 其中灰色点划线为第 1 个检波器解调得到的 PSD 曲线, 可以看到在所加信号频率 160 Hz 处存在一个较强的峰值, 在 160 Hz 的倍频处也能看到一系列谱线, 但是幅度要低至少 40 dB, 这些是所加信号的谐波分量, 在此不予考虑。黑色实线为第 2 个检波器解调得到的 PSD 曲线, 位于信号频率 160 Hz 处的谱线峰值有明显降低。图 5(a) 中的插图是信号频率 160 Hz 处的放大图。可以看到第 1 个检波器的 PSD 曲线在 160 Hz 处的强度为 10.04 dB ref rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$ , 而第 2 个检波器为 -41.66 dB, 则第 2 个检波器所受的串扰为 -51.7 dB, 与仿真中预测的 -52 dB 相接近。

类似的, 图 5(b) 给出了在采用电光调制后的第 1 个和第 2 个检波器解调得到的 PSD 曲线图, 从图 5(b) 中的插图可以看到, 此时第 1 个检波器信号 PSD 在 160 Hz 处的强度为 9.95 dB, 与图 5(a) 采用声光调制器的结果相差不大。而第 2 个检波器在此频率处的峰值上升为 -2.15 dB, 说明此时第 2 个检波器所受的串扰相较于采用声光调制器作为光开关时增大了。计算结果表明, 第 2 个检波器所受的串扰为 -12.1 dB, 与仿真中预测的 -13 dB 相接近, 比采用声光调制器的情况增大了约 39.6 dB。说明采用消光比高的器件作为光开关, 可以降低检波器阵列中检波器所受的串扰水平。

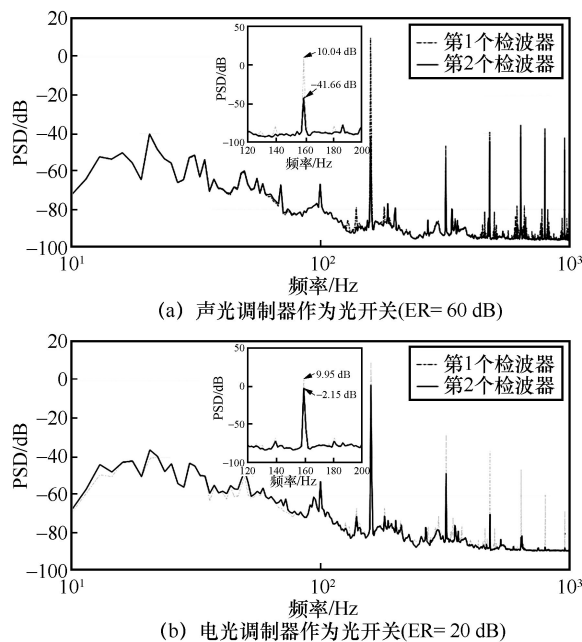


图 5 8 时分光纤检波器阵列中第 1 个检波器和第 2 个检波器解调所得到的 PSD 曲线

## 5 结束语

在时分复用光纤检波器阵列中, 单个检波器所受到的串扰与系统中所采用的光开关的消光比有关。在基于差分延时外差的解调方案下, 分析了有限消光比所引起的串扰, 并给出了具体的表达式。在外加信号为单频正弦的情形下, 仿真分析了阵列中某一检波器所受串扰的大小。结果表明, 串扰水平基本与光开关的消光比呈线性关系, 此外也与阵列规模呈线性关系。最后, 搭建了一个 8 时分的光纤检波器系统, 分别采用高消光比 (60 dB) 的声光调制器和低消光比的电光调制器 (20 dB) 作为光开关, 将信号施加在第 1 个检波器上, 分析了第 2 个检波器所受串扰的大小。实验结果基本与仿真分析相吻合, 验证了所提出理论的正确性。所提出的分析方法以及仿真和实验结果为检波器阵列中光开关消光比的选择提供了指导, 以满足在不同的阵列规模下的串扰水平要求。

## 参考文献:

- [1] MENG Z, CHEN W, WANG J F, et al. Recent progress in fiber-optic hydrophones[J]. *Photonic Sensors*, 2021, 11(1): 109-122.
- [2] CULSHAW B, KERSEY A. Fiber-optic sensing: a historical perspective[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(9): 1064-1078.
- [3] BUCARO J A, DARDY H D, CAROME E F. Fiber-optic hydrophone[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1977, 62(5): 1302-1304.
- [4] GARDNER D, HOFER T, BAKER S, et al. A fiber-optic interfero-

- metric seismometer[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1987, 5(7): 953-960.
- [5] LIU F, YI D, CHEN Y, et al. Common-mode noise self-suppressed 3-component fiber optic accelerometer based on low-reflectivity Bragg gratings[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(7): 1596-1599.
- [6] LI D M, GU M X, HU J F, et al. High sensitivity and fine diameter fiber optical hydrophone for towed array sonar[C]//*Proceedings of 2020 International Conference on Sensing, Diagnostics, Prognostics, and Control (SDPC)*. Piscataway: IEEE Press, 2020: 60-63.
- [7] 郝小柱, 张汉泉, 韦成龙, 等. 光纤水听器阵列应用于海洋地震勘探的试验[J]. *热带海洋学报*, 2018, 37(3): 93-98.  
HAO X Z, ZHANG H Q, WEI C L, et al. Sea trial for fiber-optic hydrophone array used in marine geophysical exploration[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2018, 37(3): 93-98.
- [8] DE FREITAS J M. Recent developments in seismic seabed oil reservoir monitoring applications using fibre-optic sensing networks[J]. *Measurement Science and Technology*, 2011, 22(5): 052001.
- [9] KRINGLEBOTN J T, NAKSTAD H, ERIKSRUD M. Fibre optic ocean bottom seismic cable system: from innovation to commercial success[C]//*ProcSPIE7503*, 2009, 7503: 1129-1132.
- [10] LI X L, SUN Q Z, SUNZ F, et al. Hybrid TDM/WDM based fiber-optic sensor network for perimeter intrusion detection[C]//*ProcSPIE7753*, 2011, 7753: 444-447.
- [11] HUANG W Z, ZHANG W T, HUANG J T, et al. Demonstration of multi-channel fiber optic interrogator based on time-division locking technique in subway intrusion detection[J]. *Optics Express*, 2020, 28(8): 11472.
- [12] PEREZ-HERRERA R A, LOPEZ-AMO M. Fiber optic sensor networks[J]. *Optical Fiber Technology*, 2013, 19(6): 689-699.
- [13] NASH P, STRUDLEY A, CRICKMORE R, et al. High efficiency TDM/WDM architectures for seismic reservoir monitoring[C]//*ProcSPIE7503*, 2009, 7503: 1125-1128.
- [14] CRANCH G A, NASH P J. Large-scale multiplexing of interferometric fiber-optic sensors using TDM and DWDM[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2001, 19(5): 687-699.
- [15] 李舰艇. 光纤水听器多路复用技术及其串扰与噪声分析[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005.  
LI J T. Analyses of crosstalks and noises in multiplexing arrays of fiber optic hydrophones[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005.
- [16] 杨春, 张华勇, 张敏, 等. 光纤水听器时分复用检测电路带宽与串扰分析[J]. *光电工程*, 2010, 37(7): 75-80.  
YANG C, ZHANG H Y, ZHANG M, et al. The bandwidth and crosstalk analysis of detection circuit in time-division multiplexing of fiber-optic hydrophone[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(7): 75-80.
- [17] XIAO H, LI F, LIU Y L. Crosstalk analysis of a fiber laser sensor array system based on digital phase-generated carrier scheme[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(10): 1249-1255.
- [18] DE FREITAS J M. Optical crosstalk and performance in time division multiplexed derivative sensing techniques[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(18): 10615-10624.
- [19] HOU C B, ZHANG J, YUAN Y G, et al. Reliability demodulation algorithm design for phase generated carrier signal[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2022, 71(1): 127-138.
- [20] WANG M Y, WANG J F, ZHANG Y C, et al. Research on 3×3 coupler photoelectric detecting technology based on light source modulation in fiber optic hydrophone[C]//*SPIE/COS Photonics Asia. Proc SPIE 11554, Advanced Sensor Systems and Applications X, OnlineOnly*. 2020, 11554: 245-253.
- [21] LIU F, XIE S R, GU L J, et al. Common-mode noise suppression technique in interferometric fiber-optic sensors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(21): 5619-5627.
- [22] LIU F, XIE S R, QIU X K, et al. Efficient common-mode noise suppression for fiber-optic interferometric sensor using heterodyne demodulation[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(23): 5453-5461.
- [23] KIRKENDALL C K, DANDRIDGE A. Overview of high performance fibre-optic sensing[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2004, 37(18): R197-R216.
- [24] LIU F, QIU X K, XIE B, et al. A new measurement scheme for delay parameters in TDM fiber optic interferometric sensor network[C]//*ProcSPIE10323*, 2017, 10323: 263-266.
- [25] 祝贞凤. 基于光纤水听器阵列的高速时分复用系统研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2004.  
ZHU Z F. Research on high-speed time-division multiplexing system based on fiber-optic hydrophone array[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2004.
- [26] DANDRIDGE A, TVETEN A, KERSEY A, et al. Multiplexing of interferometric sensors using phase carrier techniques[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1987, 5(7): 947-952.
- [27] WAAGAARD O H, RØNNEKLEIV E, FORBORD S, et al. Reduction of crosstalk in inline sensor arrays using inverse scattering[C]//*Proceedings of 19th International Conference on Optical Fibre Sensors. SPIE*, 2008, 7004: 705-708.
- [28] LI H, ZHANG W, HUANG W, et al. Design of low frequency fiber optic Fabry-Perot seismometer based on transfer function analysis[J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(5): 051201.
- [29] ZHANF J, WU H, ZHENG H, et al. 80 km fading free phase-sensitive reflectometry based on multi-carrier NLFM pulse without distributed amplification[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(18): 4748-4754.
- [30] LIU F, XIE S, ZHANG M, et al. Downhole micro seismic monitoring using time-division multiplexed fiber-optic accelerometer array[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 120104-120113.

#### [作者简介]



刘飞(1990—), 男, 博士, 北京科技大学讲师, 主要研究方向为光纤传感器及其解调方法等。



周娴(1982—), 女, 北京科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为光纤通信、光纤传感等。



张敏(1971—), 男, 北京大学副研究员, 主要研究方向为光纤传感、痕量气体探测、水合物储层监测等。