

闭环光纤陀螺方波调制失真的影响与消除

刘士伟,王家口,胡奕彬,庄其仁

(华侨大学 信息科学与工程学院 福建省光传输与变换重点实验室,福建 厦门 361021)

摘要: 数字闭环光纤陀螺仪测量角速度时,采用方波调制引起的各种失真会对输出结果产生影响。基于傅里叶级数建立包含失真噪声的闭环光纤陀螺方波调制、解调信号模型,对各种调制失真引起的输出误差进行了仿真分析,并提出一种双极型归零脉冲方波解调方法,用于消除方波调制闭环光纤陀螺仪的输出信号误差。仿真结果表明:采用常规方波解调时,调制信号的相位失真、方波脉宽失真、谐波失真以及梳状噪声脉冲对光纤陀螺仪输出有很大影响,测量角速度相对误差可达 1%量级。采用双极型归零脉冲方波解调时,上述调制失真的影响都得到有效的减小,陀螺仪测量角速度相对误差只有 0.1%量级,降低了一个数量级,说明文中提出的双极型归零脉冲方波解调方法对提高闭环陀螺的测量精度和稳定性有重要意义。

关键词: 闭环光纤陀螺; 方波调制; 调制失真; 双极型归零脉冲方波

中图分类号: V241.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)12-3755-07

Influence of square-wave modulation distortion on closed-loop fiber optic gyroscope and its elimination

Liu Shiwei, Wang Jiakou, Hu Yibin, Zhuang Qiren

(Fujian Key Laboratory of Optical Beam Transmission and Transformation, College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Square-wave modulation with various distortion will influence the outputs of the digital closed-loop Fiber Optic Gyroscope (FOG) when measuring angular velocity. Based on Fourier series, square-wave modulation models and signal demodulation models for closed-loop FOG including distortion noise were built in this paper. Simulation studies were analyzed for the output errors caused by different modulation distortion signals. A new demodulation method of bipolar return to zero pulse of square-wave for the elimination of errors in output signals of FOG was proposed. The simulation results show that the distortions, including phase distortion, pulse width distortion, harmonic distortion and noise comb pulse, have a great influence on outputs of FOG when using conventional demodulation methods of square-wave. Measuring the relative errors of angular velocity is up to 1%. But the errors are effectively eliminated when using bipolar return to zero pulse of square-wave demodulation, and are one order of magnitude lower than the errors in conventional demodulation methods. The simulation proves that the demodulation method of bipolar return to zero pulse of square-wave is very meaningful for improving

收稿日期:2015-04-07; 修订日期:2015-05-08

基金项目:福建省自然科学基金(11151054);福建省光传输与变换重点实验室开放课题(2014101)

作者简介:刘士伟(1990-),男,硕士生,主要从事光纤传感方面的工作。Email: 1170176616@qq.com

导师简介:庄其仁(1960-),男,教授,主要从事光电传感与检测技术和半导体照明技术方面的研究。Email: qrzhuang@hqu.edu.cn

measurement accuracy and stability of the digital closed-loop FOG.

Key words: closed-loop FOG; square-wave modulation; modulation distortion; bipolar return to zero pulse of square-wave

0 引言

惯性导航系统(INS)^[1]在飞机、潜艇、军舰、导弹、卫星等军事领域^[2-3]应用广泛,已经成为这些领域的研究热点,在大地测量、地质钻探、机器人控制和铁路等领域^[4]也有很大应用潜力。随着光电技术的发展,惯性导航系统主要是以新型光学陀螺代替传统的机械陀螺,以捷联惯导系统代替平台惯导系统。光纤陀螺(Fiber Optic Gyroscope, FOG)凭借其体积小、重量轻、易维护和良好的性价比等优势,成为高精度惯性导航系统的首选惯性测量元件。光纤陀螺的一个主要缺点是其输出噪声较大,光纤陀螺中常见的噪声包括载体的震动噪声^[5]、环境辐射噪声^[6-7]、光源的强度噪声、探测器的散粒噪声及热噪声^[8],也包括电路的放大噪声、数字输出的量化噪声、采样噪声和信号失真噪声等^[9]。光纤陀螺中存在的各种噪声和干扰是研制高精度光纤陀螺的一个很重要的制约因素。

方波调制闭环检测方案是目前 FOG 普遍采用的方案,由于灵敏度高、动态范围广、输出线性度好^[10]等特点使其具有独特的优越性,但采用方波调制的过程中也不可避免地会引入调制失真噪声。常见的方波调制噪声包括由于温度变化^[11]引起的相位失真噪声、调制电路不稳定、电子交叉耦合干扰^[12-13]等引起的脉宽失真噪声、系统带宽限制所引起的谐波失真噪声,以及调制方波跳变沿产生的梳状脉冲等。这些噪声经闭环系统的解调、放大,最后在输出端产生输出误差,噪声输出误差会引起光纤陀螺的随机游走和分辨率的降低,是提高光纤陀螺捷联惯导系统性能必须要面对的主要技术问题之一。目前对调制噪声的研究大多集中在相位调制器特性上^[14-15],关于电路信号失真、调制信号失真影响的研究文献却很少。由于调制噪声的影响因素众多,很难通过补偿的方法消除误差,只能在调制、解调环节消除其影响。因此通过数值模拟仿真分析方波调制失真对输出误差的影响,对提高数字闭环式光纤陀螺仪的精度具

有十分重要的意义。

1 方波调制的傅里叶级数模型

数字闭环光纤陀螺系统如图 1 所示。

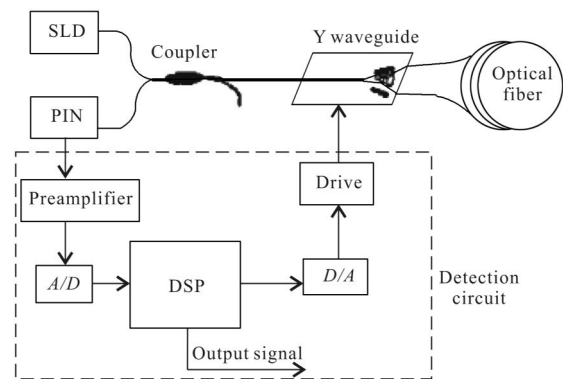


图 1 闭环光纤陀螺结构示意图

Fig.1 Schematic structure of closed-loop fiber optic gyroscope

PIN 光电探测器的输出信号实验波形如图 2 所示,图中 ΔI_D 为经过方波调制后,方波正负半周之间的光强差,其与 FOG 测量角速度 Ω 的关系为:

$$\Delta I_D = 2I_0 \sin\left(\frac{2\pi LD}{\lambda c} \Omega\right) \quad (1)$$

式中: L 、 D 分别为圆形光纤环的光纤长度和光纤环直径; λ 为光波长; c 为光速。

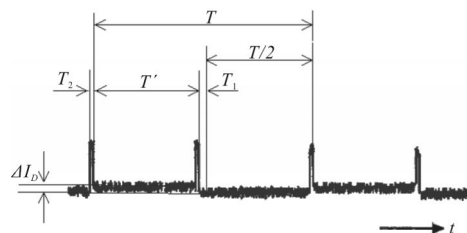


图 2 闭环光纤陀螺系统中 PIN 探测器输出信号波形

Fig.2 Output signal waveform of PIN in closed-loop FOG

公式(1)表明 FOG 测量角速度是通过测量光强差 ΔI_D 得到的,但从图 2 中可以看到,探测器输出的方波信号波形除了存在白噪声外,还存在调制失真噪声。图中 T 为方波信号周期, T' 为方波高电平信号宽度, T_1 为方波信号偏离占空比为理想方波的等效噪声脉冲宽度, T_2 为梳状噪声脉冲宽度,此梳状脉冲

是由于方波调制位相过零时产生的输出。

设数字闭环光纤陀螺的探测器输出信号经放大后到达 A/D 模块时的模拟电压信号为 $V(t)$, 则图 1 所示的电压信号的傅里叶级数展开式为:

$$V(t) = V_0 + \frac{4K\Delta I_D}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin\left(\frac{n\pi T'}{T}\right) \cos\left[n\left(\frac{2\pi}{T}t + \phi\right)\right] + \frac{2KI_m}{\pi} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin\left(\frac{n\pi T_2}{T}\right) \cos\left[n\left(\frac{2\pi}{T}t + \phi\right)\right] + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin\left(\frac{n\pi T_2}{T}\right) \cos\left[n\left(\frac{2\pi}{T}t + \phi + \frac{n\pi T'}{T}\right)\right] \right\} \quad (2)$$

式中: K 为光电转换与放大系数; ϕ 为系统非线性失真引起的相移; I_m 为梳状脉冲幅值。公式(2)中第一项 V_0 为光纤陀螺静止时的电压信号, 第二项为 ΔI_D 产生的方波电压信号, 第三项为梳状脉冲的傅里叶级数, 其中第二个脉冲相对于第一个脉冲相位延迟了 $2\pi T'/T$ 。

闭环光纤陀螺的光电转换放大信号经过 A/D 转换后到达数字信号处理(DSP)模块, DSP 模块的主要功能是进行相关解调和积分滤波。解调方波信号的傅里叶级数展开式可表示为:

$$S(t) = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{2n-1} \cos\left[(2n-1)\frac{2\pi}{T}t\right] \quad (3)$$

公式(3)所示的方波电压信号经信号处理模块解调后的输出信号为:

$$\Omega = \frac{1}{T} \int_0^T S(t)V(t)dt = \frac{4K\Delta I_D}{\pi T} \int_0^T S(t) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{(-1)^{n-1}}{2n-1} \cos(2n-1)\pi \frac{T_1}{T} \cos\left[(2n-1)\left(\frac{2\pi}{T}t + \phi\right)\right] \right\} dt + \frac{4K\Delta I_D}{\pi T} \int_0^T S(t) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{(-1)^n}{2n} \sin 2n\pi \frac{T_1}{T} \cos\left[2n\left(\frac{2\pi}{T}t + \phi\right)\right] \right\} dt + \frac{2KI_m}{\pi T} \int_0^T S(t) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{T} \sin\left(\frac{n\pi T_2}{T}\right) \cdot \left\{ \cos\left[n\left(\frac{2\pi}{T}t + \phi + \frac{\pi}{2}\right)\right] + (-1)^n \cos\left[n\left(\frac{2\pi}{T}t + \phi + \frac{2\pi T_1}{T} + \frac{\pi}{2}\right)\right] \right\} dt \quad (4)$$

若取 $I_m = 10\Delta I_D$, 则由公式(3)和公式(4)可得图 2 所示方波调制信号的解调相对误差计算公式:

$$\frac{\Delta\Omega}{\Omega_0} = \frac{\Omega_0 - \Omega}{\Omega_0} = 1 - \frac{4}{\pi T} \int_0^T S(t) \cdot$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{(-1)^{n-1}}{2n-1} \cos(2n-1)\pi \frac{T_1}{T} \cos\left[(2n-1)\left(\frac{2\pi}{T}t + \phi\right)\right] \right\} dt - \frac{4}{\pi T} \int_0^T S(t) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{(-1)^n}{2n} \sin 2n\pi \frac{T_1}{T} \cos\left[2n\left(\frac{2\pi}{T}t + \phi\right)\right] \right\} dt - \frac{20}{\pi T} \int_0^T S(t) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{T} \sin\left(\frac{n\pi T_2}{T}\right) \cdot \left\{ \cos\left[n\left(\frac{2\pi}{T}t + \phi + \frac{\pi}{2}\right)\right] + (-1)^n \cos\left[n\left(\frac{2\pi}{T}t + \phi + \frac{2\pi T_1}{T} + \frac{\pi}{2}\right)\right] \right\} dt \quad (5)$$

式中: Ω_0 为理想方波(即 $T_1 = T_2 = 0, \phi = 0$)解调时的输出信号。

2 方波解调仿真结果与分析

2.1 相位失真和脉宽失真的影响

当光纤环受环境温度变化、应力或电场影响时, 光纤折射率会产生涨落^[6], 使光纤中的光传输延迟时间改变, 引起探测器接收到的调制方波相位失真和脉宽失真。光纤陀螺仪为了增加灵敏度, 光纤线圈圈数较多, 光纤折射率涨落引起的这种失真便不可忽略。下面先不考虑梳状脉冲的影响, 即设 $T_2 = 0$, 考察失真相位 ϕ 和调制方波脉宽失真等效噪声脉冲占空比 T_1/T 对解调输出相对误差 $\Delta\Omega/\Omega_0$ 的影响。图 3 给出了解调输出相对误差 $\Delta\Omega/\Omega_0$ 随失真相位 ϕ 的变化情况, 从图中曲线不难看出, 无论 T_1/T 多大, 失真相位 ϕ 的绝对值增大都将导致 $\Delta\Omega/\Omega_0$ 的增大。同时 T_1/T 越大, $\Delta\Omega/\Omega_0$ 越大。当 $T_1/T = 0$, 失真相位 $\phi = 1^\circ$ 可引起 $\Delta\Omega/\Omega_0 = 0.2\%$ 的误差; 当 $T_1/T = 0.01$ 时, $\phi = 1^\circ$ 可引起 $\Delta\Omega/\Omega_0 = 0.8\%$ 的误差。

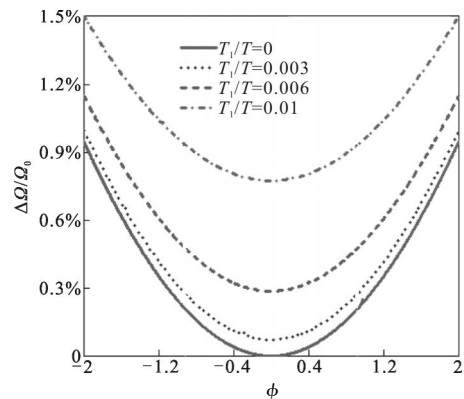


图 3 解调输出相对误差随失真相位 ϕ 的变化曲线
Fig. 3 Simulation curves of demodulation errors and distortion phase ϕ

图 4 所示为 $\Delta\Omega/\Omega_0$ 随 T_1/T 的变化曲线。比较图 3 和图 4 中的曲线, 可以看到失真相位 ϕ 和等效噪声脉冲占空比 T_1/T 对闭环陀螺系统的输出信号的影响具有基本相同的规律, 即 $\Delta\Omega/\Omega_0$ 随 ϕ 和 T_1/T 的增大而增大, $T_1/T=0.01$ 即可引起 1% 的输出信号误差。等效噪声脉冲宽度 T_1 主要由系统对调制方波上升沿和下降沿的响应不一致引起, 为系统固有噪声。

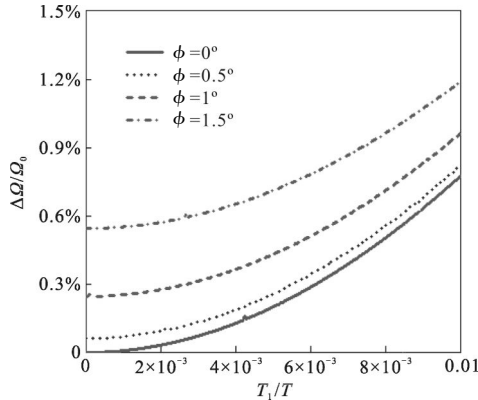


图 4 解调输出相对误差随 T_1/T 的变化曲线

Fig.4 Simulation curves of demodulation errors and T_1/T

2.2 谐波失真的影响

受系统带宽限制, 调制方波存在高频分量丢失, 造成调制方波的谐波失真。设高频分量丢失后的信号方波谐波阶数为 N , 当 $T_1=T_2=0, \phi=0$ 时, 由公式(5)可得谐波失真引起的解调输出相对误差为:

$$\frac{\Delta\Omega}{\Omega_0} = 1 - \frac{16}{\pi^2 T} \sum_{n=1}^N \int_0^T \frac{1}{(2n-1)^2} \cos^2 \left[(2n-1) \frac{2\pi}{T} t \right] dt = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^N \frac{1}{(2n-1)^2} \quad (6)$$

当系统信号方波周期为 0.1 ms 时, 谐波失真引起闭环陀螺仪输出信号误差曲线如图 5 所示。由图中可以看出, 信号方波谐波阶数 N 越大, 失真影响越小, 当 $N=20$ 和 $N=200$ 时, 解调输出相对误差分别为

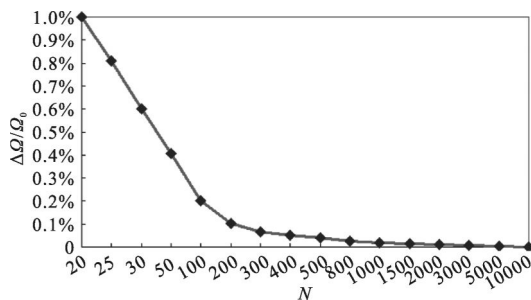


图 5 解调输出相对误差随方波谐波阶数 N 的变化曲线

Fig.5 Simulation curves of demodulation errors and the harmonic order N

$\Delta\Omega/\Omega_0 \approx 1\%$ 和 $\Delta\Omega/\Omega_0 \approx 0.1\%$ 。而当 $N=3\ 000$ 时, $\Delta\Omega/\Omega_0 \approx 0.001\%$, 此时谐波失真对解调输出相对误差的影响可以忽略。由于方波信号带宽 BW 与谐波阶数 N 成正比, 因此, 为了使谐波失真尽可能小, 闭环陀螺仪系统的带宽应足够大。

2.3 梳状脉冲的影响

在调制方波跳变沿, 光纤陀螺会产生一梳状脉冲, 如图 2 所示。梳状脉冲宽度 T_2 对陀螺仪输出误差的影响如图 6 曲线所示。图 6 曲线表明, 采用理想方波解调时, 梳状脉冲宽度 T_2 对陀螺仪的输出相对误差影响很大, 并且随着梳状脉宽 T_2 的增大而快速增大。当梳状脉冲相对占空比 $T_2/T=0.02$ 时, 解调输出相对误差可达 $\Delta\Omega/\Omega_0 \approx -1.5\%$ 。

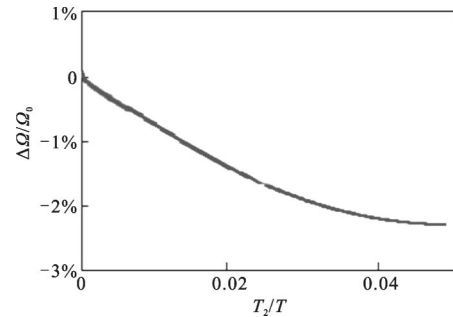


图 6 解调输出相对误差随梳状脉宽 T_2/T 的变化曲线

Fig.6 Simulation curves of demodulation error and square T_2/T

3 方波调制失真影响的解决方法

方波信号的相位失真、脉宽失真、谐波失真以及梳状脉冲引起数字闭环光纤陀螺仪输出误差的主要原因是方波信号的前沿和后沿跳变时存在波形失真。当采用理想方波进行解调时, 这些信号波形失真将产生解调输出噪声, 为此文中提出一种改进的解调方波——双极型归零脉冲方波, 代替理想方波进行信号解调, 可消除方波信号跳变失真的影响。双极型归零脉冲方波波形如图 7 所示, 其中正脉冲方波宽度和负脉冲方波宽度相同, 都为 $\frac{1}{4}T$, 这样解调时方波信号前半周和后半周的直流分量可以相互抵消, 而在方波信号跳变位置 ($t = \frac{N}{4}T, N=1, 2, 3 \dots$) 的前后 $\frac{1}{8}T$ 时间宽度内解调信号恒为 0, 以使方波信

号的前沿和后沿失真部分的解调输出为 0, 双极型归零脉冲方波的傅里叶级数展开式可表示为:

$$S'(t) = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{(-1)^{n-1}}{2n} \cos \left[(2n-1) \left(\frac{2\pi}{T} t + \frac{\pi}{4} \right) \right] + \frac{1}{2n-1} \sin \left[(2n-1) \left(\frac{2\pi}{T} t + \frac{\pi}{4} \right) \right] \right] \quad (7)$$

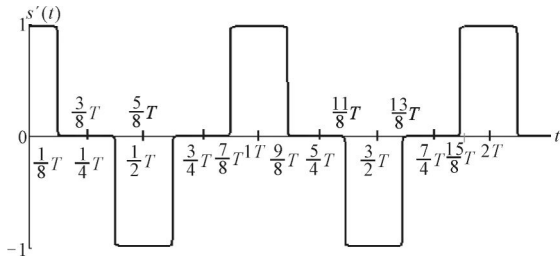


图 7 双极型归零脉冲方波波形

Fig.7 Wave pattern of bipolar return to zero pulse of square-wave

将公式(7)代入公式(5), 得到失真方波信号经双极型归零脉冲方波解调后的输出相对误差为:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\Omega}{\Omega_0} &= \frac{\Omega_0 - \Omega}{\Omega_0} = 1 - \frac{4}{\pi T} \int_0^T S'(t) \cdot \\ &\sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{(-1)^{n-1}}{2n-1} \cos(2n-1)\pi \frac{T_1}{T} \cos \left[(2n-1) \left(\frac{2\pi}{T} t + \phi \right) \right] \right\} dt - \\ &\frac{4}{\pi T} \int_0^T S'(t) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{(-1)^n}{2n} \sin 2n\pi \frac{T_1}{T} \cos \left[2n \left(\frac{2\pi}{T} t + \phi \right) \right] \right\} dt - \\ &\frac{20}{\pi T} \int_0^T S'(t) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{T} \sin \left(\frac{n\pi T_2}{T} \right) \cdot \\ &\left[\cos \left[n \left(\frac{2\pi}{T} t + \phi + \frac{\pi}{2} \right) \right] + \right. \\ &\left. (-1)^n \cos \left[n \left(\frac{2\pi}{T} t + \phi + \frac{2\pi T_1}{T} + \frac{\pi}{2} \right) \right] \right] dt \quad (8) \end{aligned}$$

根据公式(8)对上述各种失真信号进行模拟仿真, 得到的解调输出相对误差曲线如图 8 所示, 比较图 8(a)、(b)和图 3、图 4 可以看到, 采用双极型归零脉冲方波解调, 信号方波的相位失真、脉宽失真对解调输出的影响已完全消除, 这是因为双极型归零脉冲方波在信号方波的跳变点附近 $(t_0 - \frac{T}{8}, t_0 + \frac{T}{8})$, t_0 为信号方波跳变点的幅度为 0, 相关解调时 $(t_0 - \frac{T}{8}, t_0 + \frac{T}{8})$ 范围内的信号对输出贡献也为 0, 因此只要相位失真和脉宽失真引起的信号方波跳变点漂移不超过 $(t_0 - \frac{T}{8}, t_0 + \frac{T}{8})$ 范围, 这两种信号失真对解调输出就没

有影响。通过图 9(a)与图 6 比较同样可以看到, 对输出信号影响较大的梳状脉冲的影响也基本得到消

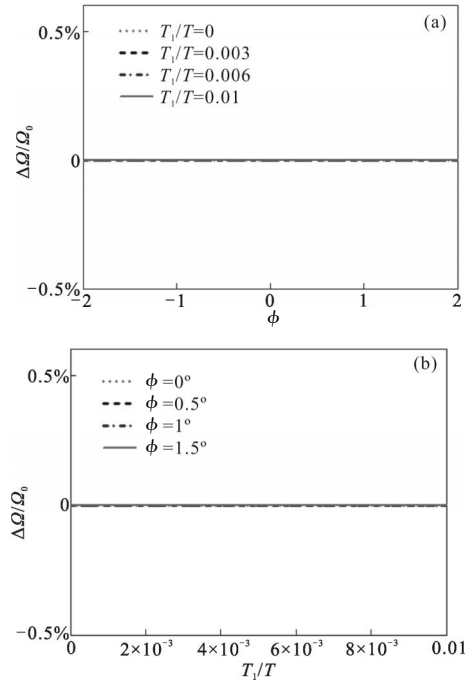


图 8 失真相位 ϕ 、相对失真脉宽 T_1/T 和输出相对误差 $\Delta\Omega/\Omega_0$ 的关系

Fig.8 Simulation curves of relative phase distortion ϕ , pulse width distortion T_1/T and relative errors $\Delta\Omega/\Omega_0$

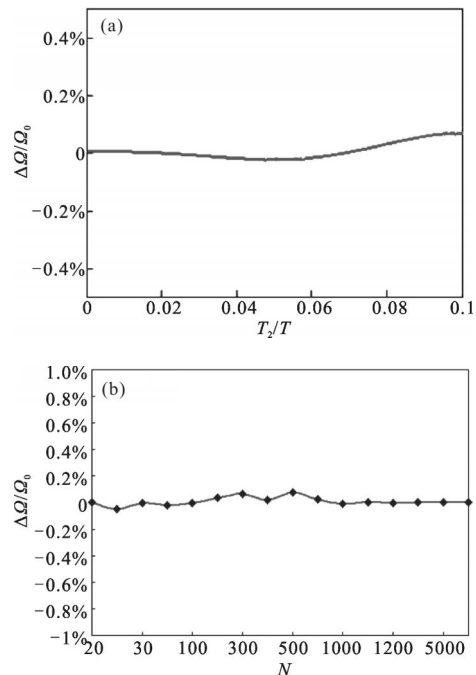


图 9 梳状脉宽 T_2/T 、谐波阶数 N 和输出相对误差 $\Delta\Omega/\Omega_0$ 的关系

Fig.9 Simulation curves of relative comb pulse width, harmonic order N and relative errors $\Delta\Omega/\Omega_0$

除, 这里也是因为梳状脉冲正好位于信号方波跳变点处。图 9(b)是信号方波谐波失真对双极型归零脉冲方波解调输出的影响曲线, 与图 5 相比, 输出相对误差已大大降低, 图中最大输出相对误差 $\Delta\Omega/\Omega_0$ 只有 $\pm 0.1\%$ 左右。双极型归零脉冲方波解调可以改善谐波失真影响的原理同样是基于其失真部位主要集中在信号方波跳变点附近, 如图 10 所示。

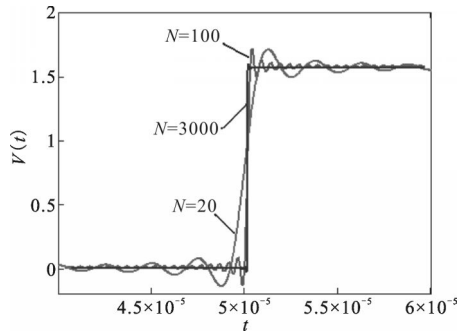


图 10 信号方波谐波失真波形

Fig.10 Harmonic distortion square-waveforms

4 结论

基于傅里叶级数建立包含失真噪声的闭环光纤陀螺方波调制、解调信号模型, 提出一种双极型归零脉冲方波解调方法, 对方波调制过程中存在的相位失真、脉宽失真、谐波失真和梳状噪声脉冲引起的解调输出相对误差 $\Delta\Omega/\Omega_0$ 进行了模拟仿真和分析。得到仿真结果为, 采用理想方波解调时, $\Delta\Omega/\Omega_0$ 随失真相位 ϕ 和相对失真脉宽 T_1/T 的增大而增大, 失真相位 $\phi=1^\circ$ 时可产生 $\Delta\Omega/\Omega_0 \approx 0.2\%$ 的解调输出误差, 相对失真脉宽 $T_1/T=0.01$ 时可产生 $\Delta\Omega/\Omega_0 \approx 1\%$ 的解调输出误差; 谐波失真引起的输出误差随谐波阶数 N 的增大而减小, 当 $N=20$ 时, 输出相对误差可达 $\Delta\Omega/\Omega_0 \approx 1\%$; 梳状噪声脉冲宽度 T_2 对陀螺仪的解调输出相对误差 $\Delta\Omega/\Omega_0$ 影响很大, 当梳状脉冲相对占空比 $T_2/T=0.02$ 时, 解调输出相对误差可达 $\Delta\Omega/\Omega_0 \approx -1.5\%$ 。而当采用双极型归零脉冲方波解调时, 信号的相位失真、脉宽失真、谐波失真以及梳状噪声脉冲引起的数字闭环光纤陀螺仪相对输出误差 $\Delta\Omega/\Omega_0$ 都基本得到消除或改善, 陀螺仪测量角速度相对误差只有 0.1% 量级, 比直接采用理想方波解调时降低了一个数量级, 证明双极型归零脉冲方波用于数字闭环光纤陀螺仪的方波信号解调具有方法简单、解调输出

误差小等优点。

参考文献:

- [1] Xiong Wei, Cai Zhiyuan, Qi Yuxuan, et al. High-accuracy inertial navigation system with H-modulation gyro monitoring [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2010, 18(4): 387-395. (in Chinese)
熊崑, 蔡智渊, 齐宇轩, 等. H调制陀螺监控高精度惯性导航系统[J]. 中国惯性技术学报, 2010, 18(4): 387-395.
- [2] Qin F, Zhan X Q, Zhan L. Performance assessment of a low-cost inertial measurement unit based ultra-tight global navigation satellite system/inertial navigation system integration for high dynamic applications [J]. *IET Radar Sonar and Navigation*, 2014, 8(7): 828-836.
- [3] Ding Chuanbing, Wang Liangming, Chang Sijiang. Simulation investigation on GPS/INS integration for guided rockets [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(5): 1179-1183. (in Chinese)
丁传炳, 王良明, 常思江. 制导火箭弹 GPS/INS 全组合导航系统仿真研究[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(5): 1179-1183.
- [4] Zhang Chao, Liu Jian, Tian Jinwen. The application of GPS/INS to the train security alarm system [J]. *J Huazhong Univ of Sci & Tech*, 2005, 33(7): 29-31. (in Chinese)
张超, 柳健, 田金文. GPS/INS 在火车安全告警系统中的应用[J]. 华中科技大学学报, 2005, 33(7): 29-31.
- [5] Shu Jiantao, Li Xuyou, Wu Lei, et al. Vibration error restrain technology for high-precision fiber optic gyroscope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(11): 2201-2206. (in Chinese)
舒建涛, 李绪友, 吴磊, 等. 高精度光纤陀螺振动误差抑制技术[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(11): 2201-2206.
- [6] Jin J, Wang X Q, Lin S, et al. Effect of radiation-induced mean wavelength shift in optical fibers on the scale factor of interferometric fiber optic gyroscope at a wavelength of 1300 nm [J]. *Chin Phys B*, 2012, 21(9): 094220.
- [7] Wang X Q, Zhang C X, Jin J, et al. Radiation-induced effects in polarization maintaining optical fibers for interferometric gyroscope [J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, 9(6): 060601.
- [8] Mi J, Zhang C X, Li Z, et al. Bias phase and light power dependence of the random walk coefficient of fiber optic gyroscope [J]. *Chinese Optics Letters*, 2006, 4(7): 379-381.
- [9] Jin Jing, Pan Xiong, Song Ningfang, et al. Analyses and

- experiments of effects of square-wave modulation errors on fiber optic gyroscope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 355–358. (in Chinese)
- 金靖, 潘雄, 宋凝芳, 等. 方波调制误差对光纤陀螺的影响分析与实验[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(2): 355–358.
- [10] Li Min, Song Ningfang, Zhang Chunxi, et al. Dynamic characteristics test of fiber optic gyroscope based on cross-correlation identification[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(4): 723–727. (in Chinese)
- 李敏, 宋凝芳, 张春熹, 等. 采用相关辨识的光纤陀螺动态特性测试方法[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(4): 723–727.
- [11] Liu Ying, Li Yan, Ji Zhongxiao, et al. Research on the half-wave voltage stability of Y waveguide in FOG [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(2): 449–453. (in Chinese)
- 刘颖, 李言, 姬忠校, 等. 光纤陀螺用 Y 波导半波电压稳定性的研究[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(2): 449–453.
- [12] Jin J, Tian H T, Pan X, et al. Electrical crosstalk-coupling measurement and analysis for digital closed loop fibre optic gyro[J]. *Chin Phys B*, 2010, 19(3): 030701.
- [13] Gu Hong, Li Shuhong, Zhao Qida. Method of reducing the threshold of the high-precision digital closed-loop fiber optic gyroscope [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2012, 23(9): 1732–1737. (in Chinese)
- 顾宏, 李淑红, 赵启大. 改善高精度数字闭环光纤陀螺阈值方法研究[J]. 光电子·激光, 2012, 23(9): 1732–1737.
- [14] Yin Xiaosu, Xiao Wen. Integrated optic modulator applied in fiber optic gyro[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(3): 285–288. (in Chinese)
- 伊小素, 肖文. 集成光学调制器在光纤陀螺中的调制特性研究[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(3): 285–288.
- [15] Hu Zongfu. Effects of residual intensity modulation of Y-waveguide modulator on interferometric fiber optic gyroscope and elimination method [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(12): 1924–1929. (in Chinese)
- 胡宗福. 光纤陀螺调制器的残余强度调制影响与消除[J]. 中国激光, 2008, 35(12): 1924–1929.
- [16] Jin Jing, Li Min, Zhang Zhonggang, et al. Analysis of temperature errors in digital closed-loop fiber optic gyroscope[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(3): 521–524. (in Chinese)
- 金靖, 李敏, 张忠钢, 等. 数字闭环光纤陀螺温度误差分析[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(3): 521–524.