

文章编号: 0258-7025(2007)07-0957-05

Sagnac 光纤水听器锯齿波相位偏置技术

宋章启, 王 鑫, 曹春燕, 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 提出了 Sagnac 光纤水听器锯齿波主动相位偏置方案, 分析了锯齿波 2π 复位误差对系统性能的影响。采用频率为 94.05 kHz, 复位电压为 10.84 V 的锯齿波对信号进行调制, 将系统偏置在 $\pi/2$ 附近。为抑制 2π 复位误差的影响, 采用与锯齿波同步的脉冲信号控制模/数(A/D)转换器定时采样, 采样结果就是所需的声音信号。实验表明, 该系统在 10 kHz 频率响应处信号幅度平均值为 0.067 rad, 方差为 3.08×10^{-5} rad, 信号幅度相对变化仅为 0.046%, 系统相位偏置十分稳定。

关键词 光纤光学; Sagnac 干涉仪; 水听器; 锯齿波相位调制

中图分类号 TN 253 **文献标识码** A

Fiber Optic Hydrophone Based on Sagnac Interferometer with Saw-Tooth Wave Phase Biasing Technique

SONG Zhang-qi, WANG Xin, CAO Chun-yan, HU Yong-ming

(College of Opto-Electronic Science and Engineering,

National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract A fiber optic hydrophone based on Sagnac interferometer with saw-tooth active phase biasing technique is proposed and demonstrated experimentally. The influence of 2π reset error of saw-tooth wave on system is analyzed. A phase bias around $\pi/2$ is obtained by use of a saw-tooth modulation signal with frequency at 94.05 kHz, and reset voltage of 10.84 V. Acoustic signal is gotten directly by A/D converter triggered by a pulse signal synchronized with saw-tooth modulation signal, and the influence of 2π reset error is depressed. The results show that when the system frequency is 10 kHz, the average amplitude of the signal is 0.067 rad, with variance of 3.08×10^{-5} rad and relative variational amplitude of only 0.046%. The phase bias of system is quite steady.

Key words fiber optics; Sagnac interferometer; hydrophone; saw-tooth wave phase modulation

1 引 言

光纤水听器具有灵敏度高、动态范围大、抗电磁干扰等优点, 特别是可以做到水下无源并易于大规模成阵, 已成为新一代水听器的主要发展方向。在过去的 30 年中, 基于马赫-曾德尔干涉仪和迈克耳孙干涉仪的光纤水听器得到了充分的发展^[1~3]。但是, 由于这两种干涉仪属于双光路双光束干涉仪, 在外界温度等干扰影响下, 容易导致信号衰落。为了克服这一问题, 提出了多种信号处理方案^[3,4], 但增加了系统的成本和复杂程度。而 Sagnac 干涉仪是

单光路双光束干涉仪, 因此基于 Sagnac 干涉仪的光纤水听器最大程度地抑制了温度等噪声带来的信号衰落。另外 Sagnac 光纤水听器的频率响应特性与海洋环境噪声和声音在水下传输损耗的频率特性相匹配, 同样适合水下声传感^[5~7]。

在无偏置的情况下, Sagnac 干涉仪的输出为余弦信号, 此时系统对小信号响应不灵敏。为提高系统对小信号的响应灵敏度, 需要将系统工作点偏置到响应斜率最大处。早期对 Sagnac 光纤水听器的研究多采用 3×3 耦合器^[5,8], 但它易受温度影响并对偏振敏感, 从而导致信号衰落。G. S. Kino 等^[9]

收稿日期: 2006-08-18; 收到修改稿日期: 2007-01-15

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@tom.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

采用基于偏振的相位偏置方案,但采用较多的分立元件,使系统结构变得极为复杂且相位偏置存在不稳定因素。本文采用基于最小互易结构的 Sagnac 光纤水听器锯齿波调制的主动相位偏置方案,通过 Y 波导对顺时针和逆时针两个方向的光进行锯齿波调制,提供了稳定的 $\pi/2$ 相位偏置。为了抑制 2π 复位误差对信号的影响,锯齿波调制信号的频度取光纤环本征频率的 11.5 倍,并采用与锯齿波同步的脉冲信号作为模/数(A/D)转换器的触发信号,对输出信号进行定时采样,采样结果无需经过任何处理就可以得到声音信号。

2 基本原理

图 1 为基于最小互易结构的 Sagnac 光纤水听器原理图。从宽谱光源发出的光,经隔离器进入耦合器分束。一束进入盲端,另一束进入 Y 型 LiNbO₃ 波导调制器,被分为顺时针(CW)和逆时针(CCW)两束光。顺时针光先后经过退偏器、延迟光纤,再经过光纤水听器探头回到波导调制器的公共端;逆时针光先经过光纤水听器探头,再经过光纤延迟线和退偏器回到波导调制器的公共端,与顺时针方向返回的光发生干涉。干涉后的光经耦合器返回到探测器 D。相位调制信号(PM signal)通过 Y 型 LiNbO₃ 波导调制器对顺、逆时针两个方向的光进行相位调制。

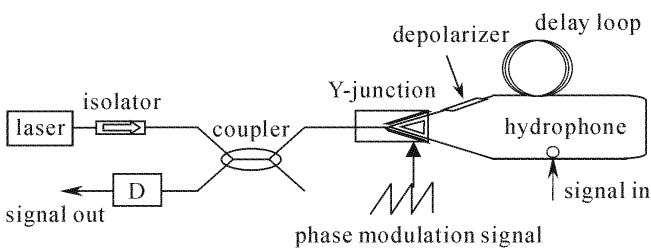


图 1 基于锯齿波相位调制的 Sagnac 光纤水听器原理图
Fig. 1 Schematic diagram of Sagnac interferometer based fiber optic hydrophone with saw-tooth wave phase modulation

在不加相位偏置时,由于系统的互易结构,两束光的相位差为零,此时系统对小信号响应不灵敏。在波导调制器上加一个锯齿波相位调制信号,经过调制器的光受到的相位调制幅度为

$$\begin{cases} \phi_m(t) = \phi t & 0 < t \leq T \\ \phi_m(t) = \phi_m(t + T) \end{cases}, \quad (1)$$

式中 ϕ 为锯齿波的斜率, T 为锯齿波的周期。由于互

易性,两束光受到相位调制幅度同为 $\phi_m(t)$,但相互存在一个时延 τ ,其大小等于整个光纤环的群传输时间 $\tau = nL/c$,其中 n 为光纤的折射率, L 为光纤环的长度, c 为真空中的光速。这样顺时针方向和逆时针方向的光就产生一个相位差

$$\begin{cases} \Delta\phi_m(t) = \phi_m(t) - \phi_m(t - \tau) = \\ \begin{cases} \phi\tau & 0 < t \leq T - \tau \\ \phi\tau - \phi T & T - \tau < t \leq T \end{cases} \\ \Delta\phi_m(t) = \Delta\phi_m(t + T) \end{cases} \quad (2)$$

如图 2 所示,在斜波期间,两束光的相位差为 $\phi\tau$;在回扫后的时间 τ 内,相位差为 $\phi\tau - \phi T$,要实现 $\pi/2$ 的固定偏置,则 ϕ , τ 和 T 应满足

$$\begin{cases} \phi\tau = (K + \frac{1}{2})\pi & K = 0, 1, 2, 3, \dots \\ \phi T = 2\pi \end{cases}, \quad (3)$$

式中 K 为奇数或偶数时, $\cos(\phi\tau)$ 仅相差一个负号,对计算没有影响,统称为 $\pi/2$ 偏置。

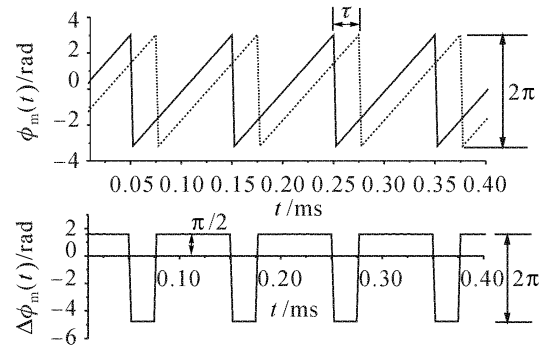


图 2 锯齿波相位调制及产生的相位偏置
Fig. 2 Saw-tooth wave phase modulation and induced phase bias

由式(3)可得 $T = 4\tau / (2K + 1)$ 。令 $f_0 = 1 / (2\tau)$ 为光纤环的本征频率, $f = 1 / T$ 为锯齿波频率,则有

$$f = (K + \frac{1}{2})f_0, \quad (4)$$

此时干涉仪的输出信号的光强为

$$I(t) = I_0 [1 + \sin\phi_s(t)], \quad (5)$$

式中 $\phi_s(t)$ 为输入声信号引起的两个方向光的相位差, I_0 为输入光的光强。若信号幅度远小于 1 rad 时,有

$$\phi_s(t) = \frac{I(t)}{I_0} - 1, \quad (6)$$

这样就得到了声信号。

锯齿波相位偏置方案的基本思想来源于光纤陀螺中的模拟相位斜波技术,通过改变模拟相位斜波的斜率,来补偿由 Sagnac 效应引起的相移,实现零相差测量。该方法可以提高光纤陀螺的标度因子线

性度,并且光纤陀螺平均误差与 2π 复位精度无关^[10]。但在 Sagnac 光纤水听器中则要重新考虑这些因素的影响。

从(3)式可以看出,要实现精确的 $\pi/2$ 相位偏置,必须要满足锯齿波的复位高度要严格等于 2π ,锯齿波的频率要等于 $1/2$ 光纤环本征频率的奇数倍。假设锯齿波复位高度精确为 2π ,则相位偏置随调制频率的变化在 $0\sim 2\pi$ 之间波动,可用于相位偏置的控制。一般而言,光纤环的本征频率和调制信号的频率都具有很高的稳定性,所以一旦锁定频率,在锯齿波 2π 复位精确的情况下,相位偏置可以保持很高的稳定性。

假设锯齿波的频率严格满足(4)式,取 $K = 0$,则有 $T = 4\tau$,仅在 2π 复位中存在一个小的减小量 ϵ ,即 $\phi T = 2\pi - \epsilon$,由式(2),(3)可得在一个锯齿波周期内系统的相位偏置为

$$\Delta\phi_m(t) = \begin{cases} \frac{\pi}{2} - \frac{\epsilon}{4} & 0 < t \leq T - \tau \\ \frac{3\epsilon}{4} - \frac{3\pi}{2} & T - \tau < t \leq T \end{cases}, \quad (7)$$

此时相位偏置仍然是周期为 T 的周期信号。但在不外加信号时,系统输出光强为

$$I(t) = \begin{cases} I_0(1 + \sin \frac{\epsilon}{4}) & 0 < t \leq T - \tau \\ I_0(1 - \sin \frac{3\epsilon}{4}) & T - \tau < t \leq T \end{cases}. \quad (8)$$

由于 ϵ 是一个小量,实际产生的偏置是一个占空比为 3:1,重复频率为锯齿波频率 f 的方波,如图 3(b)所示。当声音信号作用在系统中的水听器探头上时,声信号就会叠加在方波信号上,如图 3(c)所示。这将导致产生一个与调制频率同频或倍频的伪信号;由于方波的频谱很宽,将导致输出信号的噪声本底增加;系统被偏置在两个不同的相位上,而并不是 $\pi/2$ 处,对信号的响应度降低。

为了抑制 2π 复位误差造成的影响,可采用数字定时采样的方法。为了方便说明,以锯齿波周期 $T = 0.1$ ms,光纤环的群传输时间 $\tau = 0.025$ ms,输入信号频率为 1 kHz 作图说明。具体方法是采用一个与锯齿波信号同频率的脉冲信号作为 A/D 转换器的采样触发信号,如图 3(d)所示,使 A/D 转换器仅在锯齿波上升期间对输出信号进行采样,这样就可有效抑制由于 2π 复位精度不够对输出信号造成的影响,如图 3(e)所示。根据奈奎斯特定理,要求触发信号的频率应为输入声信号频率的 2 倍以上。

可见,Sagnac 光纤水听器采用基于锯齿波调制

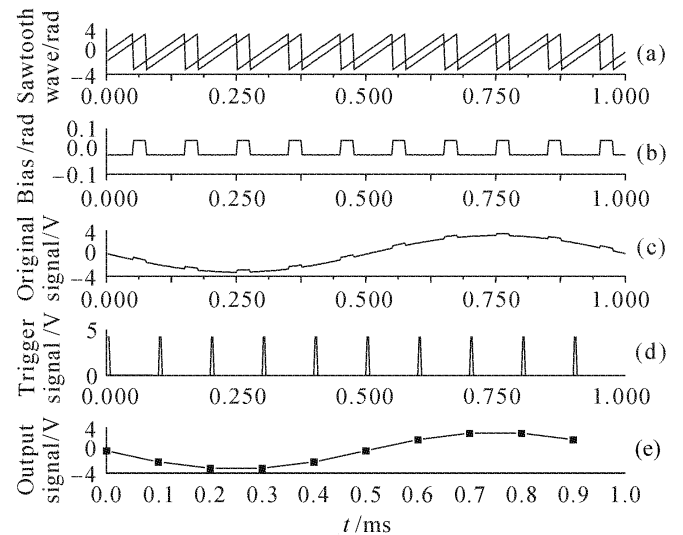


图 3 调制信号与相位偏置信号、采样触发信号的时序关系

(a) 锯齿波信号;(b) 相位偏置;(c) 原始信号;
(d) 采样触发信号;(e) 模/数采样结果

Fig. 3 Sequential relationship of the modulation signal, phase bias signal and trigger signal

(a) saw-tooth wave; (b) phase bias; (c) original signal;
(d) trigger signal; (e) output signal of A/D converter

的主动相位偏置方案,可实现稳定的偏置,并可通过调节调制频率来补偿非互易效应引起的偏置漂移。

3 实验结果及讨论

实验中采用掺铒光纤宽谱光源,输出功率 5 mW,耦合器为保偏光纤耦合器,调制器采用 LiNbO_3 的 Y 波导相位调制器,其半波电压为 5.42 V,光纤延迟线为长 12.6 km 的单模光纤。为了克服偏振扰动引起的信号衰落,在光纤环的一端插入洛埃特(Lyot)消偏器。光纤水听器探头用压电陶瓷相位调制器代替,模拟声音信号在水听器探头引起的响应。

在不加任何调制信号的情况下,系统输出为 2.89 V 的直流信号。实际测得光纤环的本征频率为 8.1823 kHz。根据式(4),取 $K = 11$,则锯齿波调制频率为 94.09645 kHz。实验中,由于更高精度的频率调整对输出已没有明显影响,并考虑模/数转换器的能力,选择 Tektronix AFG3021 标准信号源的 94.05 kHz 锯齿波信号。固定调制信号频率不变,调节调制信号峰峰值至 10.84 V,此时输出信号的直流量平均值由最初的 2.89 V 降为 1.44 V,表明水听器输出信号被偏置在 $\pi/2$ 附近。在压电陶瓷相位调制器上施加频率为 10 kHz,幅度为 10 mV 的正弦

信号作为模拟声音信号。系统输出信号经放大后由 16 位精度的 NI6221 数据采集卡以 250 kHz 的频率连续采样,结果如图 4(a)所示。由于在搜索 $\pi/2$ 相位偏置时并没有去除光化的影响,因此锯齿波的复位高度并没有达到精确的 2π 复位(由于温度等因素的影响,实际应用中很难实现),输出信号频谱中有明显的锯齿波频率及倍频信号(高倍频信号由于欠

采样被混叠到低频段),如图 4(c)所示。为了抑制 2π 复位误差造成的影响,用与调制信号同频的脉冲信号作为 NI6221 数据采集卡模/数转换的触发信号,对信号进行 94.05 kHz 的采样,结果如图 4(b)所示。由如图 4(d)所示的频谱可知,调制信号及倍频信号被消除,信号质量明显优于连续采样结果。

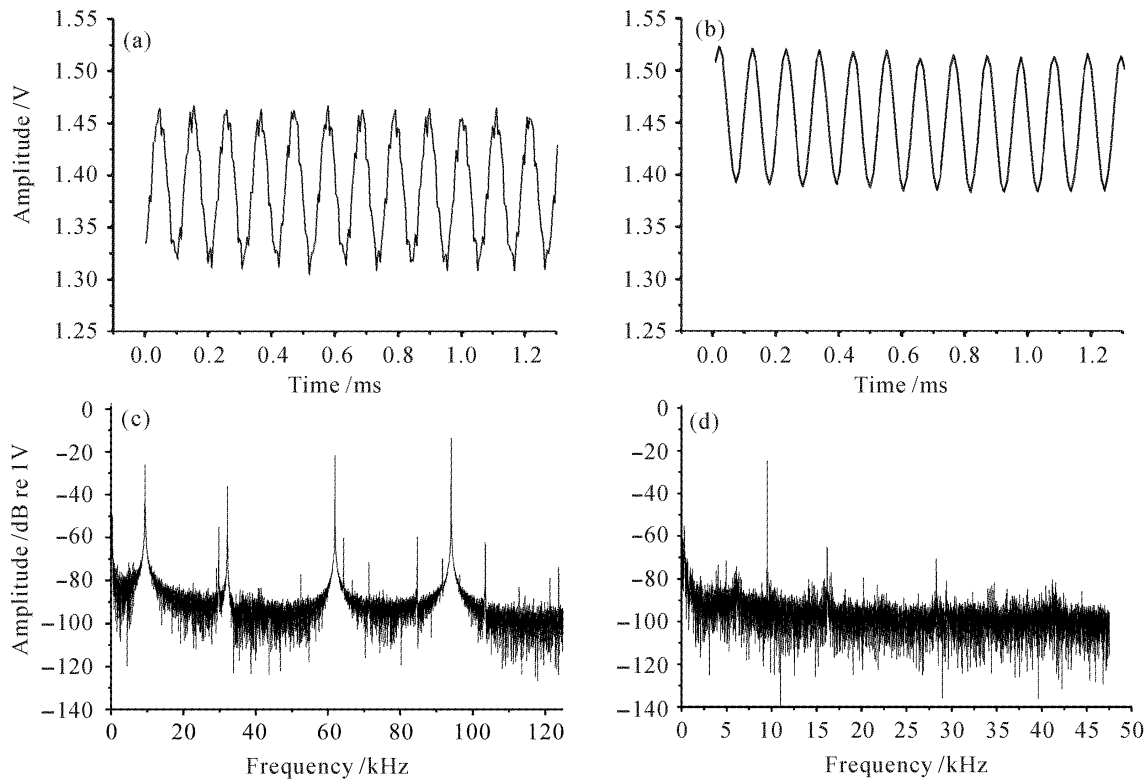


图 4 输出信号及频谱

(a) 连续采样结果;(b) 触发采样结果;(c) 信号(a)的频谱;(d) 信号(b)的频谱

Fig. 4 Output signals and their spectra

(a) output signal sampled continually; (b) output signal sampled with trigger; (c) spectrum of signal (a); (d) spectrum of signal (b)

比较图 4(a), (b), 可看出两者的直流偏置不同。通过一定时间的观察,发现这种波动确实存在,如图 5(a)为输出信号的直流(DC)幅度随时间的变化情况。这种波动不是由相位偏置的变化引起的,而是光强波动引起的,因为互易性结构的 Sagnac 干涉仪不可能产生如此大的相位波动。另外,由于压电陶瓷相位调制器的调制量是一定的,因此即使有相位偏置的波动,输出信号的幅度也不会与直流量的变化情况一致,如图 5(b)。

采用(6)式,去除光强波动的影响,得到系统对 10 kHz 信号的响应结果,如图 5(c)。在这段时间内,系统在 10 kHz 处信噪比为 69.3 dB,噪声带宽为 4.7 Hz;系统响应的 10 kHz 信号幅度平均值为 0.067 rad,方差为 3.08×10^{-5} rad;信号幅度相对变化仅为 0.046%,系统相位偏置十分稳定。

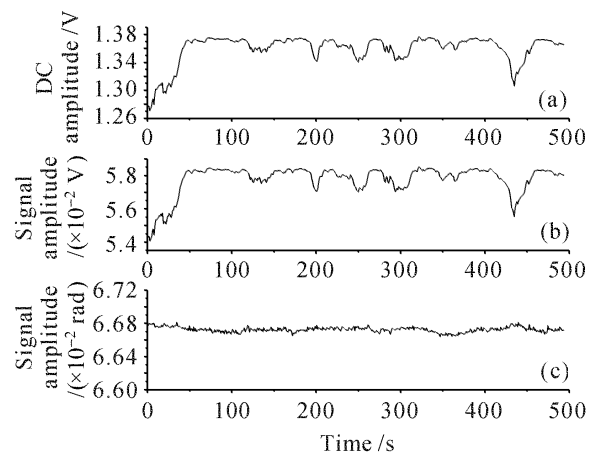


图 5 信号稳定性

(a) 直流信号幅度;(b) 信号幅度;
(c) 消除光强波动影响后的信号幅度

Fig. 5 Signal stability

(a) DC signal amplitude; (b) signal amplitude; (c) signal amplitude after eliminating the fluctuation of the optical power

4 结 论

提出并实现了 Sagnac 光纤水听器锯齿波主动相位偏置方案,通过调整锯齿波的频率和复位电压将系统相位稳定地偏置在 $\pi/2$ 附近。分析了锯齿波调制 2π 复位误差的影响,实验中采用与锯齿波同频的脉冲信号定时触发模/数转换器,使其仅采样锯齿波上升期间的信号。该方法可以有效抑制复位误差引起的杂散信号,从采样结果直接得到待测声信号。实验表明,系统在 10 kHz 处相位偏置十分稳定,信噪比为 69.3 dB,噪声带宽为 4.7 Hz,信号幅度平均值为 0.067 rad,方差为 3.08×10^{-5} rad,信号幅度相对变化仅为 0.046%。

参 考 文 献

- Zhang Renhe, Ni Ming. Principle and applications of the fiber optic 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
- M. J. F. Digonnet, B. J. Vakoca, C. W. Hodgson *et al.*. Acoustic fiber sensor arrays [C]. *SPIE*, 2004, **5502**:49~50
- Meng Zhou, Hu Yongming, Xiong Shuidong *et al.*. All polarization maintaining fiber hydrophone array [J]. *Chinese 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]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **A25**(5):411~414
周效东,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
- B. Culshaw. The optical fibre Sagnac interferometer; an overview of its principles and applications [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2006, **17**:1~16
- K. Kråkenes, K. Bløtekjaer. Sagnac interferometer for underwater sound detection; noise properties [J]. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(20):1152~1154
- Benjamin J. Vakoc, Michel J. F. Digonnet, Gordon S. Kino. A novel fiber-optic sensor array based on the Sagnac interferometer [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(11):2316~2326
- Jiang Yi, Xiao Shanghai. The demodulation techniques for Sagnac interferometer based hydrophone [J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2004, **18**(3):200~202
江毅,肖尚辉. Sagnac 干涉型水听器的信号解调技术[J]. *测试技术学报*, 2004, **18**(3):200~202
- G. S. Kino, B. Vakoc, M. J. F. Digonnet. A Polarization-based folded Sagnac fiber-optic array for acoustic waves [C]. *SPIE*, 2001, **4578**:336~345
- Leferve Herve. *The Fiber-Optic Gyroscope* [M]. Norwood, MA: Artech House, 1993. 111~119