

文章编号:1009-671X(2005)02-0012-03

闭环光纤陀螺数字信号处理的设计方案

潘玉恒, 鲁 标, 孟 克

(哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 详细介绍了光纤陀螺的工作原理, 并在 TI 公司 16 位高速数字信号处理器(DSP) TMS320VC5402 的基础上, 对闭环光纤陀螺的数据采集、数据处理进行了设计和实现. 将混沌系统和互相关原理相结合, 通过更加有效的软件算法, 实现了提取掩埋于噪声中的微弱信号的提取和优化.

关 键 词: Sagnac 效应; 光纤陀螺; DSP; 信号处理; 混沌

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A

Digital signal processing of FOG based on DSP

PAN Yu-heng, LU biao, MENG Ke

(School of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: The basics of the fiber optic gyroscope are introduced, and an all digital closed loop fiber optic gyroscope system is presented based on the high speed 16 bit DSP TMS3205402 of TI. The abstract and optimization of weak signals in the background of noise are realized by combining chaos system with correlation and using an effective algorithm.

Key words: sagnac effect; optical fiber gyro(OFG); DSP; oignal processing; chaos

光纤陀螺(OFG)是随着光纤技术迅速发展而出现的一种新型光纤旋转传感器. 我国已经研制出中低精度($0.1 \sim 10^\circ/\text{h}$)的光纤陀螺, 在此设计了数字信号处理方法, 利用互相关和混沌相结合的软件编程, 使被测信号得到提纯.

1 干涉型光纤陀螺(IFOG)工作原理

基本光纤陀螺系统如图 1 所示, 其中 SLD 为超辐射发光二极管, C_1 、 C_2 为光纤耦合器, P 为光纤起偏器, PD 为光电转换器, PM 为由保偏光纤构成的调制器, 一般为绕上保偏光纤的压电陶瓷(PZT)调制器.

SLD 发射的光由分光器分为两束光, 分别被耦合到光纤线圈的两端, 并沿相反的方向传送, 最后再由同一耦合器送到光电检测器. 当系统不旋转时, 两束光将产生相消或相长的干涉, 当光纤线圈以角速度 Ω 顺时针或逆时针旋转时, 检测器就

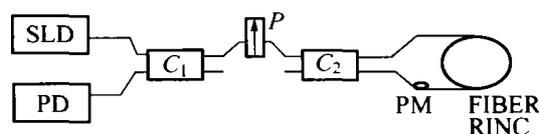


图 1 基本光纤陀螺系统

会检测到 Sagnac 相差:

$$\Delta\theta = 2\pi LD\Omega/\lambda c. \quad (1)$$

对于几何尺寸固定的光纤陀螺, 在光源波长 λ 已知的情况下, 通过式(1)就可以确定 $\Delta\theta - \Omega$ 的一一对应关系. 根据理论分析, 光电探测器接收到的光强 I 与 Sagnac 相移 $\Delta\theta$ 存在如下关系:

$$I = I_0(1 + \cos\Delta\theta). \quad (2)$$

易求得在 $\Delta\theta = \pm \pi/2$ 处获得最大检测灵敏度(即 $\frac{dI}{d\Delta\theta}$ 最大). 为此, 需要给系统提供一个 $\pi/2$ 固定非互易相位偏移. 不难发现, 光纤陀螺的信号检测就是要提取被噪声掩埋的微弱信号.

2 数字信号处理硬件设计与实现

2.1 设计方案

闭环干涉光纤陀螺(IFOG)的原理参见图 2.

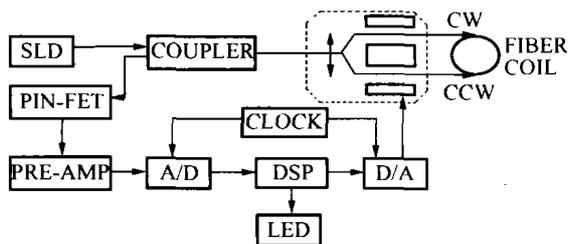


图 2 闭环干涉光纤陀螺的原理图

数字信号处理硬件系统及其运行过程包括:

1) 低噪声前置放大器,用以将光电转换后的信号进行低噪声放大,以满足 A/D 转换器的输入范围要求.

2) A/D 转换器,用以将放大后的模拟信号转换为数字信号.

3) DSP 数字信号处理器,用以对输入的数字信号进行预先设计好的处理,以获取转速的精确信息和产生反馈信号参量.

4) D/A 转换器,用以将 DSP 形式的数字反馈调制信号转化为模拟信号输出到铌酸锂相位调制器上.

LED 显示器直接接在 DSP 的输出端,用以显示测量到的适时转速信号的大小.时钟控制器用于使 A/D, D/A 以及数字信号处理器(DSP)保持严格的同步,从而使系统能够正确运行.

2.2 信号调制原理

对于如图 2 所示的闭环 IFOG 系统来说,根据 Sagnac 原理对其进行理论分析:由式(2)可知,当 $\Delta\varphi=0$ 时,从光电探测器上检测到的光强 I 得到最大值,但在 0° 附近,对应余弦曲线的线性度差,所以在实际设计中一般首先要加 $V_{\pi/2}$ 电压,使陀螺工作在线性度最佳的正交工作点上,从而提高检测灵敏度,选择加上方波调制信号的方法,使陀螺工作在正交工作点如图 3 所示.

从图 3 可以看出,线圈转动速率 $\Omega=0$ 和 $\Omega \neq 0$ 时探测器输出梳状波形, $\Delta h = A - B$, 其绝对值反映转速的大小,符号反映转动方向.

在图 3 中, τ 为光纤环的渡越时间,即光经过线圈一周所需的时间, $\tau = nl/c$, l 为光纤长度,对于 500 m 长的光纤, τ 约为 $2.5 \mu\text{s}$, 则本征频率为

400 kHz. 所需的调制频率为 $1/2\tau$, 即 200 kHz.

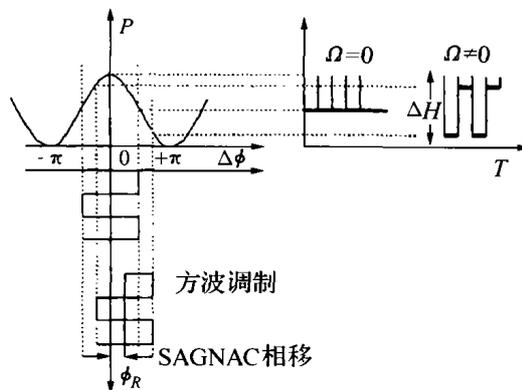


图 3 方波调制原理

加上方波调制信号和阶梯波调制信号后,归一化的信号输出为

$$S(t) = 1 + \cos(\Delta\phi_{m_1} + \Delta\phi_{m_2} + \phi_s). \quad (3)$$

式中: ϕ_s 为 Sagnac 相移, $\Delta\phi_{m_1}$ 、 $\Delta\phi_{m_2}$ 分别为方波调制信号和阶梯波调制信号所产生的相移. 阶梯波调制信号用于抵消 Sagnac 相移, 由图 3 可知, 当阶梯高度为 ϕ_r 时, 在递增阶段 T_1 :

$$\Delta\phi_{m_2} = \phi_{1cw} - \phi_{2ccw} = \phi_r; \quad (4)$$

复位阶段 T_2 :

$$\Delta\phi_{m_2} = \phi_r - 2\pi. \quad (5)$$

调制方波信号为偏置信号, 取 $\Delta\phi_{m_1}$ 为 $\pm\pi/2$, 叠加在阶梯波上, 则可知, 在方波正半周:

$$S_1(t) = 1 + \sin(\phi_s + \phi_r); \quad (6)$$

在方波负半周:

$$S_2(t) = 1 - \sin(\phi_s + \phi_r). \quad (7)$$

在方波负半周, 具有最大灵敏度. 在闭环检测系统中, A/D 采样方波正负半周信号, 由式(6)、(7)通过计算使

$$S_0(T) = [S_1(t) - S_2(t)]/2 = \sin(\phi_s + \phi_r). \quad (8)$$

调节 ϕ_r 抵消 Sagnac 相移 ϕ_s , 则 $(\phi_s + \phi_r) \rightarrow 0$, ϕ_s 和转速 Ω 有一一对应的线性关系.

3 DSP 软件设计

3.1 相关检测

采用有效的软件算法是从噪声中提取微弱信号的必要条件之一, 根据信号特征, 可以表示为

$$U(n) = S(n) + N(n). \quad (9)$$

式中: $U(n)$ 为测量信号, $S(n)$ 为陀螺转速信号,

$N(n)$ 为白噪声.

由于转速信号的特征已知,可以设定 1 个与之同频率的信号 $L(n)$,则根据互相关有

$$R_{UN}(m) = \sum_{n=0}^{N-1} U(n)L(n-m). \quad (10)$$

代入式(9)可得

$$R_{UN}(m) = \sum_{n=0}^{N-1} [S(n) + N(n)]L(n-m). \quad (11)$$

所以有

$$R_{UN}(m) = \sum_{n=0}^{N-1} S(n)L(n-m) + \sum_{n=0}^{N-1} N(n)L(n-m). \quad (12)$$

由于白噪声和矩形波不相关,所以式(12)第 2 项趋于零,从而实现了数字滤波的目标,有效地从噪声中将信号提取出来了.

与自相关相比,互相关的算法较简单,而且能节省机器周期,所以选择互相关方法.按照光纤陀螺的信号特征,引入一个离散的方波信号,其幅值取为 ± 1 ,然后与实际测量信号进行相关运算,达到抑制噪声.

3.2 混沌系统与相关检测相结合

通过互相关运算之后,将互相关函数并入到混沌系统中,可以更加有效地抑制噪声,进一步提纯了被测信号.

混沌检测主要是利用混沌系统对初始条件的极度敏感性,将被测信号注入混沌系统后,导致系统动力学行为发生很大变化.通过适当处理,从而测出被检信号的各种参数.

Duffing 方程具体形式为

$$x''(t) + kx'(t) - x(t) + x^3(t) = f\cos(t). \quad (13)$$

式中: k 为阻尼比; f 为周期策动力幅值.

将 Duffing 方程变形,即

$$x'' = -\omega kx' + \omega^2[x - x^3 + f\cos(\omega t)]. \quad (14)$$

式中: ω 为策动力角频率.

可以看出,混沌系统具有对小信号敏感和对噪声免疫的优点,参数的摄动会引起周期解发生本质变化.在实际检测中,将待测信号作为 Duffing 方程周期策动力的摄动,噪声对系统状态的改变无影响.而一旦带有特定信号,即使幅值较小,

也会使系统发生相变.

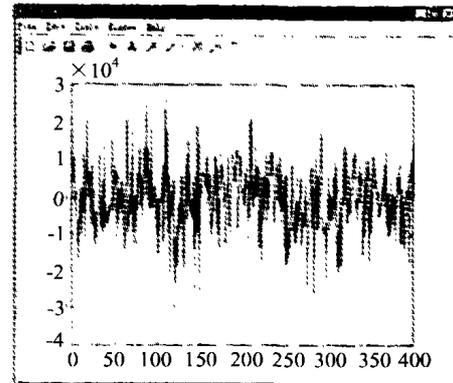


图 4 未处理的信号

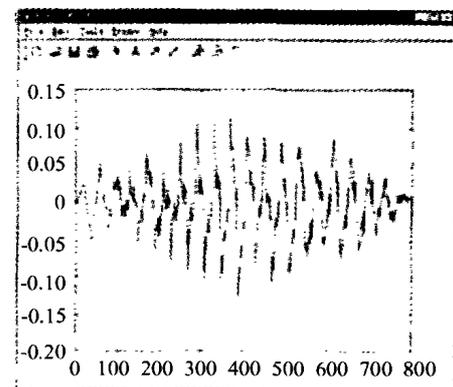


图 5 处理过的信号

4 结 论

DSP 技术为光纤陀螺信号处理系统提供了非常灵活的平台,改变算法就可以使硬件结构大体相同的陀螺满足不同场合的实际要求,而且调试非常方便,有利于光纤陀螺的大批量生产.另外,互相关方法实现了对噪声的抑制,而混沌检测则实现了信号的提取,二者相结合的信号检测技术在信号检测中具有广阔的发展前景.

参考文献:

- [1]吕铁军. 调制信号的分形特征研究[J]. 中国科学: E 刊, 2001, 31(6): 508-513.
- [2]谭宇. 光纤陀螺的发展与应用前景[J]. 光电子技术与信息, 1995, 8(3): 52-60.
- [3]张兴周. Sagnac 效应光纤陀螺[J]. 传感器技术, 1998, 17(1): 201-203.
- [4]聂春燕, 徐振忠. 混沌系统在弱信号检测中的应用[J]. 传感器技术, 2003, 22(1): 176-182.

[责任编辑:刘 畅]