

采用数字相位跟踪的光纤陀螺解调方案设计

张敏杰,周柯江,王 磊

(浙江大学信息与电子工程学院,浙江 杭州 310027)

摘 要:干涉型光纤陀螺仪是一种基于 Sagnac 效应测量物体相对于惯性空间旋转角速度的光纤传感器。提出了一种采用数字相位跟踪的方式对光纤陀螺进行信号解调的方案,通过产生一个相位来跟踪旋转产生的 Sagnac 相移,从而解调出旋转角速度。数字相位跟踪采用坐标旋转数字计算机(CORDIC)算法实现,占用逻辑资源少且运算速度快。经过在光纤陀螺的数字信号处理系统中进行实验验证,设计的解调方案可以对 $200^{\circ}/\text{s}$ 以下的转速进行有效解调,标度因数非线性度为 1200 ppm,零偏稳定性为 $0.027^{\circ}/\text{h}$ 。

关键词:光纤陀螺;开环结构;数字相位跟踪;CORDIC 算法

中图分类号:TN253;V241.5 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2016.12.020

Demodulation scheme for fiber-optic gyroscope based on digital phase tracking

ZHANG Min-jie, ZHOU Ke-jiang, WANG Lei

(College of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Interferometric fiber-optic gyroscope (IFOG) is a kind of fiber-optic sensor which measures the rotational angular rate relative to the inertial frame based on Sagnac effect. A demodulation method based on digital phase tracking (DPT) is proposed for IFOG. The rotation-induced Sagnac phase shift is tracked by a generated phase to demodulate the rotational angular rate. The digital phase tracking is accomplished by coordinate rotation digital computer (CORDIC) algorithm that has less logical resource consumption and faster computing speed. After evaluation in the digital signal processing system of a fiber-optic gyroscope, this scheme is able to demodulate rotational angular rate less than $200^{\circ}/\text{s}$ and demonstrates a scale factor nonlinearity of 1200 ppm with bias stability of $0.027^{\circ}/\text{h}$.

Key words: fiber optic gyroscope; open-loop structure; digital phase tracking; CORDIC algorithm

1 引 言

干涉型光纤陀螺仪(IFOG)是一种重要的光纤传感器,能够精确测量物体相对于惯性空间旋转的角速度,广泛应用于潜艇导航、卫星姿态控制、地质勘探等军用和民用领域,其工作原理基于 Sagnac 效应:沿闭合光路相向传播的两束光波之间发生干涉

的相位差(即 Sagnac 相移)正比于闭合光路相对于惯性系的旋转角速度。自从 1976 年干涉型光纤陀螺仪第一次成功展示^[1]以来,其信号解调方案得到了广泛研究,这些方案主要分为闭环和开环两种结构。闭环结构具有较高的零偏稳定性和线性度,但由于需要使用铌酸锂(LiNbO_3)作为相位调制器,因

作者简介:张敏杰(1991-),男,硕士研究生,主要从事光纤陀螺仪的数字信号处理方面的研究。E-mail: minjiezhang@zju.edu.cn

收稿日期:2016-03-28; **修订日期:**2016-05-02

而成本较高。对于闭环结构的研究主要集中在通过优化光路和电路结构使光纤陀螺向低成本化和小型化的方向发展^[2-3]。

开环结构的光纤陀螺成本较低,但现有的开环解调方案多存在不足之处。利用干涉信号的一次谐波进行解调的方案^[4]容易受光源强度变化影响,且动态范围有限;同时利用一次和二次谐波的解调方案^[5-6]需要进行复杂的除法及反正切运算;基于相位跟踪的解调方案,如正弦波^[7]及方波^[8]相位跟踪方案多要求调制深度采用一个特定值,因而灵活性较低;与数字解调相比,使用模拟器件进行解调的方案^[7,9]零偏稳定性较差。

鉴于现有开环结构的不足,本文提出了一种全数字式开环解调方案,使用基于CORDIC算法的数字相位跟踪(Digital Phase Tracking, DPT)实现对于Sagnac相移的解调。这种解调方案占用逻辑资源少,运算速度快,且调制深度可设定为任意值,动态范围不受电路限制。对数字相位跟踪的实现过程进行仿真分析后与理论结果相一致。通过将方案应用于光纤陀螺的数字信号处理中,证明其可以有效解调光纤陀螺转速,并具有良好的零偏稳定性。

2 数字相位跟踪的原理及实现

2.1 采用数字相位跟踪进行信号解调的原理

开环结构的光纤陀螺一般采用正弦波调制来提高灵敏度,并采用锁定放大等微弱信号检测技术来提高解调时的信噪比。本文提出的数字相位跟踪解调方案的系统框图如图1所示。

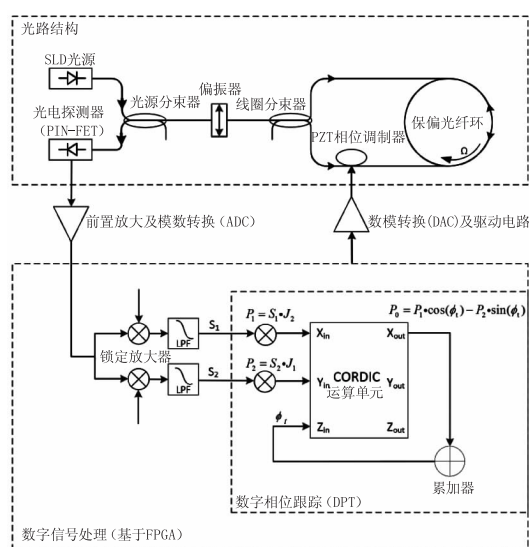


图1 采用数字相位跟踪的解调方案系统框图

Fig.1 Block diagram of the Digital Phase Tracking (DPT) demodulation scheme

超辐射发光二极管(SLD)光源发出的光经过光源分束器、偏振器、线圈分束器后,受到压电陶瓷(PZT)相位调制器的调制,进入保偏光纤环相向传播并发生干涉,经过光电探测器(PIN-FET)转换之后,输出的信号可以表示为:

$$I = I_0 [1 + \cos(\phi_s + \phi_m \sin(2\pi f_m t))] \quad (1)$$

其中, I_0 代表光源强度; ϕ_m 代表调制深度; f_m 代表调制正弦波的频率。光电探测器的输出信号经过前置放大及模数转换之后,进入数字信号处理单元(基于FPGA)进行处理,经过锁定放大解调后可以得到一次谐波和二次谐波的幅值,分别用 S_1 和 S_2 表示。使用第一类贝塞尔函数将式(1)展开,可以得到 S_1 和 S_2 的表达式:

$$S_1 = 2\eta I_0 J_1(\phi_m) \sin(\phi_s) \quad (2)$$

$$S_2 = 2\eta I_0 J_2(\phi_m) \cos(\phi_s)$$

其中, η 是和光电转换器的转换效率及前置运算放大器增益相关的常数; $J_1(\phi_m)$ 和 $J_2(\phi_m)$ 分别代表一阶和二阶第一类贝塞尔函数的值。

为求解Sagnac相移 ϕ_s 的值,本文提出一种数字相位跟踪算法,用 ϕ_t 表示FPGA产生的跟踪相位,用 P_0 表示反馈误差信号。为方便后续的三角函数运算,首先统一式(2)中 S_1 和 S_2 的系数。将 S_1 的表达式乘以 $J_2(\phi_m)$, S_2 的表达式乘以 $J_1(\phi_m)$,并将乘积分别用 P_1 和 P_2 表示,可以得到:

$$P_1 = 2\eta I_0 J_1(\phi_m) J_2(\phi_m) \sin(\phi_s) \quad (3)$$

$$P_2 = 2\eta I_0 J_1(\phi_m) J_2(\phi_m) \cos(\phi_s)$$

为了实现数字相位跟踪,误差信号 P_0 可表示如下:

$$P_0 = P_1 \cos(\phi_t) - P_2 \sin(\phi_t) \quad (4)$$

将式(3)中 P_1 和 P_2 的表达式代入式(4),并用三角函数公式进行整理,可以得到:

$$P_0 = 2\eta I_0 J_1(\phi_m) J_2(\phi_m) \sin(\phi_s - \phi_t) \quad (5)$$

由式(5)可知,当跟踪相位 ϕ_t 接近Sagnac相移 ϕ_s 时, P_0 与 ϕ_t 接近线性相关,因此可以通过 P_0 反馈实现 ϕ_t 对 ϕ_s 的相位跟踪,从而实现对于Sagnac相移的解调。

2.2 数字相位跟踪的CORDIC算法实现

坐标旋转数字计算机(CORDIC)算法由Volder于1959年提出^[10]。这种算法通过移位和加减实现三角函数的运算,占用的逻辑资源较少,便于通过数字电路实现。

一个CORDIC运算单元包括三个输入端口 X_{in} 、 Y_{in} 、 Z_{in} 和三个输出端口 X_{out} 、 Y_{out} 、 Z_{out} , 其中 X_{in} 和 Y_{in} 分别代表旋转前的横坐标和纵坐标, Z_{in} 代表

需要旋转的角度, X_{out} 和 Y_{out} 分别表示旋转后的横坐标和纵坐标, Z_{out} 代表剩余未旋转角度。如果向量的初始坐标为 (x_0, y_0) , 需要旋转的角度为 z_0 , 旋转后的坐标为 (x_N, y_N) , 则旋转前后的坐标关系可以表示为:

$$x_N = K(x_0 \cos z_0 - y_0 \sin z_0) \quad (6)$$

$$y_N = K(y_0 \cos z_0 + x_0 \sin z_0) \quad (7)$$

$$z_N = 0 \quad (8)$$

由于在使用 CORDIC 算法进行旋转的过程中, 向量长度会发生变化, 因此采用 K 表示旋转引起的向量长度变化量。随着旋转次数的增加, K 的值会收敛为一个固定值。

由式(6)可知, 当 x_0 和 y_0 都是非 0 值的时候, x_N 和式(4)中 P_0 的表达式具有相同的结构。在本文设计的采用数字相位跟踪的解调方案中, 将 P_1 、 P_2 分别作为 CORDIC 运算单元的 X_{in} 和 Y_{in} 输入, 通过 CORDIC 运算单元的输入端 Z_{in} 来产生跟踪相位 ϕ_t , 通过输出端 X_{out} 来产生误差信号 P_0 。

3 仿真结果及分析

使用 MATLAB 软件对数字相位跟踪的实现过程进行了仿真, 以验证该解调方案的有效性。在式(2)中, 预先设定调制深度 ϕ_m 和 Sagnac 相移 ϕ_s , 并将 η 和 I_0 设为常数, 通过调用第一类贝塞尔函数可以计算出 S_1 和 S_2 , 进而计算出式(3)中的 P_1 和 P_2 。将 P_1 和 P_2 分别代入 24 阶 CORDIC 运算单元的 X_{in} 和 Y_{in} 输入端, 并将 Z_{in} 输入端的初始值置 0。将 CORDIC 运算单元输出的 X_{out} 作为误差信号去控制 Z_{in} 的变化方向, 直至 X_{out} 的值小于 10^{-5} , 认为相位跟踪完成。此时得到的 Z_{in} 即作为解调输出相位, 通过观察 Z_{in} 与预先设定的 ϕ_s 的关系可以判断是否解调成功。

将 Sagnac 相移的范围设定为 $-1000^\circ \sim +1000^\circ$, 间隔为 10° , 计算在每一个 Sagnac 相移下采用数字相位跟踪方案输出的跟踪相位 Z_{in} 。原始值在 $-180^\circ \sim +180^\circ$ 之间, 如图 2(a) 所示; 在 Sagnac 相移的绝对值大于 180° 时, 需要对 Z_{in} 的值进行累加以得到实际的 Sagnac 相移, 累加后的结果如图 2(b) 所示。

由仿真结果可知, 在 Sagnac 相移从 -1000° 变化到 $+1000^\circ$ 的过程中, 通过 CORDIC 算法输出的跟踪相位的值可以跟踪 Sagnac 相移的变化。因此, 数字跟踪相位解调的动态范围很高, 在实际应用中仅取决于存储累加相位值的寄存器位数。

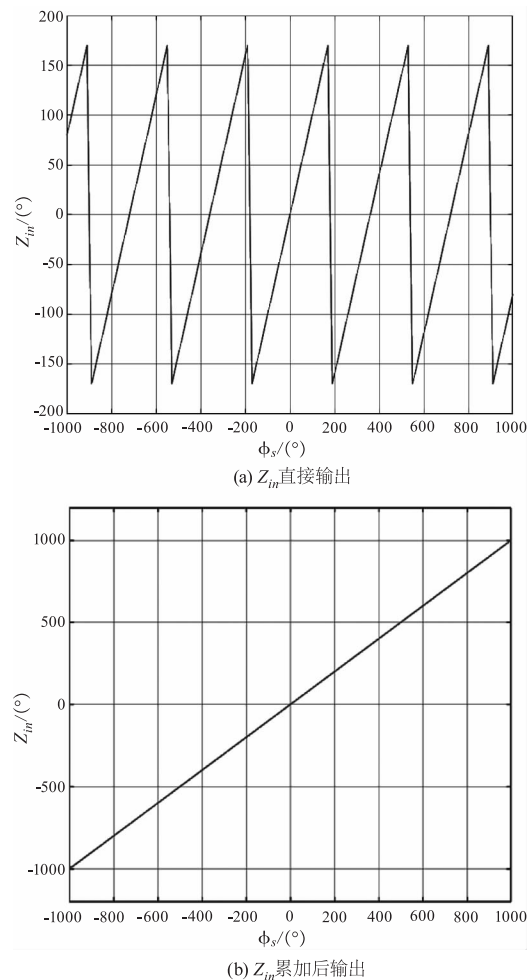


图2 数字相位跟踪解调方案的仿真结果

Fig. 2 Simulation result of the Digital Phase Tracking demodulation scheme

4 实验结果及讨论

为了验证本文提出的数字相位跟踪方案的有效性, 将上述方案应用到了光纤陀螺的数字信号处理系统中, 如图 3 所示。

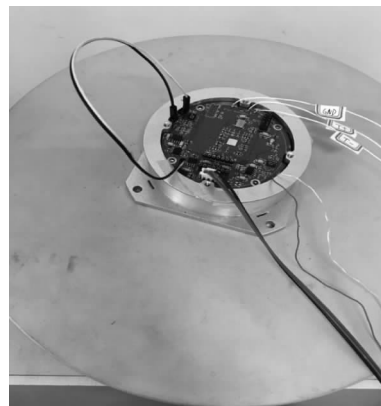


图3 验证数字相位跟踪解调方案的光纤陀螺和转台

Fig. 3 IFOG and turntable to evaluate the Digital Phase Tracking demodulation scheme

实验中,光纤陀螺采用 500 m 的保偏光纤构成光纤环,直径为 90 mm。采用中心波长为 1310 nm 的超辐射发光二极管(SLD)作为光源,调制正弦波的频率设定为 30 kHz。实验所用转台的最大转速为 200 °/s。由于温度变化会影响压电陶瓷(PZT)相位调制器的调制系数,因此实验在温度为 25 °C 的室内进行,并控制温度变化范围在 ± 0.5 °C 之内。

将转台的转速设定为不同的值(以逆时针旋转作为正方向),读取在每一种转速下采用数字相位跟踪方案进行解调时输出的跟踪相位。在转速的绝对值为 0.1 ~ 1 °/s 时,设定转速的间隔为 0.1 °/s;在转速的绝对值为 1 ~ 10 °/s 时,设定转速的间隔为 1 °/s;在转速的绝对值为 10 ~ 50 °/s 时,设定转速的间隔为 10 °/s;在转速的绝对值为 50 ~ 200 °/s 时,设定转速的间隔为 25 °/s。不同转速下解调结果的输出如图 4 所示(图 4 中省略了小于 10 °/s 的低转速下的若干输出结果)。

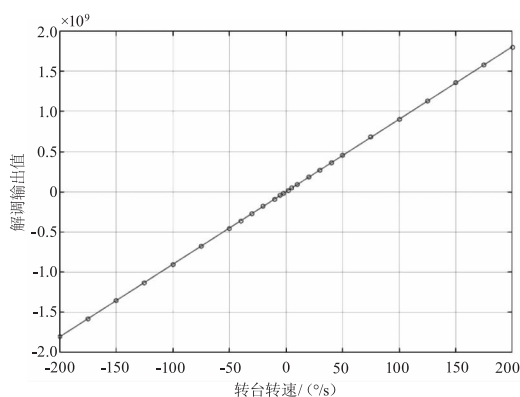


图 4 解调输出值与转台转速之间的关系

Fig. 4 Demodulated output value versus the turntable's rotation rate

由图 4 可知,在输入角速度为 -200 ~ +200 °/s 的范围内,采用数字相位跟踪方案的解调结果和输入角速度呈现良好的线性关系,在这一区间内的标度因数非线性度为 1200 ppm。受制于转台条件的限制,无法在更高的转速下获得解调结果输出,但根据 MATLAB 仿真结果,基于数字相位跟踪的解调方案理论上能够实现更高的动态范围。

零偏稳定性是光纤陀螺的一项重要参数,因此对采用数字相位跟踪方式进行解调的光纤陀螺在静止条件下的输出进行了 5 h 的连续测量,以进行长期零漂性能的评估。根据图 4 的结果对光纤陀螺进行定标后,可以由数字信号处理单元的输出值得到静止条件下解调出的实际转速,如图 5 所示。

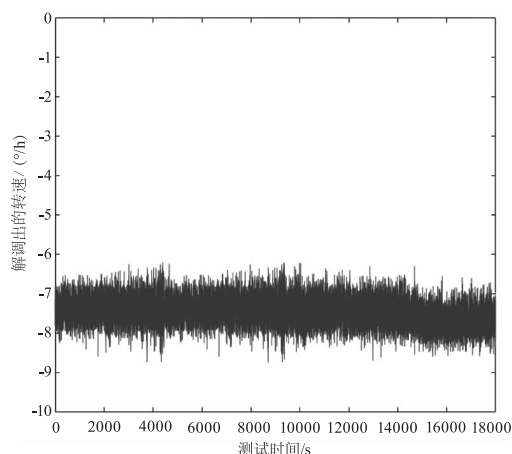


图 5 采用数字相位跟踪解调方案的光纤陀螺的长期零漂

Fig. 5 Long-term drift of the IFOG employing Digital Phase Tracking demodulation scheme

由图 5 可知光纤陀螺在静止条件下解调出的结果在 -7.5 °/h 附近,约等于所在位置的地球转速。对图 5 的结果进行 Allan 方差分析^[11],得到图 6。

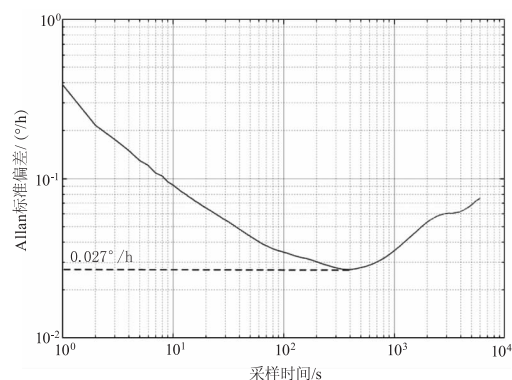


图 6 Allan 方差分析

Fig. 6 Allan variance analysis

由图 6 可得,采用数字相位跟踪方式进行解调的光纤陀螺的零偏稳定性约等于 0.027 °/h。

为了评估本论文提出的数字相位跟踪解调方案的整体性能,选取了另外两种采用开环方式进行解调的光纤陀螺产品,对关键的性能参数进行比较,第一种是 KVH 公司的 DSP-3400,第二种是 FIZOPTIKA 公司的 VG991D1,比较结果如表 1 所示。

表 1 三种开环光纤陀螺的性能对比

Tab. 1 Performance comparison of three open loop IFOGs

	DSP-3400	VG991D1	数字相位跟踪
动态范围/(°/s)	375	100	200
零偏稳定性/(°/h)	1	1	0.027
标度因数非线性/ppm	500	1000	1200
角度随机游走/(°/h ^{1/2})	0.067	0.03	0.012

由表1可知,本文提出的采用数字相位跟踪的解调方案在零偏稳定性和角度随机游走方面具有较为优异的性能,但标度因数的线性度仍有待提高。

5 结 论

通过分析光纤陀螺干涉信号的一次和二次谐波的特征,本文提出了一种采用数字相位跟踪来解调 Sagnac 相移的方案。在使用 MATLAB 软件对数字相位跟踪的实现过程进行仿真,并将提出的方案应用到以 FPGA 为数字信号处理核心的光纤陀螺之后,验证了这种解调方案的有效性。实验结果表明,采用数字相位跟踪的解调方案可以对 $-200 \sim +200$ $^{\circ}/s$ 的转速进行解调,零偏稳定性可以达到 0.027 $^{\circ}/h$ 。

与现有的其他相位跟踪算法相比,本文提出的数字相位跟踪的优势在于相位调制深度可以设定为任意值。此外,使用 CORDIC 算法完成数字相位跟踪加快了运算速度并减少了逻辑资源占用。与采用模拟方式实现的相位跟踪相比,本文提出的全数字方案不易受到模拟元件参数变化的影响,同时由于跟踪相位可以不断累加并存储于寄存器中,因而动态范围很大。

本文设计的解调方案是在恒温的环境中进行验证的。实际应用中温度的变化会影响 PZT 相位调制器的调制系数,使调制深度发生变化,进而导致一阶和二阶第一类贝塞尔函数的值发生变化,影响数字相位跟踪算法的解调结果。后续的研究中将会关注于调制深度的控制。

参考文献:

- [1] Vali V, Shorthill R W. Fiber ring interferometer[J]. Applied Optics, 1976, 15(5): 1099 - 1100.
- [2] ZOU Yan, LIU Jun, LI Peng. A study on low cost fiber-optic gyroscope and military requirements[J]. Laser & Infrared, 2006, 35(12): 962 - 964. (in Chinese)
邹燕, 刘军, 李鹏. 低成本光纤陀螺及其军事应用[J]. 激光与红外, 2006, 35(12): 962 - 964.
- [3] SHENG Zhongyan, ZHOU Kejiang, YE Wei. The miniaturization techniques of Fiber Optic Gyro (FOG)[J]. Laser & Infrared, 2000, 30(1): 53 - 55. (in Chinese)
盛钟延, 周柯江, 叶炜. 光纤陀螺(FOG)小型化技术[J]. 激光与红外, 2000, 30(1): 53 - 55.
- [4] Wang X, He C, Wang Z. Method for suppressing the bias drift of interferometric all-fiber optic gyroscopes[J]. Optics Letters, 2011, 36(7): 1191 - 1193.
- [5] Böhm K, Marten P, Weidel E, et al. Direct rotation-rate detection with a fibre-optic gyro by using digital data processing[J]. Electronics Letters, 1983, 19(23): 997 - 999.
- [6] Wang Q, Yang C, Wang X, et al. All-digital signal-processing open-loop fiber-optic gyroscope with enlarged dynamic range[J]. Optics Letters, 2013, 38(24): 5422 - 5425.
- [7] Kersey A D, Moeller R P. Open loop fibre optic gyroscope with phase shift nulling signal processing[J]. Electronics Letters, 1990, 26(16): 1251 - 1253.
- [8] Toyama K, Fesler K A, Kim B Y, et al. Digital integrating fiber-optic gyroscope with electronic phase tracking[J]. Optics Letters, 1991, 16(15): 1207 - 1209.
- [9] Spammer S J, Swart P L. A quadrature phase tracker for open-loop fiber-optic gyroscopes[J]. Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, IEEE Transactions on, 1993, 40(2): 86 - 91.
- [10] Volder J E. The CORDIC trigonometric computing technique[J]. Electronic Computers, IRE Transactions on, 1959(3): 330 - 334.
- [11] Allan D W. Statistics of atomic frequency standards[J]. Proceedings of the IEEE, 1966, 54(2): 221 - 230.