

文章编号:1005-6734(2001)02-0047-04

## 基于 DSP 实现的数字化闭环光纤陀螺

吕葵,杨剑宏,张炎华

(上海交通大学导航与自动化研究所,上海 200030)

**摘要:**提出一种基于高速数字信号处理专用 DSP 芯片使用的数字化闭环光纤陀螺系统方案,并着重讨论其数字快速算法的实现。这种快速算法采用多抽样率数字信号系统中抽取的高效结构实现,能够在保证系统的实时性和精度的条件下,极大地减少了 DSP 系统的运算量和存储量。

**关键词:**光纤陀螺;多抽样率数字信号处理;DSP

**中图分类号:**U666.12+3

**文献标识码:**A

## Implementaion of All - digital Close - loop Fiber Optic Gyro System with DSP

LU Kui, YANG Jian - hong, ZHANG Yan - hua

(Institute of Navigation &amp; Control, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** An all - digital close - loop fiber optic gyro system with a high speed digital signal processing DSP chip, and the implementation of the fast digital algorithms in this system is discussed. With the high performance construction of the decimation in the multirate digital signal systems, these digital fast algorithms could not only reduce the calculating work and the storage volume of the DSP system, but also fulfill the requirements of the real - time processing and the accuracy of the system.

**Key words:** fiber optic gyro; multi - rate digital signal processing; DSP

### 1 概述

20 世纪 80 年代中期,干涉式光纤陀螺的研究已经解决了灵敏度(即短期噪声)、长期漂移和标度因子的线性度及稳定度等方面的问题,研究重点转向实用化系统的研究。

在干涉式光纤陀螺实用化系统的研究过程中,光纤陀螺的信号处理技术是光纤陀螺技术中的研究重点。光纤陀螺信号处理的方法可以分为三类,即馈外差检测、开环系统和闭环系统的信号处理。

馈外差检测的出发点是对动态偏置的陀螺输出信号作适当的选通,将相位信息转变成一个低频信号的相位,例如选用调制信号的倍频作为处理的信号<sup>[1]</sup>。在单通道馈外差检测中有两个严重的问题:一个是相位调制的驱动信号与带通滤波器之间的固定相差不稳定,另一个是选通过程中使一半的信号丢失。为了克服这些缺陷,可以采用双通道的实现方案<sup>[2]</sup>,或采用串行双通道代替并行双通道<sup>[3]</sup>。

这种方案的局限性在于无法在大动态范围内提供稳定的线性标度因子,更为严重的是在截止期内角速度发生突然变化时会引起严重误差。

Bohm 提出的开环系统的数字处理方案可以避免导通信号引起的问题。这种方案的出发点是利用数字信号处理的频谱分析方法检测出调制信号的基频幅度  $S_1$ 、倍频幅度  $S_2$  和四倍频幅度  $S_4$ 。在使  $S_2/S_4$  为常量即控制调制幅度为常数的条件下,便可得到线性的标度因子。同时,由  $S_1/S_2$  可求出非互

收稿日期:2000-12-06

作者简介:吕葵(1968-),男,上海交通大学导航与自动化研究所讲师,从事导航设备及自动化专业。

易性的 Sagnac 相移,进而得到陀螺的旋转角速度。

这种方案可以运用于采用 PZT 调制器<sup>[4]</sup>和集成光调制器的开环系统中,数字信号处理专用芯片 DSP 的应用<sup>[4][5]</sup>使陀螺系统的结构大为简化。然而这种方案由于调制频率远远低于光纤线圈的本征频率,无法得到最大的信号强度,另一方面陀螺没有工作在最灵敏的零点,因而只能实现中等的精度。

为了实现高精度的光纤陀螺,从相位调制器引入一个非互易性的相移反馈形成闭环系统以抵消由旋转产生的 Sagnac 相移<sup>[6]</sup>,并使陀螺始终工作在零点,因而闭环系统的灵敏度最高,使标度因子在大动态范围内保持线性和稳定。

用集成光学工艺制成的相位调制器具有足以适用于高速数字信号的频带宽度<sup>[7]</sup>,可以用作数字相位锯齿波处理的反馈器件。将持续时间为  $\tau$  的数字相位阶梯加到相位调制器上,当  $\tau$  等于光导波在光纤线圈中的渡越时间时,在光纤线圈中以相反方向传播的两个光导波之间产生与相位阶梯高度相等的相位差。阶梯的高度仅取决于在两次复位之间所加的阶梯数  $n$ ,即  $2\pi/n$ ,这样就可以在大动态范围内获得线性且稳定的标度因子。

由于闭环系统的实时性要求很高,因而一般都采用硬件实现陀螺系统的信号处理,这样信号处理系统的结构较为复杂,并且极大地提高了在提高系统性能时系统的实现难度。为了解决这个困难,可以考虑用软件实现信号处理的功能,并更彻底地发挥信号处理的优势。本文基于这方面的考虑,以系统的实时性为出发点,设计一种在基于高速 DSP 上实现的数字化光纤陀螺闭环系统,着重讨论其数字算法高效结构的设计和实现。

文中,第二节介绍数字干涉式光纤陀螺闭环系统的系统结构及陀螺输出的信号形式。第三节讨论数字算法高效结构的设计和实现。第四节是本文的结论。

## 2 光纤陀螺系统构成及陀螺的输出信号

图 1 所示为数字化光纤陀螺闭环系统的框图。光学部分由光源、耦合器、光纤线圈、多功能集成光器件和光电探测器组成。多功能集成光器件中包括偏振器和相位调制器。调制信号和反馈的相位零化信号之和由相位调制器引入光纤线圈中;偏振器的作用是将光路中具有相同偏振态的导波取出,以减少由于偏振态不同所带来的误差。光纤陀螺输出信号由光电探测器将光信号转换成电信号并输出。

信号处理部分由抗混迭滤波器、时序控制、信号处理单元 DSP、AD 和 DA 等部分组成。为了避免采样后的混迭,必须在采样前用抗混迭滤波器将所需频带以外的频带滤除。时序控制电路完成信号处理部分的同步工作。信号处理单元由 DSP 及其外围芯片组成,主要完成信号的频谱分析、数字解码、数字调制和相位零化等功能,这部分的框图如图 2 所示。

陀螺的输出信号为

$$i_D(t) = 2I_0 \cos^2\{\phi(t) + \varphi \cos(\omega_m t)\}, \quad (1)$$

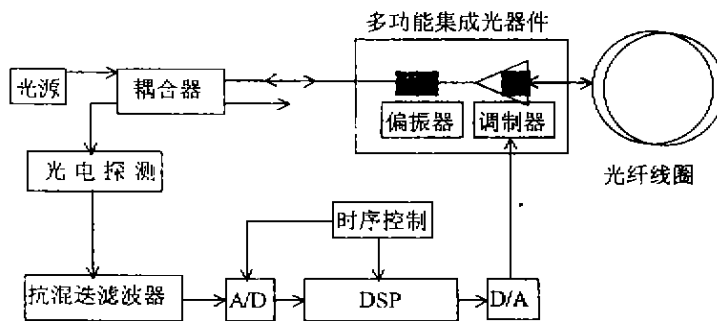


图 1 数字化光纤陀螺闭环系统框图

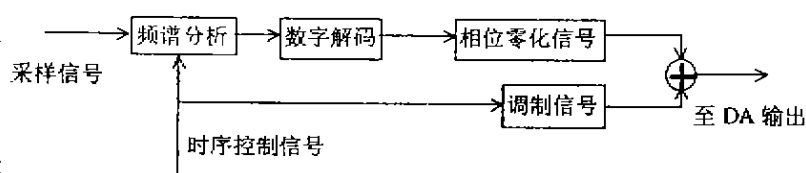


图 2 信号处理单元功能框图

信号处理部分由抗混迭滤波器、时序控制、信号处理单元 DSP、AD 和 DA 等部分组成。为了避免采样后的混迭,必须在采样前用抗混迭滤波器将所需频带以外的频带滤除。时序控制电路完成信号处理部分的同步工作。信号处理单元由 DSP 及其外围芯片组成,主要完成信号的频谱分析、数字解码、数字调制和相位零化等功能,这部分的框图如图 2 所示。

其中,  $\varphi = \varphi_0 \sin(\omega_m T/2)$ ,  $\varphi_0$  为调制幅度;  $\omega_m = 2\pi f_m$ ,  $f_m$  为调制频率;  $I_0$  为光源光强;  $T$  为导波通过光纤线圈的渡越时间;  $\phi(t)$  为时变的 Sagnac 相差, 即

$$\phi = (4\pi NA/\lambda c)\Omega, \quad (2)$$

其中,  $\Omega$  是输入的陀螺旋转角速度,  $NA$  为光纤线圈的有效面积,  $\lambda$  是波长,  $c$  为光速。

运用三角恒等式, 并进行 Bessel 分解, (1) 式变为

$$i_D(t) = I_0 [1 + J_0(2\varphi)\cos(2\phi) + \sum_{n=0}^{\infty} J_{2n}(2\varphi)\cos(2\phi)\cos(2n\omega_m t) + \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(2\varphi)\sin(2\phi)\cos((2n-1)\omega_m t)], \quad (3)$$

其中,  $J_n(2\varphi)$  是  $n$  阶第一类 Bessel 函数。假定陀螺的旋转角速度在一短时期内稳定, 则 Sagnac 相差  $\phi$  为常量, 从 (3) 式可以得到陀螺输出信号的频域表示

$$I_D(\omega) = \pi I_0 \{ [1 + J_0(2\varphi)\cos(2\phi)]\delta(\omega) + \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_{2n}(2\varphi)\cos(2\phi)[\delta(\omega - 2n\omega_m) + \delta(\omega + 2n\omega_m)] + \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_{2n-1}(2\varphi)\sin(2\phi)[\delta(\omega - (2n-1)\omega_m) + \delta(\omega + (2n-1)\omega_m)] \}. \quad (4)$$

### 3 信号处理单元及其数字算法的高效结构

信号处理单元的功能框图由上节图 2 给出。本节着重讨论数字算法的高效结构, 以逐步减少运算量和数据流量。为了叙述方便, 下面按照信号流的方向分别对信号处理单元各个功能的实现进行讨论。

#### 3.1 重点采样技术及抗混迭滤波器的实现

在短时期内, 不妨假定陀螺的角速度稳定。在这个前提下, 由 (4) 式的结果, 可以认为陀螺的输出信号具有相当窄的频率谱线, 谱线之间均为噪声, 因而运用重点采样技术进行采样。

对于带宽为  $B = f_H - f_L$  的窄带信号, 其中  $f_H$  和  $f_L$  分别是该信号的上限频率和下限频率。为了防止频谱混迭, 采样率  $f_s$  必须满足下列条件:

$$-f_L + (N-1)f_s \leq f_L, \quad -f_H + Nf_s \geq f_H, \quad (5)$$

其中,  $N$  为任一正整数。在这两个条件的基础上, 根据优化准则, 便可确定合适的采样率<sup>[4]</sup>, 这种技术称之为重点采样技术 (under sampling)。

除此之外, 采样之前还必须滤除所需频带之外的频谱分量, 这样才能保

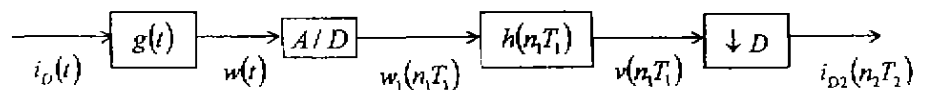


图 3 采样方案框图

证采样的信号中不会出现混迭的频谱分量。为了减少数据量和计算量, 通常都使采样率在满足采样定理的前提下尽可能小, 这就要求模拟的抗混迭滤波器具有非常窄的过渡带, 以便能有效地防止出现混迭, 但使模拟抗混迭滤波器的实现非常困难。

为了解决这个问题, 先用较高的采样率进行采样, 以减少模拟滤波器的实现难度, 同时也允许模拟滤波器具有较宽的过渡带。对于采样数据, 可以通过数字的抗混迭滤波器来去除其中的混迭成份。这种方法是一种过采样方案。为了减少数据流量, 数字抗混迭滤波器后面级联一个抽取器, 用它将较高的采样率变换为较低的采样率。完整的采样方案框图如图 3 所示, 图中,  $g(t)$  和  $h(n_1T_1)$  分别表示模拟和数字抗混迭滤波器的传递函数,  $T_1$  为 AD 的采样周期,  $T_2$  是经抽取器后的采样周期。容易理解, 为了保证不发生混迭, 抽取因子  $D$  的最大值不能超过采样时的采样率与 Nyquist 频率的比值。

#### 3.2 频谱分析算法的高效结构

频谱分析的核心是一个频分多路的算法, 其原理框图如图 4 所示。带通滤波器将所需的基频  $S_1$ 、倍频  $S_2$  和四倍频  $S_4$  分开, 乘法器将带通信号变换为低通信号。其后的三个级联低通滤波器实现了阻带的最大衰减, 这种级联方式的优点在于降低了设计难度, 并使阻带的性能更好。

与开环系统相比,由于采用了光纤线圈的本征频率作为调制频率,一方面提高了整个系统的灵敏度,另一方面又增加了 DSP 系统的运算负担;同时,闭环系统的机制又增加了对运算速度的要求。

基于这方面的考虑,

将图 4 所示的功能用多抽

样率系统中的高效等效结构来实现,以减少 DSP 系统的负担。从图 4 中可以看出,各个频率通道的带通滤波器和乘法器实际上构成了一个四通道的分析滤波器组,将  $I_{D2}(F)$  分为四个子频带后,再将带通信号平移成为低通信号。对于均匀滤波器组,由于各个频带都减少为原来的四分之一,因而抽样率也可以减少为原来的四分之一,即可以进行四倍抽取。另一方面,各个通道的滤波器  $h_k(n_2T_2)$  实际上是各自平移了  $2k\pi/4$  后的结果,因而四个通道的输出结果可以使用 DFT 一次全部计算出来,而无需对各个通道逐个计算。由于抽取器位于滤波器之后,使运算在高数据量的一端进行,在进行等效变换时将抽取器放在运算之前,以实现其高效结构,减少运算量。如图 5 所示则是以多相结构的换向形式实现的均匀 DFT 分析滤波器的框图,图中的 DFT 变换是以  $W^* = e^{j2\pi n/4}$  为权的 DFT 变换。

对于窄带信号的低通滤波器,可以等效成一个低通滤波器后接抽取器,再与一个内插器后接低通滤波器的级联。这种结构再经过等效变换,将运算变换到低数据量一端进行,就实现了低通滤波器的高效结构。图 6 给出了用  $n$  阶 FIR 实现的低通滤波器的高效形式。这种高效结构的计算量为原来的  $2/D$  倍。

### 3.3 数字解调算法

由式(2)可以看出,为了计算 Sagnac 相差  $\phi$ ,如果知道当前时刻光源强度  $I_0$ ,则仅需由任一频谱幅值便可求出相差  $\phi$ ,从而求得陀螺角速率  $\Omega$ 。然而通常情况下,光强  $I_0$  并不知道,并且  $I_0$  还有波动,为了排除光强  $I_0$  的影响,可以采用开环系统的解码算法,即

$$\tan 2\phi = \frac{S_1 J_2(2\phi)}{S_2 J_1(2\phi)} \quad (6)$$

其中,  $S_1$  和  $S_2$  分别是  $I_D$  的基频和倍频的幅度,而  $J_2(2\phi)/J_1(2\phi)$  可由  $A_2/A_4$  比值求出,即利用(7)式:

$$J_2(2\phi)/J_1(2\phi) = f(S_2/S_4) \quad (7)$$

### 4 结论

本文主要讨论了数字光纤陀螺闭环系统中的高效算法,理论分析结果表明:应用均匀 DFT 分析滤波器组和低通滤波器的高效结构,可以极

(下转第 54 页)

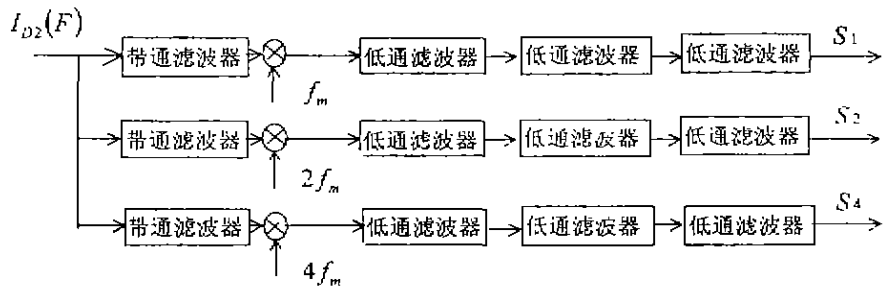


图 4 频谱分析原理框图

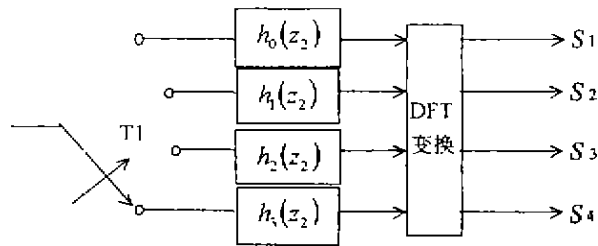


图 5 换向形式的均匀 DFT 分析滤波器的多相结构

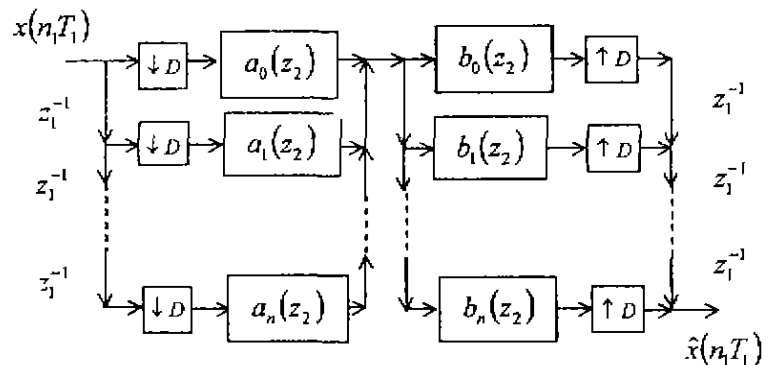


图 6 FIR 低通滤波器的高效结构

只要器件在测量系统中安装得当,外界引起的附加振动不是很大的。而且有些振动只造成器件上下平移,对器件产生离心力的贡献很小,因此,运用方案 2 在很多实用条件下是可行的。

③在实际应用中,还必须避免发生共振,因为共振一旦出现,容易损坏器件。本文的实验过程未出现共振,说明我们使用的振动频率较低,也表明系统的固有振动频率较高,远离共振状态。

④须知,任何减振技术措施只能是削弱振动,完全隔除振动从理论或实验上都是不可能的。

⑤为了探索伺服加速度计的抗振规律,本文实验研究采用的振动频率范围较宽,振动强度较大。在一般情况下,多数实用状态的振动和强度均远小于此,所以只要注意使用表 2 中 36 Hz 和 2 mm 以下的的数据,其测量偏差的程度是相当小的。即使是在实际运用中出现较大的测量偏差,如能按照本实验的方法,摸清规律,然后在信号处理软件中去除这个偏差,测量结果也会达到满意的程度。

⑥伺服加速度计广泛用于各种车、船、炮、坦克等运动设备上测量倾斜角度,所以本文的实验研究结果对于上述的各类应用具有重要的实际意义。

#### 参考文献:

- [1] 侯正君. 微机械线加速度计[J]. 压电与声光, 1996, 18(3).
- [2] 吕志清. 倾斜传感器及其技术动向[J]. 压电与声光, 1992, 14(4).
- [3] 陈福深, 张长明. 伺服加速度在抗振动干扰角测量中的应用与设计[J]. 中国惯性技术学报, 2000, 8(2).

(上接第 50 页)

大地减少运算量和存储量,并且具有设计难度低和结构简单的优点,缓解了精度与运算负担之间的矛盾,为光纤陀螺闭环系统实用化提供了有效的实现手段;同时,高效结构的应用将系统的绝大部分工作以软件完成,并在一定程度上减少了硬件的要求和设计难度,从而在保证精度的前提下极大地降低了硬件成本。

#### 参考文献:

- [1] Kersey A D, Lewin A C, Jackson D A. Pseudo-heterodyne detection scheme for the fibre gyroscope[J]. Electron. Lett., 1984, 20: 368 - 370.
- [2] Kin B Y, Shaw H J. All-fiber-optic gyroscope with linear scale factor using phase detection[J]. SPIE, 1984, 478: 142 - 148.
- [3] Stubbe R, Edwall G, Sahlgren B, Srahn R. A pseudo-heterodyne fiber optical gyro using integrated optics[J]. J. of Lightwave Technol., 1992, (10): 1489 - 1498.
- [4] Schneider M. Filters and algorithms for rotation rate detection in fiber-optic gyroscopes[J]. IEEE trans. on AES., 1994, 30: 511 - 517.
- [5] Shigern O, Masatoshi H, Hisao S, Hiroshi K. A down sampling technique for open-loop digital signal processor[J]. IEICE Trans. Fundamentals, 1995, E78-A: 971 - 977.
- [6] Cahill R F, Udd E. Phase-nulling fiber-optic laser gyro[J]. Opt. Lett., 1979, 8: 93 - 95.
- [7] Lefevre H C, Martin P, Morisse J, Simonpietri D, Vivenot P, Arditty H J. High dynamic range fiber gyro with all-digital signal processing[J]. SPIE, 1990, 1367(11): 72 - 80.