

文章编号 1004-924X(2012)06-1218-07

## 利用信号相关性抑制光纤陀螺强度噪声

郝燕玲\*, 王德双, 陈洪刚, 张勇刚

(哈尔滨工程大学 自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**提出了一种利用陀螺干涉信号和耦合器空闲端信号相关性估计光源强度噪声抑制效果的方法,并在现场可编程门阵列(FPGA)中进行了实时估计。根据估计结果,判决是否进行强度噪声相减,以提高光纤陀螺强度噪声抑制方法的可靠性。理论分析表明,强度噪声抑制效果与信号相关性直接相关。利用该方法,对某高精度干涉型光纤陀螺进行了实验。结果表明,当陀螺干涉信号和耦合器空闲端信号互相关系数为0.91时,干涉信号噪声方差降低至17.16%,然而,当上述互相关系数为0.28时,噪声相减法反而使干涉信号噪声方差增大至143.18%,由此验证了理论分析结果。利用该方法可以在线检测陀螺干涉信号和耦合器空闲端信号的相关性,进而避免噪声相减法中当陀螺干涉信号和耦合器空闲端信号相关性较差时,光纤陀螺噪声不降反升的情况,提高了强度噪声相减法的可靠性。

**关键词:**光纤陀螺;光路噪声;噪声相减;相关性

**中图分类号:**TN253;U666.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122006.1218

## Suppression of relative intensity noise for FOG by using signal cross-correlation

HAO Yan-ling\*, WANG De-shuang, CHEN Hong-gang, ZHANG Yong-gang

(Automation College of Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

\* Corresponding author, E-mail: haoyanling@hrbeu.edu.cn

**Abstract:** A method to estimate the efficiency of relative intensity noise subtraction for a Fiber Optic Gyroscope (FOG) was proposed, and the estimation result could be used to improve the reliability of relative intensity noise subtraction of the FOG. Theoretical analysis shows that the efficiency of relative intensity noise subtraction of the FOG is highly dependent on the cross-correlation between the outputs of FOG and coupler. By proposed method, the experiment on a high precision interferometric FOG was performed, and obtained results show that when the cross-correlation coefficient is 0.91, the variance of the noise after subtraction reduces to 17.16%. However when the cross-correlation coefficient is 0.28, that of the noise after subtraction goes up to 143.18%. These results are coincident with that of theoretical analysis. By utilizing this method, the cross-correlation between the outputs of FOG and coupler improves the reliability of the intensity noise subtraction.

**Key words:** Fiber Optic Gyroscope(FOG); light noise; noise subtraction; cross-correlation

收稿日期:2011-10-08;修订日期:2012-02-28.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61001154)

## 1 引言

陀螺是惯性技术领域重要的传感器,用于敏感载体角速率或角位移,被广泛用于惯性导航、惯性制导、载体姿态测量等。作为新型角速率传感器,干涉型光纤陀螺具有无运动部件、抗冲击、精度覆盖面广等优点,近年来已成为机电陀螺和激光陀螺的有力竞争者,并获得了广泛应用。它的主要性能指标有零偏稳定性、随机游走系数、标度因数稳定性等,其中随机游走系数是表征陀螺噪声大小的参数。陀螺噪声包括电路噪声和光路噪声两部分,电路噪声可通过优化电路结构来减小,而光路噪声与各个光学器件的参数和环境有关,保偏光纤、铌酸锂晶体相位调制器(Y波导)、超荧光掺铒光纤光源(SFS)的应用使得光路噪声大为减小,但在高精度光纤陀螺中光源的相对强度噪声(Relative Intensity Noise, RIN)成为影响陀螺精度的一个重要因素。目前,国内外已采取多种方法抑制光源强度噪声,例如光强外调制法、噪声相减法等<sup>[1-5,10-12]</sup>,取得了一定的效果。特别是噪声相减法,由于其简单有效,获得了广泛应用,然而,当信号延迟时间控制不好时,或光路(电路)噪声较大时,相减法反而会增大光纤陀螺噪声<sup>[5]</sup>。

本文对强度噪声抑制效果与信号相关性存在的直接联系展开了理论分析,提出了一种利用陀螺干涉信号和耦合器空闲端信号相关性估计光源强度噪声抑制效果的方法,并根据估计结果,判决是否进行强度噪声抑制,避免了相关性较差时,相减法反而增大光纤陀螺噪声的情况。实验表明,本文给出的根据信号相关性估计强度噪声相减法抑制效果的方法是有效的,通过在现场可编程门阵列(FPGA)中编程可实时判断信号相关性,进而给出是否进行强度噪声相减法的判决可以有效地提高光纤陀螺强度噪声相减法的可靠性。

## 2 热噪声、散粒噪声和光源强度噪声

高精度光纤陀螺采用宽带超荧光光纤光源,该种光源输出功率高,波长稳定,其输出的光是无偏振的,有利于减少双折射引起的偏振非互易性。在光纤陀螺中存在3种白噪声:热噪声、散粒噪声

和光源强度噪声。热噪声是指光电探测器中跨阻抗放大器反馈电阻的 Johnson 热噪声;散粒噪声是由于光电探测器中光电流的不平滑和不连续引起的;强度噪声是指光源输出能量的振荡,是宽带光源的各种傅里叶分量之间的拍频引起的附加噪声。这3种噪声可以表示为<sup>[6]</sup>:

$$\langle i_N^2 \rangle = \langle i_T^2 \rangle + \langle i_S^2 \rangle + \langle i_I^2 \rangle = \left[ \frac{4kT}{R_L} + 2e\langle i \rangle + \frac{\langle i \rangle^2}{\Delta\nu} \right] B, \quad (1)$$

式中, $i_N$ 、 $i_T$ 、 $i_S$ 、 $i_I$ 分别为光电探测器的总噪声、热噪声、散粒噪声和强度噪声, $T$ 为绝对温度, $k$ 为波尔兹曼常数, $R_L$ 为跨阻抗放大器反馈电阻, $e$ 为电荷量, $\langle i \rangle$ 为探测器上的平均光电流, $\Delta\nu$ 为光源的光谱宽度, $B$ 为检测带宽。

由式(1)可得,热噪声与光强无关,散粒噪声与光强成正比,强度噪声与光强的平方成正比。光纤陀螺中的白噪声用随机游走系数表征,实际上是由相位检测过程的信噪比(SNR)而非单纯的白噪声大小决定,信噪比越高,随机游走系数越小。由式(1)可得光纤陀螺的信噪比为:

$$\text{SNR} = \frac{\langle i \rangle^2}{\langle i_N^2 \rangle} = \frac{\langle i \rangle^2}{\left[ \frac{4kT}{R_L} + 2e\langle i \rangle + \frac{\langle i \rangle^2}{\Delta\nu} \right] B}. \quad (2)$$

热噪声一般小于散粒噪声和强度噪声,为简化可略去不计,式(2)可写为<sup>[7]</sup>:

$$\text{SNR} = \frac{\langle i \rangle}{\left[ 2e + \frac{\langle i \rangle}{\Delta\nu} \right] B}. \quad (3)$$

由式(3)可知光功率较小时( $\langle i \rangle < 2e\Delta\nu$ ),光纤陀螺信噪比由散粒噪声决定;当光源功率达到一定值时( $\langle i \rangle > 2e\Delta\nu$ ),强度噪声起主要作用,因此须抑制强度噪声。

## 3 噪声相减法抑制光源强度噪声

在国外,AlliedSignal公司和Honeywell公司生产的高精度光纤陀螺均采用噪声相减法来抑制光源强度噪声,取得了一定的效果,现将其原理说明如下:

图1所示为噪声相减法的原理。光源发出的光经过保偏耦合器到达铌酸锂晶体相位调制器(Y波导),在此分为2束光,分别沿着顺、逆时针经过光纤环并在Y波导处发生干涉,干涉光经耦合器到达探测器1,经过放大、滤波和A/D转换

后进入现场可编程门阵列(FPGA)。在噪声相减法中利用了耦合器空闲端的信号,经起偏、探测器2、放大、A/D转换后将空闲端信号也引入FPGA。

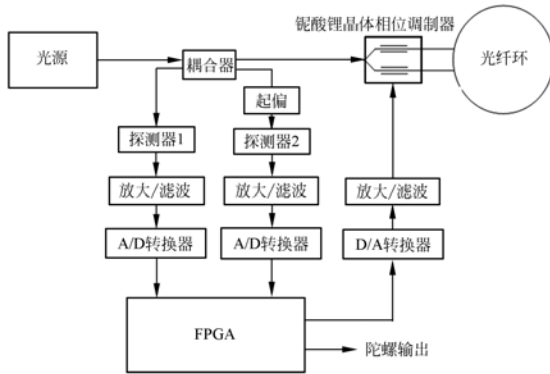


图1 噪声相减法原理图

Fig. 1 Configuration of FOG with RIN reduction

空闲端信号直接来自光源,可从该信号中获得光源强度噪声估计信号。如前所述,光强增大到一定值时,光纤陀螺干涉信号中的噪声主要为强度噪声,从干涉信号中减去强度噪声估计信号便可获得降噪后的陀螺干涉信号,进行相位解调后便可将信号输出。然而,当光纤陀螺光路或电路存在缺陷时,若干涉信号输出主要包含的不是强度噪声,相减法反而会增大光纤陀螺噪声。

干涉信号相对于耦合器空闲端信号的延迟时间为 $\tau$ (光纤环的渡越时间),因此在进行噪声相减之前需要将空闲端信号也延迟 $\tau$ 时间,若延迟时间控制不当反而会引入更大的噪声。

为了避免相减法抑制强度噪声反而带来光纤陀螺噪声增大的情况,在相减之前进行抑制效果预先估计并准确估计延迟时间是十分必要的。

#### 4 强度噪声抑制效果估计方法

目前在研制高精度光纤陀螺的过程中,抑制光源强度噪声往往直接采用噪声相减法,然而,当光纤陀螺干涉信号序列与耦合器空闲端强度噪声估计序列的相关性较差时,或延迟时间估计不准时,噪声相减法反而会使干涉信号的噪声增加,达不到抑制噪声的效果。本文提出利用陀螺干涉信号和耦合器空闲端信号相关性来估计强度噪声的相减效果。

耦合器空闲端信号的噪声主要为光源的强度噪声,陀螺干涉信号中也包含光源强度噪声,对两

路信号分别采样,并将采样信号做互相关运算。当互相关系数大时,说明两路信号的波动趋于一致,从空闲端信号中提取强度噪声,用干涉信号减去强度噪声即得到降噪后的信号;若互相关系数小,说明两路信号变化相差很大,噪声相减已失去其实际意义,则需要对光纤陀螺光路或电路进行检查和调整。

设干涉信号序列为 $b(n)$ ,强度噪声估计信号为 $c(n)$ ,将其延迟 $\tau$ 后得到的噪声估计信号为 $d(n)$ ,降噪后的信号为 $e(n)$ ,则 $e(n) = b(n) - d(n)$ 。因为干涉信号序列与强度噪声序列均已通过滤波器滤去直流分量,故序列均值均为0,即 $E\{b(n)\} = 0, E\{d(n)\} = 0$ ,则 $E\{e(n)\} = 0$ 。强度噪声在经过幅值调整后,其方差与干涉信号序列的方差近似相等,记为 $\text{var}\{b(n)\} = \text{var}\{d(n)\} = V$ 。干涉信号序列与强度噪声序列互相关系数为 $m$ ,根据互相关系数定义有

$$m = \frac{E\{b(n)d(n)\}}{\sqrt{\text{var}\{b(n)\}}\sqrt{\text{var}\{d(n)\}}} = \frac{E\{b(n)d(n)\}}{V} \quad (4)$$

即

$$E\{b(n)d(n)\} = mV \quad (5)$$

则降噪后信号方差可表示为

$$\begin{aligned} E\{[e(n) - E\{e(n)\}]^2\} &= E\{[e(n)]^2\} = \\ E\{[b(n) - d(n)]^2\} &= \\ E\{[b(n)]^2\} - 2E\{b(n)d(n)\} + E\{[d(n)]^2\} &= \\ V - 2mV + V = 2V(1 - m) \end{aligned} \quad (6)$$

根据式(6)得到:

$$2(1 - m) = \frac{E\{[e(n)]^2\}}{V} = \frac{\text{var}\{e(n)\}}{V} = \frac{\text{var}\{e(n)\}}{\text{var}\{b(n)\}} \quad (7)$$

对于干涉信号序列和降噪后的干涉信号序列,其方差大小代表噪声大小。由式(6)可知,互相关系数取值为 $0 \sim 1$ ,当 $m$ 小于0.5时,降噪后信号方差将大于 $V$ ,即大于光纤陀螺干涉信号的方差,噪声反而增大,降低了光纤陀螺精度。因此在光纤陀螺噪声相减法中,可以先计算干涉信号序列与噪声估计信号序列的相关性,进而根据式(7)估计强度噪声相减效果。同时,在相关性运算中,通过判断互相关系数最大值在相关性序列中的位置,可以准确判断信号延迟时间 $\tau$ ,提高强度噪声相减法的效果。在FPGA中实时计算两路信号的互相关系数可以估计噪声抑制效果和延迟

时间,并根据计算结果作是否进行强度噪声相减,具体步骤如下:

(1)在保偏光纤耦合器空闲端熔接一个起偏器,对起偏器输出信号和陀螺干涉信号同时利用光电检测器进行检测,经过滤波、前置放大后用 A/D 转换芯片进行采样,获得光纤陀螺干涉信号序列  $b(n)$  和强度噪声估计信号序列  $c(n)$ 。

(2)将光纤陀螺干涉信号序列  $b(n)$  和强度噪声估计信号序列  $c(n)$  在 FPGA 中做互相关运算,得到互相关系数  $m$  和序列间延迟时间  $\tau$ 。计算方法如下:首先选取信号序列窗口宽度  $N$ ,计算光纤陀螺干涉信号序列  $b(1:N)$  的快速傅里叶变换值序列  $B(1:N) = FFT(b(1:N))$  和强度噪声估计信号序列  $c(1:N)$  的快速傅里叶变换值  $C(1:N) = FFT(c(1:N))$ ;其次,计算互相关频谱序列  $Z(1:N) = B(1:N) * C(1:N)$ ;然后通过反傅里叶变换计算互相关序列  $z(1:N) = IFFT[Z(1:N)]$ ;最后,获取  $z(1:N)$  序列中最大值即为互相关系数  $m$ ,最大值序号即为延迟时间  $\tau$ 。

(3)通过互相关系数  $m$  判断是否进行强度噪声相减抑制,设定一个相关系数预设值,如果互相关系数  $m$  大于预设值,则继续进行后续强度噪声相减抑制步骤,进入步骤四,否则,表明光纤陀螺输出信号与强度噪声估计信号相关性较差,不适合强度噪声相减抑制法,系统输出报警信息,并

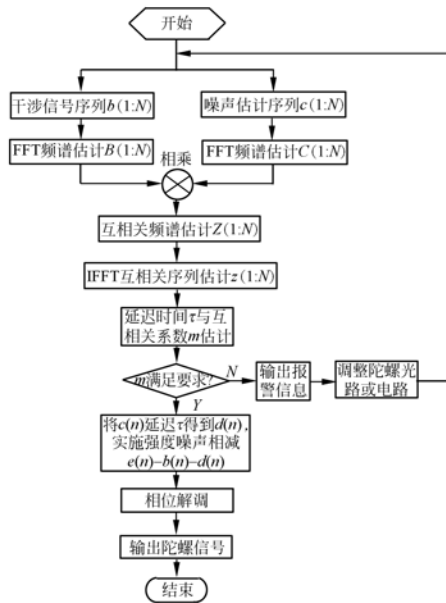


图 2 计算互相关性的流程图

Fig. 2 Calculation flow chart of cross-correlation coefficient

提示应检查、调整光纤陀螺光路、电路。

(4)延迟强度噪声估计信号序列  $c(n)$  共时间,获得新的信号序列  $d(n)$ 。从干涉信号序列中减去  $d(n)$ ,获得降噪后干涉信号  $e(n)$ ,即  $e(n) = b(n) - d(n)$ 。

上述步骤流程图如图 2 所示。

### 5 实验验证

参照图 1,耦合器采用保偏耦合器,在其空闲端熔接一个起偏器,用来保证空闲端光和干涉光有相同的偏振态<sup>[8]</sup>。在同一时刻对两路信号分别采样,保存数据。3 组典型试验结果如下:

(1)调整耦合器与起偏器的焊接角度,计算得到两路信号的互相关系数  $m = 0.28$ ,实施噪声相减法后,降噪后信号与干涉信号方差之比为  $\frac{\text{var}(e)}{\text{var}(b)} = 1.4318$ ,说明光源强度噪声方差上升至之前的 143.18%,如图 3。理论计算噪声方差值为  $2(1-m) = 1.44$ ,与实验结果相符。该实验表明,在互相关系数较小的情况下,消噪反而使噪声增大,达不到噪声抑制效果。此时将输出报警信息,提示检查、调整光纤陀螺光路或电路。

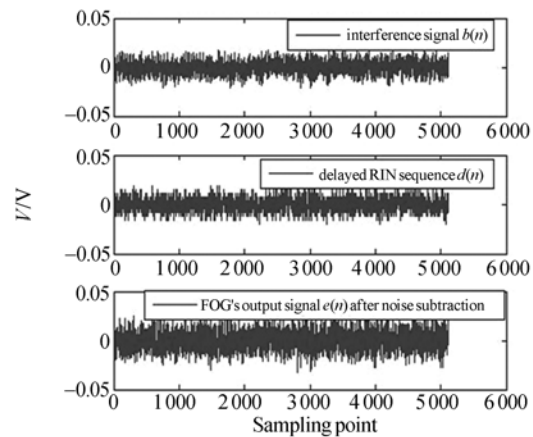


图 3 互相关系数为 0.28 时的消噪效果

Fig. 3 Result of RIN reduction with cross-correlation coefficient 0.28

(2)调整保偏耦合器与起偏器的焊接角度,计算得到两路信号的互相关系数,实施噪声相减法后,降噪后信号与干涉信号方差之比为  $\frac{\text{var}(e)}{\text{var}(b)} = 0.6364$ ,说明光源强度噪声方差降低至之前的

63.64%，如图 4 所示。理论计算噪声方差值为  $2(1-m)=0.64$ ，与实验结果相符。

(3) 调整耦合器与起偏器的焊接角度，计算得到两路信号的互相关系数  $m=0.91$ ，实施噪声相减法后，降噪后信号与干涉信号方差之比为  $\frac{\text{var}(e)}{\text{var}(b)}=0.1776$ ，说明光源强度噪声方差降低至之前的 17.16%，如图 5。理论计算噪声方差值为  $2(1-m)=0.18$ ，与实验结果相符。该实验表明，在互相关系数较大的情况下，强度噪声抑制能达到非常好的效果。

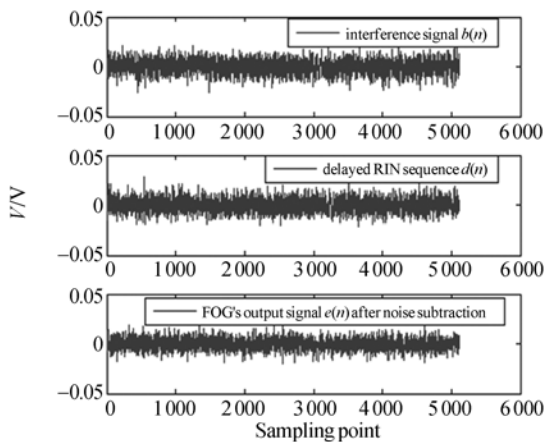


图 4 互相关系数为 0.68 时的消噪效果

Fig. 4 Result of RIN reduction with cross-correlation coefficient 0.68

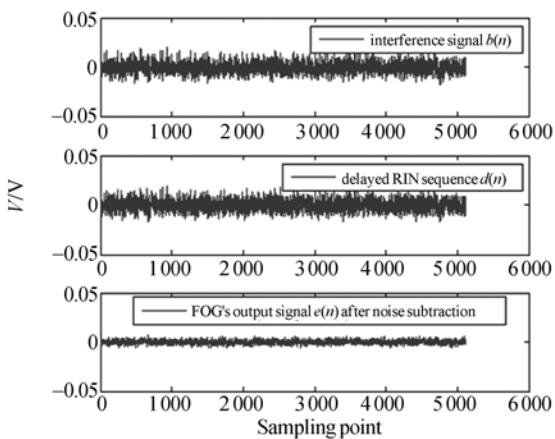


图 5 互相关系数为 0.91 时的消噪效果

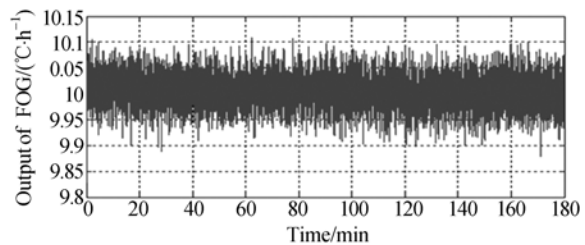
Fig. 5 Result of RIN reduction with cross-correlation coefficient 0.91

## 6 噪声相减法对随机游走的抑制

按照图 2 所阐述的思路，设计并完成了具有

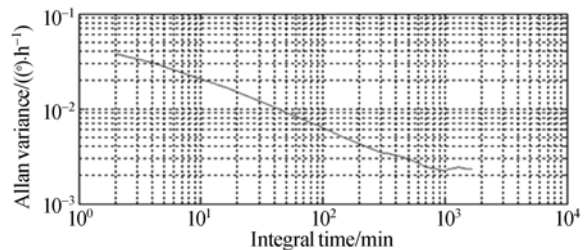
噪声相减法的新一代光纤陀螺的实验板。并参考文献[9]的计算方法，计算出 62.2% 的角随机游走是光源强度噪声造成的。由第四部分的测试结果可知，通过噪声相减法可降低 82.84% 的光源强度噪声，因而可推出，采用噪声相减法可将陀螺随机游走最多降低至原来的 47%。

采用噪声相减算法前后，做 2 次陀螺静态实验，2 次实验尽可能保证相同的实验环境。静态测试均以 1 Hz 的输出频率，持续采集 5 h 左右。图 6 中上、下两幅图分别为未采用噪声相减法的陀螺输出数据曲线和 Allan 方差分析结果。图 7 中上、下两幅图分别为采用噪声相减法后的陀螺输出数据曲线及其 Allan 方差分析结果。



(a) 陀螺输出曲线

(a) Output of FOG



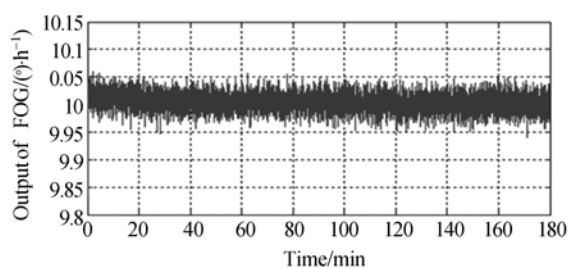
(b) Allan 方差分析结果

(b) Analysis result of Allan variance

图 6 未采用噪声相减算法的陀螺曲线及 Allan 方差分析结果曲线

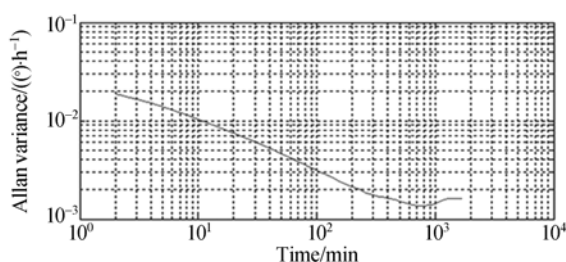
Fig. 6 Signal and analysis result of Allan variance for FOG without noise suppression

对比两组陀螺曲线可以看出，采用噪声相减法后的陀螺噪声得到了明显的抑制，通过最小二乘法对两组 Allan 方差分析的数据进行拟合得出：未采用噪声相减时，光纤陀螺的随机游走系数为  $0.0016998 (^\circ)/\sqrt{h}$ ；采用噪声相减法后，光纤陀螺的角随机游走系数为  $0.0010938 (^\circ)/\sqrt{h}$ ，降低至原来的 64.3%。



(a) 陀螺输出曲线

(a) Output of FOG



(b) Allan 方差分析结果

(b) Analysis result of Allan variance

图7 采用噪声相减算法的陀螺曲线及 Allan 方差分析结果曲线

Fig. 7 Signal and analysis result of Allan variance for FOG with noise suppression

## 参考文献:

- [1] 马东营,宋凝芳,金靖,等. 微小型光纤陀螺组合分时复用技术[J]. 光学精密工程, 2010, 18(10): 2171-2177.  
MA D Y, SONG N F, JIN J, *et al.*. Time-division multiplexing for micro-miniature fiber-optic gyroscopes [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10): 2171-2177. (in Chinese)
- [2] 金靖,张忠钢,王铮,等. 基于RBF神经网络的数字闭环光纤陀螺温度误差补偿[J]. 光学精密工程 2008, 16(2): 235-240.  
JIN J, ZHANG ZH G, WANG ZH, *et al.*. Temperature error compensation for digital closed-loop fiber optic gyroscope based on RBF neural network [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10): 2171-2177. (in Chinese)
- [3] DARRYL B, LEE S, NORMAN T, *et al.*. Method and apparatus for monitoring angle random walk of fiber optic gyroscope: US, 0225323 A1. [P]. 2009.
- [4] LEE K S, GARY W A, DICK A, *et al.*. System for

## 7 结论

上述实验表明,耦合器空闲端信号和干涉信号的相关性与噪声相减效果有密切联系,相关性好则噪声相减法的消噪效果好,相关性差则噪声相减法实施后反而使噪声增加。本文的创新点在于:实施噪声相减法之前,先计算两路信号的相关性,若相关性好则可以进行噪声相减;反之,应检查、调整陀螺电路或光路,从而提高噪声相减法的效果。实验结果表明,完善的噪声相减算法不但降低了陀螺的随机游走,而且也提高了噪声相减算法的可靠性。

由于 FPGA 强大的并行处理能力,数据相关性计算仅在一个脉冲后便完成。因此,相关性计算并不会影响陀螺的实时性。

suppression of relative intensity noise in a fiber optic gyroscope: US, 6204921 B1 [P]. 2001.

- [5] 徐建营,王学锋,李超,等. 光强外调制法抑制相对强度噪声[J]. 中国惯性技术学报, 2008, 16(6): 740-743.  
XU J Y, WANG X F, LI CH, *et al.*. Method of external optical intensity modulation to reduce relative intensity noise [J]. *Journal of China inertial technology*, 2008, 16(6): 740-743. (in Chinese)
- [6] RENATO C R, RICARDO T D, JAMES B. SNR Enhancement of intensity noise-limited FOGs [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2000, 18(12): 2146-2150.
- [7] 张桂才. 应用于高精度光纤陀螺的超荧光光纤光源 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35(增刊): 9-16.  
ZHANG G C. Super fluorescent fiber source for precision grade fiber optic gyroscope application [J]. *Infrared and laser engineering*, 2006, 35 (Supp.): 9-16. (in Chinese)
- [8] KEVIN K, MARK B, WALTER H. High performance fiber optic gyroscope with noise reduction

- [J]. *SPIE. Fiber Optic and Laser Sensors XII*. 1994, 2292:255.
- [9] 孙国飞, 吴衍记, 那永林. 光纤陀螺中随机游走的分析研究[J]. *战术导弹技术*, 2009(1):75-78.  
SUN G F, WU Y J, NA Y L. Investigation into Random Walk in Optical Fiber Gyroscope[J]. *Tactical Missile Technology*, January, 2009(1):75-78. (in Chinese)
- [10] 杨远洪, 王峥, 伊小素, 等. 基于掺铒超荧光光纤光源的高精度光纤陀螺[J]. *北京航空航天大学学报*, 2005(11):1159-1162.  
YANG Y H, WANG ZH, YI X S, et al.. High precision fiber optic gyroscope based on Er-doped superfluorescent fiber source. [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2005(11):1159-1162. (in Chinese)
- [11] 孙国飞, 那永林, 吴衍记. 抑制掺铒光纤光源强度噪声的方法研究[J]. *红外与激光工程*, 2007(S2):589-592.  
SUN G F, NA Y L, WU Y J. Research on suppression methods of Er-doped superfluorescent fiber Srce intensity noise[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007(S2):589-592. (in Chinese)
- [12] 姚琼, 谢元平, 宋章启. 光纤陀螺光源误差及消除方法分析[J]. *激光杂志*, 2005(5):74-75.  
YAO Q, XIE Y P, SONG ZH Q. Analysis on light source intensity noise and noise subtraction method for fiber optic gyroscope [J]. *Laser Journal*, 2005(5):74-75. (in Chinese)

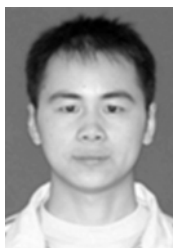
#### 作者简介:



郝燕玲(1944—),女,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师,1967 于哈尔滨工业大学获学士学位,现任国防科学技术奖评审委员会委员、中国惯性技术学会理事、哈尔滨惯性技术学会理事长,主要从事海洋运载器导航与控制领域的研究。E-mail: haoyanling@hrbeu.edu.cn



王德双(1987—),男,四川绵阳人,硕士研究生,2010 年于哈尔滨工程大学获学士学位。主要研究领域为高精度光纤陀螺技术,光纤传感器技术和惯性测量技术。E-mail: wangdeshuang@hrbeu.edu.cn



陈洪刚(1985—),男,湖北随州人,硕士研究生,2009 年于哈尔滨工程大学获学士学位,主要研究领域为高精度光纤陀螺技术,光纤传感器技术和惯性测量技术。E-mail: chenhonggang@hrbeu.edu.cn



张勇刚(1981—),男,湖北荆州人,副教授,硕士生导师,2007 年于英国卡地夫大学获博士学位,2007-2008 年为英国拉夫堡大学博士后,主要研究领域为高精度光纤陀螺技术,光纤传感器技术,数字信号处理及信息融合技术。E-mail: zhangyg@hrbeu.edu.cn