

文章编号: 0253-2239(2008)03-0560-05

主动相位偏置折叠型萨尼亚克光纤传感阵列 时分复用技术

宋章启 阳明晔 张学亮 王鑫 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 针对折叠结构萨尼亚克(Sagnac)光纤传感阵列存在噪声光与信号光混叠的问题,提出了一种主动相位偏置时分复用方案。在传统梯形结构传感阵列的基础上,通过调整总线光纤的长度关系和附加延迟光纤的方法,使噪声光和信号光依次交替返回而不会发生混叠。进一步分析表明,通过调整延迟光纤环的长度,可以使输入光脉冲的重复频率达到标准时分复用系统重复频率的二分之一。整个阵列的相位偏置由一个与输入光脉冲同步的相位调制信号驱动集成光学芯片实现。实验演示了一个两基元的传感阵列,最小时间间隔为 331.25 ns,输入光脉冲重复频率可达 754.727 kHz,在 5 kHz 处相位灵敏度为 $7.3 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$,探头间串扰约为 -51.75 dB 。

关键词 光纤光学; 萨尼亚克干涉仪; 传感阵列; 时分复用

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

Time-Division-Multiplexing Scheme of the Folded Sagnac Sensor Array with Active Phase Bias

Song Zhangqi Yang Mingye Zhang Xueliang Wang Xin Hu Yongming

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

Abstract To avoid the overlapping of signal and noise pulses in the folded Sagnac fiber sensor array (FSSA), a time-division-multiplexing (TDM) scheme with active phase bias is proposed. Noise pulses and signal pulses are controlled to return alternately, just by adjusting the length of the bus fiber of traditional sensor array with ladder structure and adding a section of delay fiber at one end of the Sagnac interferometer. Analysis shows the input pulse repetition rate can reach half of the standard TDM scheme when the length of the delay coil is appropriate. The phase bias of the sensor array is realized through an integrated optical chip (IOC) driven by a pulse signal synchronizing with the input optical pulse. A two-sensor-array with this structure is demonstrated experimentally, and the input optical pulse repetition is rate 754.727 kHz. The phase sensitivity is about $7.3 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ at 5 kHz, and the crosstalk between two sensors is measured to be about -51.75 dB .

Key words fiber optics; Sagnac interferometer; sensor array; time division multiplexing

1 引言

干涉型光纤传感阵列技术在光纤水听器等领域得到了充分发展,目前比较成熟的阵列技术主要是基于马赫-曾德尔干涉仪和迈克耳孙干涉仪^[1~3]。近几年来,萨尼亚克(Sagnac)干涉仪用于声信号传感的优势^[4,5]已经得到充分认识,基于萨尼亚克干

涉仪的光纤传感阵列也被提出并进行了研究^[6~8]。但是,为提高对低频信号的响应,萨尼亚克干涉仪中需要一段长约数公里的延迟光纤,这段光纤的拾音会影响整个系统的性能。为了抑制延迟光纤的拾音影响,一种折叠结构的萨尼亚克干涉仪被提出,并取得了很好的效果。但是,会产生噪声光路,为避免信

收稿日期: 2007-06-06; 收到修改稿日期: 2007-08-09

作者简介: 宋章启(1973—),男,江苏人,博士研究生,讲师,主要从事光纤传感技术方面的研究。

E-mail: songzhangqi@126.com

导师简介: 胡永明(1960—),男,云南人,教授,博士生导师,主要从事光纤传感技术方面的研究。

E-mail: ssds@21cn.com

号光与噪声光的混叠,阵列结构必须进行重新设计。一种方法是在光纤环的一端增加一段附加延迟光纤,虽然可以解决上述问题,但是要使输入光脉冲重复频率降到标准时分复用(TDM)重复频率的三分之一^[9]。另一种方法是基于偏振的折叠结构^[10],可以解决噪声光路对信号的影响,且不用降低输入光脉冲的重复频率,但是法拉第旋转镜和偏振分束等器件的非理想因素,会降低信号光与噪声光的隔离度。同时,为提供稳定的相位偏置必须采用大量分立器件,导致系统结构十分复杂,光路插入损耗巨大。

本文针对折叠结构的萨尼亚克光纤传感阵列提出了一种主动相位偏置时分复用方案。通过调整总线光纤的长度关系和附加延迟光纤的方法,使噪声光和信号光依次交替返回,实现了噪声光和信号光的有效分离,其最高输入光脉冲的重复频率可达到标准时分复用系统重复频率的二分之一。而系统的相位偏置通过多功能集成光学芯片(IOC)容易实现。

2 系统结构与时序分析

2.1 系统结构

图1为折叠型萨尼亚克光纤传感阵列时分复用系统,阵列包含 n 个传感探头 S_1, S_2, \dots, S_n ,它们共用一个延迟光纤环(Delay coil),形成 n 个萨尼亚克环。从宽谱光源发出的光,经隔离器(Isolator)进入光强度调制器(IM),由信号发生器发出的强度调制信号控制强度调制器输出宽度为 T_p 的光脉冲,重

复频率为 $1/T_R$ 。光脉冲通过环行器(Circulator)进入集成光学芯片。集成光学芯片是由铌酸锂材料制成的Y形分支波导,这种波导结构相当于一个 1×2 的分束器,可以将从公共端进入的光脉冲均分为两束,分别从a、h端输出。同时在集成光学芯片两个分支波导的两侧分别镀有电极,利用铌酸锂材料的电光效应形成推挽调制的波导相位调整器。由于相位调制信号的存在,使经过这两个分支波导的光脉冲感受不同的折射率,从a、h端输出时两个光脉冲之间就会产生一定的相位差。改变相位调制信号幅度,相位差可在 $0 \sim 2\pi$ 之间任意取值。从a端进入的光脉冲,沿顺时针方向先后通过退偏器(Depolarizer)、附加延迟光纤(Added delay fiber)和延迟光纤环,然后耦合进 n 个探头。由于通过各个探头的时间延迟不同,到达h端时形成 n 个光脉冲,与沿逆时针光路传输形成的 n 个脉冲在集成光学芯片的公共端分别发生干涉,形成 n 个信号光脉冲,分别携带 n 个探头的信息。这 n 个信号光脉冲,从环行器端口3输出,进入探测器形成电信号。整个光路采用单模光纤,为了抑制偏振引起的信号衰落,在光纤环的a端插入了一个光纤Loyt退偏器。当光脉冲经过延迟光纤环时,由于反射镜的存在,光在延迟光纤环中往返传输两次,与传统萨尼亚克干涉仪相比节约了一半的延迟光纤,这就是所谓折叠结构萨尼亚克干涉仪。该结构的主要优点是可有效抑制延迟光纤的拾音问题,但是会产生噪声光路。

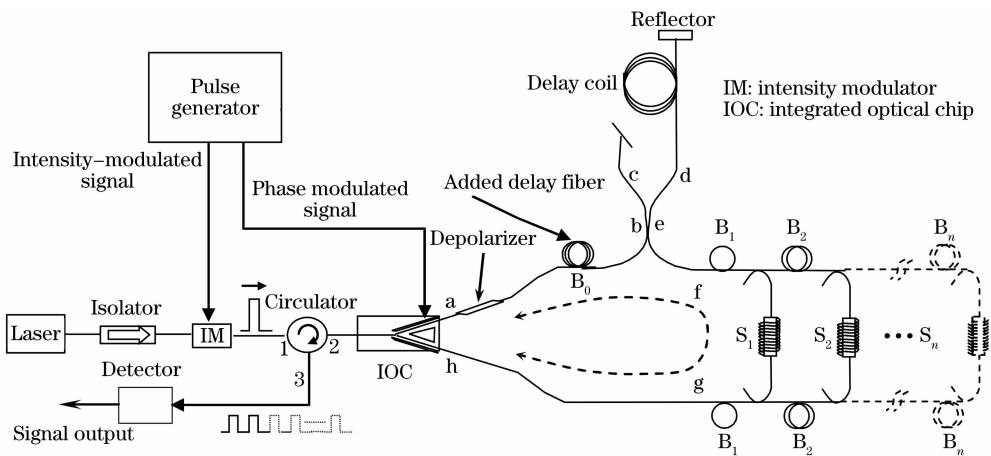


图1 折叠结构萨尼亚克光纤传感阵列结构

Fig. 1 Schematic diagram of a sensor array based on folded Sagnac interferometer

2.2 信号光与噪声光分离

设光脉冲经过a-b之间光纤产生的时延为 T_{ab} ,经过e-f和g-h两段光纤产生的时间延迟分别为 T_{ef}, T_{gh} ,在延迟光纤环内往返传输产生的时间

延迟为 2τ 。传感阵列采用传统的梯形结构,但总线光纤设计与传统梯形结构不同。在探头 S_1 的两端分别增加了一段总线光纤 B_1 ,光经过 B_1 产生的时延为 $\Delta T/2$,而经过总线光纤 B_2, B_3, \dots, B_n 所产生的时延

均为 ΔT , 光经过每个探头产生的时延为 T_s , 这样经过探头 S_i 的光脉冲在 f 和 g 之间传输一次产生的时间延迟为 $(2i-1)\Delta T + T_s (i=1, 2, \dots, n)$ 。而信号光脉冲在光纤环内传输一次产生的时间延迟为

$$T_s^i = 2\tau + T_{ab} + T_s + T_{ef} + T_{gh} + (2i-1)\Delta T, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

由于折叠结构的引入会产生两类噪声光: 一类是从 a 端出射的噪声光, 它所经历的光路为 $a-b-d-b-a$, 它没有经过任何探头, 只有一个返回脉冲, 其时延为

$$T_n^0 = 2\tau + 2T_{ab}, \quad (2)$$

另一类是从 h 端出射的噪声光, 共有 n^2 个返回脉冲, 它们所经历的光路为 $h-g-S_i-f-e-d-e-f-S_j-g-h$, 它经过探头 S_i 和 S_j 。这 n^2 个脉冲从时间延迟上可分成 $2n-1$ 组, 每组的时间延迟为

$$T_n^j = 2\tau + 2T_s + 2T_{ef} + 2T_{gh} + 2j\Delta T, \quad j = 1, 2, \dots, 2n-1 \quad (3)$$

由于返回的噪声光脉冲数量较多, 光功率可以与信号光脉冲相比拟, 因此必须小心设计整个光路, 避免噪声光脉冲与信号光脉冲发生混叠, 影响系统性能。

调整附加延迟光纤 B_0 的长度, 使得 $T_{ab} = T_s + T_{ef} + T_{gh}$, 这样噪声光与信号光返回的时间延迟可以统一写为

$$T_s^i = 2\tau + 2T_{ab} + (2i-1)\Delta T, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$T_n^j = 2\tau + 2T_{ab} + 2j\Delta T, \quad j = 0, 2, \dots, 2n-1 \quad (5)$$

从(4)式、(5)式可以看出, 所有返回的光脉冲经过共同时间延迟 $2\tau + 2T_{ab}$ 后, 噪声脉冲与信号脉冲交替出现, 间隔时间为 ΔT 。图 2(c) 显示了一个输入光脉冲通过一个包含 6 个基元的折叠结构萨尼亚克光纤传感阵列后产生的光脉冲系列。只要光脉冲宽度 $T_p < \Delta T$, 它们就不会混叠。

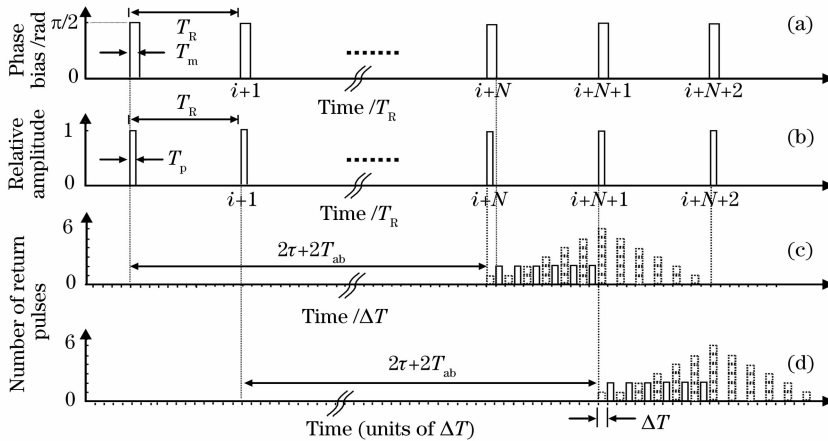


图 2 相位调制信号与输入光脉冲, 输出光脉冲的时序关系(6 个传感头)。(a) 相位调制信号 (b) 输入光脉冲, (c) 第 i 个输入光脉冲的返回光脉冲序列, (d) 第 $i+1$ 个输入光脉冲的返回光脉冲序列

Fig. 2 Temporal relationship between the waveform of phase modulator and input, output optical pulses (6 sensors).

(a) Phase modulation waveform, (b) input pulses, (c) return pulse train of the i^{th} input pulse, (d) return pulse train of the $i+1^{\text{th}}$ input pulse

2.3 脉冲重复频率

从上面的分析可以知道, 系统注入一个光脉冲, 返回的光脉冲要经历 $(4n-2)\Delta T + T_p$ 。如果要等到最后一个噪声光脉冲结束后, 下一个光脉冲序列才能返回, 那么整个阵列的输入脉冲的重复频率约为标准时分复用系统重复频率的四分之一, 显然浪费了系统的复用资源。

从图 2(c) 可以发现, 在一个返回光脉冲系列期间, 第 n 个信号光脉冲结束后还有 n 个时间窗口没有任何光脉冲, 将这些窗口加以利用, 则可以提高输入光脉冲的重复频率。具体做法是使相邻两个输入光脉冲之间的时间间隔 T_R 应满足

$$NT_R = 2\tau + 2T_{ab}, \quad (N = 1, 2, \dots) \quad (6)$$

$$T_R = 2n\Delta T, \quad (7)$$

由于(5)式可得第 i 个输入光脉冲的返回光脉冲系列中, 第 n 个噪声光脉冲的返回时间为

$$iT_R + 2\tau + 2T_{ab} + 2n\Delta T = (i+N+1)T_R$$

第 $i+1$ 个输入光脉冲的返回光脉冲系列中, 第一个噪声光脉冲的返回时间为

$$(i+1)T_R + 2\tau + 2T_{ab} = (i+N+1)T_R$$

这样就可以使第 $i+1$ 个返回光脉冲序列的 n 个信号光脉冲刚好落在第 i 个返回光脉冲序列的后面 n 个时间窗口上, 而不会与噪声光脉冲相重叠[图 2(c), 图 2(d)]。由(7)式可知, 此时系统光脉冲重复频率

为标准时分复用系统重复频率的二分之一。

2.4 主动相位偏置

由于萨尼亚克干涉仪的互易性结构,两束相干光的相位差为零,第 i 个探头的输出为余弦信号:

$$I_i = k_i I_0 [1 + v_i \cos(\varphi_m + \Delta\phi_{si})], \quad (8)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

其中 I_0 为输入光脉冲的强度, k_i 为与探头有关的损耗系数, v_i 为第 i 个探头的可见度, φ_m 为相位偏置幅度, $\Delta\phi_{si}$ 为信号在第 i 个探头上引起的相位变化。当不加相位偏置, 即 $\varphi_m = 0$ 时, 干涉仪对小信号不响应, 当 $\varphi_m = \pi/2$ 时, 对小信号的响应度最大。对每个探头的相位偏置是通过集成光学芯片实现的。具体做法是通过信号发生器在集成光学芯片上施加一个与输入光脉冲同步的相位调制脉冲信号, 脉冲幅度为铌酸锂波导调制器半波电压 V_π 的一半, 脉冲宽度为 T_m 。当相位调制信号脉冲宽度满足 $T_p < T_m < \Delta T$ 时, 调整相位调制信号相对于强度调制信号的时间延迟, 使得输入光脉冲从左端进入集成光学芯片时, 施加在集成光学芯片上的调制脉冲信号恰好启动, 光脉冲通过集成光学芯片后, 信号光脉冲返回前, 调制脉冲结束[如图 2(a), 图 2(b)]。这样输入光脉冲通过集成光学芯片形成的两个光脉冲之间就会产生一个固定的 $\pi/2$ 相位差。从集成光学芯片输出的两个光脉冲分别沿顺、逆时针方向经过相同的光路回到集成光学芯片, 此时相位调整信号的电压值降为零, 返回光脉冲通过集成光学芯片时不再产生附加相位差, 由于萨尼亚克干涉仪的互易结构, 两束光在集成光学芯片公共端发生干涉时彼此之间的相位差为 $\pi/2$, 输出的信号光脉冲强度为

$$I_i = k_i I_0 (1 + v_i \sin \Delta\phi_{si}), \quad (9)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

当 $\Delta\phi_{si} < \pi/2$ 时, 有

$$\Delta\phi_{si} = \arcsin[(I_i / k_i I_0 - 1) / v_i], \quad (10)$$

得到了所需信号。

通过集成光学芯片实现相位偏置具有很大的灵活性, 可以在输入光脉冲通过集成光学芯片时进行相位调制, 也可以对返回的信号光脉冲进行相位调制, 或者对输入输出光脉冲进行推挽调制, 甚至可以像光纤陀螺一样对每个探头的相位偏置进行闭环控制, 为后面的信号处理带来方便。

3 实验结果及讨论

为了验证图 1 结构的可行性, 搭建了包含两个

传感探头 S_1, S_2 的主动相位偏置折叠型萨尼亚克光纤传感阵列时分复用系统。光源为掺铒光纤放大器发出的自发辐射光, 由 980 nm 半导体激光器反向抽运。输出光功率为 5 mW, 中心波长为 1540 nm。光源发出的光经过 LiNbO_3 强度调制器, 由 Tektronix AFG3021 的信号源 1 给出的强度调制信号控制强度调制器产生宽度为 200 ns, 消光比为 25 dB 的光脉冲。光脉冲经过光环行器后进入集成光学芯片, 该集成光学芯片的相位调制半波电压为 5.42 V, 由 Tektronix AFG3021 的信号源 2 给出的相位调制信号控制系统的相位偏置。探头 S_1, S_2 分别用 2 m 的单模光纤绕在圆柱形压电陶瓷上的相位调制器代替, 模拟外界信号输入。总线光纤 B_1 的长度为 33 m, B_2 的长度为 66 m, 加上分束耦合器 25 cm 的尾纤, 实际 $\Delta T = 331.25$ ns, 对于两基元的折叠结构萨尼亚克光纤传感系统, 由(7)式可得最高重复频率为 754.717 kHz。取(6)式中的 $N = 46$, 由于 T_s, T_{ei}, T_{gh} 的值都比较小, 可忽略 T_{ab} , 得到 $\tau = 30.475 \mu\text{s}$, 对应延迟光纤环长度为 6.095 km。输出光信号由宽带集成光电探测器接收放大成电信号。如图 3(a) 为示波器的显示结果, 其中上面的曲线对应的是系统输出信号, 下面的曲线为加在强度调制器上的脉冲信号。图 3(a) 中 I 是没有经过任何探头而直接返回的噪声光脉冲, 由于其所经历的光路最短, 损耗最小, 输出幅值最大; 而 II、III 则分别为探头 S_1 和探头 S_2 的干涉信号光脉冲。可以看出在探头 S_2 的信号脉冲后面紧接着就是下一个脉冲系列的第一个噪声光脉冲, 实际测量输入光脉冲重复频率为 754.727 kHz, 比理论最高重复率略高一点, 主要是因为系统在熔接过程中截除了部分光纤, 导致实际 ΔT 略小于 331.25 ns。从图 3(a) 中可以看出, 强度调制信号要比输出信号超前, 主要是由于光脉冲从强度调整器到光探测器之间存在一定的光路延迟。

图 3(b) 为相位调制信号与系统输出信号之间的关系, 其中上面为系统输出信号, 下面为相位调制信号。为了体现这种相位偏置的灵活性, 实际采取的相位偏置方式是对返回的信号光脉冲进行相位调制, 即光脉冲进入集成光学芯片时, 相位调制电压为零, 而光脉冲返回时相位调制信号的幅度变为 2.71 V。调整相位调制信号相对强度调整信号的时间延迟, 使探头 S_1 和探头 S_2 输出信号幅度降为不加相位调制时的一半, 由式(9)可知, 系统实现了 $\pi/2$ 的相位偏置。

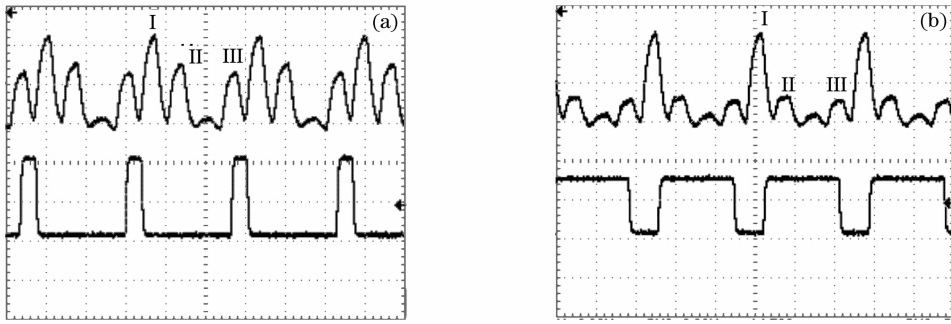


图 3 输出光信号。(a) 没加相位调制信号, (b) 加相位调制信号

Fig. 3 Received pulse train is without (a) or with (b) phase modulation. (I is noise pulse, II is signal pulse of sensor S_1 , III is signal pulse of sensor S_2)

为了测量系统的相位灵敏度和探头之间的信号串音,在探头 S_1 和探头 S_2 的压电陶瓷上分别施加频率为 5 kHz 和 6 kHz,幅度为 0.1 V 的正弦信号,实际产生的相位调制幅度为 -11.5 dB (0 dB re 1 rad)。输出信号用 National Instrument 的 PCI-6132 数据采集卡触发采样,采样频率就是输入光脉冲的重复频率。对探头 1 的信号进行连续采样,采样长度为 10000 点,图 4 为探头 S_1 信号的频谱图,等效噪声带宽为 75.47 Hz,实际测得 5 kHz 处噪声本底为 -81.0 dB,因此系统在 5 kHz 处噪声等效相移为 $7.3 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。系统噪声等效相移较大,主要是因为系统采用的光源是自发射光源,强度噪声较大,而且系统没有进行任何声屏蔽,还存在一定光路拾音。实际测量 S_1 的信号中,6 kHz 处的信号幅度为 -63.25 dB,探头间的串音约为 -51.75 dB,产生串扰的主要原因是光强度调制器消光比仅有 25 dB,残留部分连续光。要进一步降低通道间串扰,可以采用消光比更高的声光开关来代替波导强度调制器。

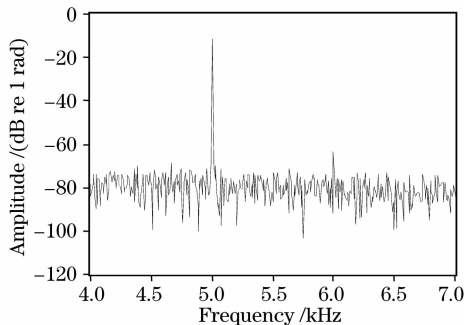


图 4 探头 S_1 输出信号的频谱图

Fig. 4 Spectrum of the measured output signal of sensor S_1

基于主动相位偏置的时分复用传感阵列方案,采用简单的光路就可以同时实现信号光与噪声光的有效分离和对每个探头进行 $\pi/2$ 的相位偏置。通过精确设定时分复用时序,可以使输入光脉冲的重复频率达到标准时分复用系统最高重复频率的二分之一。实验表明,该方案虽然损失了二分之一的时分复用资源,但是结构简单,光路损耗小,通道间串扰小,是一种具有应用前景的萨尼亚克光纤传感阵列方案。

参 考 文 献

- Zhang Renhe, Ni Ming. Principle and applications of the fiber optical hydrophone[J]. *Physics*, 2004, **33**(7): 503~507
张仁和,倪明. 光纤水听器的原理及应用[J]. *物理*, 2004, **33**(7): 503~507
- Meng Zhou, Hu Yongming, Xiong Shuidong *et al.*. All polarization maintaining fiber hydrophone array[J]. *Chin. J. Lasers*, 2002, **A29**(5): 415~417
孟洲,胡永明,熊水东等. 全保偏光纤水听器阵列[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(5): 415~417
- Zhou Xiaodong, Tang Weizhong, Zhou Wen. The realization of PGC scheme interferometric fiber-optic sensor[J]. *Chin. J. Lasers*, 1998, **A25**(5): 411~414
周晓东,汤伟中,周文. PGC调制-解调光纤水声传感器的研究与实现[J]. *中国激光*, 1998, **A25**(5): 411~414
- K. Kråkenes, K. Blotekjaer. Sagnac interferometer for underwater sound detection: noise properties[J]. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(20): 1152~1154
- B. J. Vakoc, M. J. F. Digonnet, G. S. Kino. A novel fiber-optic sensor array based on the Sagnac interferometer[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(11): 2316~2326
- M. J. F. Digonnet, B. J. Vakoc, C. W. Hodgson *et al.*. Acoustic fiber sensor arrays[C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5502**: 49~50
- B. J. Vakoc, M. J. F. Digonnet, G. S. Kino. Demonstration of a 16-sensor time-division-multiplexed Sagnac interferometer-based acoustic sensor array with an amplified telemetry and a polarization-based biasing scheme[C]. *Intern. Conf. on Optical Fiber Sensors*, OFS'02, Portland, Oregon, 2002. 325~328
- K. H. Han, W. J. Lee, B. Y. Kim. Fiber-optic sensor array based on Sagnac interferometer with stable phase bias[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(2): 148~150
- B. J. Vakoc, M. J. F. Digonnet, G. S. Kino *et al.*. Demonstration of a folded configuration of a fiber Sagnac-based sensor array[C]. *Proc. SPIE*, 1999, **3860**: 538~542
- G. S. Kino, B. J. Vakoc, M. J. F. Digonnet. A Polarization-based folded Sagnac fiber-optic sensor array for acoustic waves [C]. *Proc. SPIE*, 2002, **4578**: 336~345

4 结 论

针对折叠型萨尼亚克光纤干涉仪,提出了一种