

文章编号:1000-8829(2003)03-0012-03

# 利用 DSP 实现光纤陀螺数字信号处理中的多采样率转换

## The Implementation for Multi-Rate Digital Signal Processing in FOG with DSP Devices

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100083) 于海成, 张春熹, 王妍

**摘要:**介绍了多采样率转换在光纤陀螺中的应用,通过分析并设计了多级抽取滤波器,并将此算法在 DSP 中实现。采用此种滤波方案,可以更有效地保证有用信号不产生混叠失真,从而提高了光纤陀螺的测试精度。

**关键词:**光纤陀螺;多采样率转换;抽取;混叠失真

**中图分类号:**U666.12<sup>+</sup>3

**文献标识码:**A

**Abstract:** The implementation for multi-rate digital signal processing in FOG is discussed, and a method of multi-stage decimation filters is designed. We realized the method with digital signal processor. Based on the results, we can find that, by using the method, the FOG processes lower zero drift and higher sensitivity.

**Key words:** fiber optic gyroscopes; multi-rate digital signal processing; decimation; frequency distortion

基于 Sagnac 效应的干涉型光纤陀螺,作为测量角速度的传感器,因为其全固态结构、启动时间短、体积小、质量轻、寿命长等突出优点而在航空航天等领域受到极大的重视。经过 20 多年的发展,光纤陀螺在理论上已经基本成熟,并且在工程上已经进入实用化阶段。光纤陀螺的闭环输出信号采样频率比较高,但是为了能够减小后续导航计算机的计算量,需要降低其采样频率,这就使得光纤陀螺在数字信号处理部分出现了多个采样频率。本课题基于对数字闭环光纤陀螺中的多采样率转换问题的分析和研究,设计了多级抽取滤波器,并在 DSP 中实现,使得有用信号在进行采样频率转换的过程中不会产生混叠失真,提高了光纤陀螺的测试精度。

**收稿日期:**2003-01-23

**作者简介:**于海成(1975—),男,硕士研究生,主要研究方向为光纤传感技术,数字信号处理。

### 1 多采样率转换在光纤陀螺中的应用

数字闭环光纤陀螺的结构<sup>[2]</sup>如图 1 所示。

数字闭环光纤陀螺的基本原理是在光纤环中人为地引入一非互易的补偿相移,采用阶梯波反馈以抵消由于光纤环转动产生的 Sagnac 相移,补偿相移与 Sagnac 相移大小相等,方向相反,使得光纤陀螺始终工作在灵敏度最高的零相位差点附近。光纤陀螺的动态范围达 26 位,补偿相移(相位台阶)的精确值储存在位数足够大的寄存器中,但是 D/A 转换器的位数通常取十几位,因此只取前  $N$  (D/A 的位数) 个有效位在 D/A 中用来驱动相位调制器,对 Sagnac 相移进行欠补偿或过补偿,同时将这  $N$  位有效数作为光纤陀螺的闭环输出信号<sup>[1]</sup>。

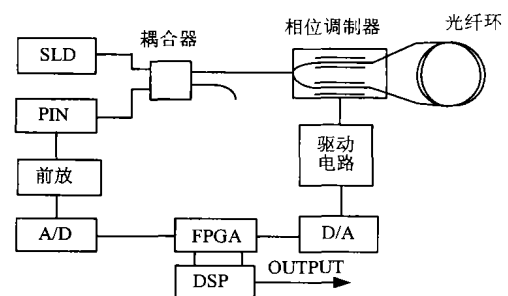


图 1 数字闭环光纤陀螺的结构框图

另一方面,光纤陀螺的闭环输出信号采样频率比较高,为了能够减小后续导航计算机的运算量,需要降低采样频率。通常算法是每采到一定数目的闭环输出数据后,累加求均值作为新序列的一个采样点输出,得到的新序列就是光纤陀螺的输出信号。因为数字闭环控制的过程中字长有限,对数据进行舍入处理时引入了量化误差,量化误差从统计意义上可以看作是白噪声序列,它与信号的关系是加性的,而且对于定点舍入误差的情况,量化误差的数学期望为零<sup>[4]</sup>。因此通过对闭环输出的数据求均值就可以减小量化误差,获得信号的真实值。

这种平均算法主要是针对消除舍入误差这样的白噪声的。但是光纤陀螺的闭环输出带宽比较大,若光纤陀螺在振动环境中,闭环输出就有可能含有较强的高频成分。仍使用这种平均算法,由于不能有效地抑制高频成分,就会导致低频的有用信号产生混叠失真。这可以从多采样率转换的角度进行分析,因为上述过程是一个多采样率转换的过程。

## 2 数字信号处理中的多采样率转换

### 2.1 基本原理

多采样率转换是指对一个已知采样频率的信号进行重新抽样,使之变为一个新采样频率的信号,若新采样频率比原来的小,将此频率转换的过程称作抽取,否则,称之为内插。本研究主要针对多采样率转换中的整数倍抽取过程进行分析,抽取的过程由图 2 给出。

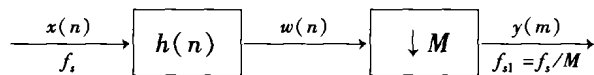


图 2 整数倍抽取框图

图中,  $h(n)$  代表数字低通滤波器,“ $\downarrow M$ ”代表  $M$  倍抽取器。因为根据采样定理,信号的最高频率必须小于或等于  $1/2$  倍的采样频率,否则会产生混叠失真。因此,在采样率转换的过程中都要用到数字低通滤波器。下面是输入信号  $x(n)$  的频谱与输出信号  $y(n)$  的频谱之间的关系<sup>[5]</sup>:

$$Y(e^{j\omega_1}) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} H(e^{j(\omega_1 - 2\pi k)/M}) X(e^{j(\omega_1 - 2\pi k)/M})$$

式中,  $\omega_1 = 2\pi f / f_{s1} = 2\pi f / (f_s / M) = 2M\omega$ , 为相对抽样频率  $f_{s1}$  的数字频率,若低通滤波器接近理想滤波器,能滤去  $x(n)$  在  $\omega = \pi/M$  以上的频率分量,那么上式中  $k > 0$  的高次项均可略去,可得

$$Y(e^{j\omega_1}) \approx \frac{1}{M} [H(e^{j\omega_1/M}) X(e^{j\omega_1/M})] \approx \frac{1}{M} X(e^{j\omega_1/M}) = \frac{1}{M} X(e^{j\omega})$$

此式说明,当滤波器为理想低通滤波器时,除了常数因子  $1/M$  外,  $Y(e^{j\omega_1})$  确实代表了原信号的频谱。但若滤波器的性能不好就会产生混叠失真,因此抽取滤波器的一个很重要的作用就是抗混叠失真。

### 2.2 抽取滤波器的选择

虽然 FIR 滤波器和 IIR 滤波器都可以用作数字低通滤波器,但是主要选择 FIR 滤波器。原因在于 FIR 滤波器比 IIR 滤波器有以下突出的优点:

首先, FIR 滤波器能严格做到线性相位,即能保持滤波器的群延迟为常数,这就保证了信号在经过频率转换后无相位失真,而 IIR 滤波器的相位是非线性的,只能在某一频段近似为线性相位。

其次,由于 FIR 滤波器是全零点型滤波器,因此总是稳定的,滤波器系数具有良好的量化性质,不会因滤

波运算的舍入误差而产生极限环震荡现象,而 IIR 滤波器则由于受有限字长的限制,容易产生舍入误差的累积而引起不稳定现象<sup>[3]</sup>。

FIR 滤波器也有不足之处,就是当对滤波器的特性要求比较高时,用 FIR 滤波器来实现往往需要比较高的节数,而 IIR 滤波器则只需要较低的节数便可实现较高性能的滤波器。由于抽取滤波算法是在 DSP 中实现,而 DSP 运算的速度非常高,因此滤波器节数的高低不是主要问题,通常还是选择 FIR 滤波器。

### 2.3 多级抽取滤波器的设计

当抽取因子  $M$  比较大时,如果只使用一级抽取滤波器来实现,则对滤波器的性能要求比较高,也就使得滤波器的节数比较高,从而使抽取滤波器的运算量和存储量都变得很大,因此这种情况下,通常使用多级抽取滤波器来实现。由于将滤波器分解成了多级滤波器,使得每一级的相对过渡带大为增加,相应的每一级滤波器的节数都大大减小,因而大大减小了滤波的运算量和滤波系数的存储量。其中第一级大多数都采用一种特殊的 FIR 数字滤波器——梳状滤波器。由于一阶的梳状滤波器的滤波特性不是很好,幅度响应中第一旁瓣峰值处仅衰减十几 dB,不能满足实际需要,因此常使用其修正形式——多阶梳状滤波器。

针对光纤陀螺的实际情况进行分析:光纤陀螺的闭环输出采样频率为几十 kHz,而最后的输出频率为几百 Hz,采样频率要降低几十倍甚至上百倍,抽取因子比较大。原来所采用的平均算法实质上就是一阶梳状滤波器,很显然,它是不能满足要求的。但是若直接使用一级抽取滤波器来实现,就会因为对滤波器的性能要求太高而使得滤波器的节数非常高,要完成抽取的运算量和存储量都很大,不能很好地达到实时性要

### PCI 总线 IEEE-488 接口卡及系列软件

西安交通大学在推广 ISA 总线 IEEE-488 接口卡 (GPIB-PC1、GPIB-PC2、GPIB-PC3) 基础上,最近又研制成功 PCI 总线的 IEEE-488 接口卡 (GPIB-PC4)。GPIB-PC4 卡符合国际标准,适用于 PCI 总线微机,通信速度相对 ISA 总线卡大大提高。与其配套的驱动软件支持 Windows 环境下 VB、VC 和 DELPHI 语言编程,也可在 LabVIEW 环境下使用。编程使用方法与 ISA 总线卡完全相同,使用方便。该卡性价比优于国外同类产品,购买方式为款到寄货,免费保修,负责解答各种技术问题,有意者请来信来电联系。

通信地址: 西安交通大学自动控制系 邮编: 710049  
电话: (029)2668665 - 263/163, 2660338, 3031079  
传真: (029)2660338, 3237910 联系人: 吴彩玲

求,因此采用多级抽取滤波器来实现。多级抽取的主要目的在于减少运算量和存储量,这两项都与滤波器的长度有关。当总的滤波器的指标给定后,各级滤波器的长度几乎完全取决于抽取的级数以及各级的抽取因子。因此,在选择多级抽取滤波器的级数以及每级抽取因子时,要保证运算量和存储量在一定范围之内,否则不能保证抽取的实时性而导致丢失数据。根据多级抽取滤波器的理论,设计了两级抽取滤波器。第一级使用一个多阶的梳状滤波器来实现,其系数均为整数,实现起来较为方便,而且承担了较大的抽取因子;第二级滤波器是一个加 Kaiser 窗的 FIR 滤波器。上述两级抽取滤波器可以实现抽取功能,而且长度较短,运算量和存储量都较小,能够满足实时性要求。

2.4 多级抽取滤波器在 DSP 中的实现

在光纤陀螺的数字信号处理中,主要使用美国德州仪器公司(TI)生产的TMS3202XX系列的DSP芯片,其结构是以C5X为基础,操作灵活,速度快,采用先进的改进哈佛结构、多级流水线、片内外设、片内存储器和专用的指令集等,其速度可高达40MIPS。而且国内市场TI公司占有率较高,且产品系列齐全,技术开发手段丰富<sup>[6]</sup>。

整数倍抽取过程如图2所示, $h(n)$ 为一 $N$ 阶的FIR数字低通滤波器,若 $h(n)$ 采用直接形式实现,可得图3所示结构形式,按照恒等关系进行换位操作,得到图4所示结构形式。比较两图可以看出,前者的运算是在采样率 $F_s$ 上进行的,而后者运算是在采样率 $F_s/M$ 上进行的,其总运算量降低了 $M$ 倍。因此选用后者进行运算, $X(n)$ 每移入 $M$ 个抽样,计算出一个输出抽样 $y(n)$ <sup>[3]</sup>。

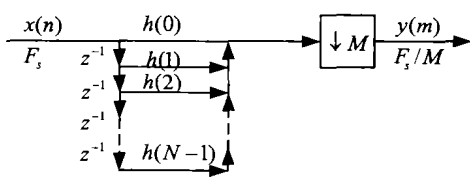


图3 FIR抽取滤波器的直接实现结构

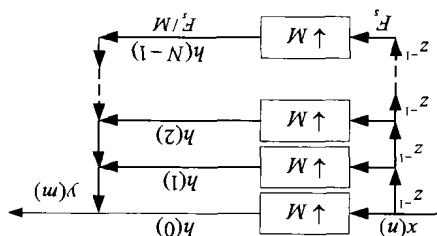


图4 换位之后的FIR抽取滤波器实现结构

按照前面的设计,将整个抽取的过程用两级抽取滤波器来实现,抽取因子分别为 $M_1$ 和

$M_2$ 。在DSP中实现上述多采样率转换的流程图示为图5所示。

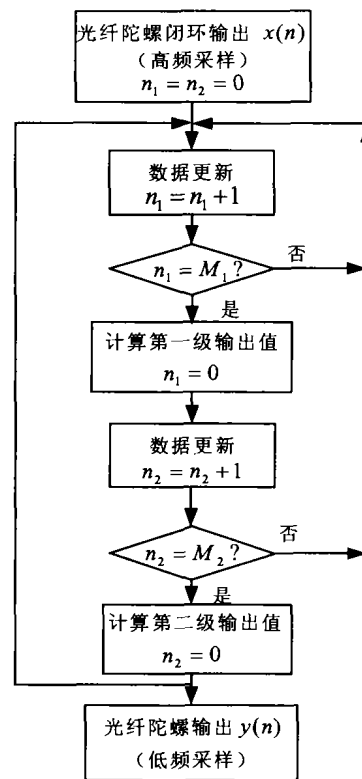


图5 在DSP中实现多采样率转换的流程图

静态情况下,在光纤陀螺中分别采用了平均算法和多级抽取算法,然后将光纤陀螺最后输出的采样频率为几百Hz的数据采集到采集计算机,并按军标要求进行处理,1s采样,10s平均,获得两组零漂测试曲线(图6、图7)。

通过对测试结果分析,发现使用多级抽取滤波器可以更有效地抑制高频成分的噪声,提高光纤陀螺的测试精度。

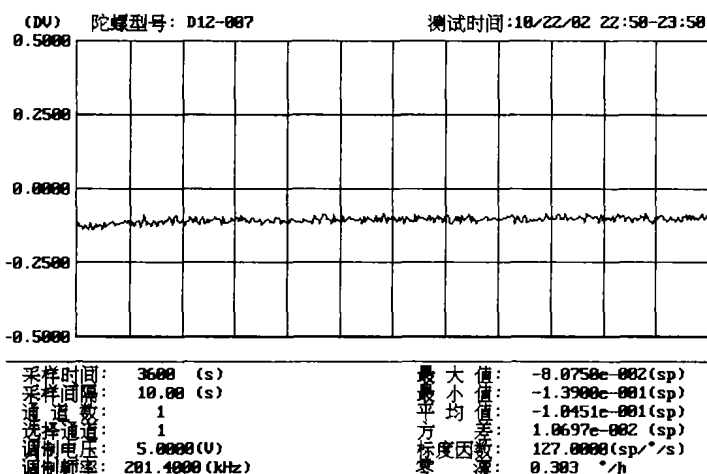


图6 均值算法的零漂曲线 (下转第19页)

表 1 为对 8PSK 和 V. 29\_fallback(7 200 b/s) 信号进行仿真实验的结果, 本研究方法与文献[5]方法的测试结果相比, 二者的正确识别率在  $E_b/N_0 \geq 0$  dB 时基本相等。需要指出的是, 此处的结果是在假设码元速率、信噪比和载波相位等参数已知的情形下得到的, 并且没有考虑同步误差和多径传播的影响, 结果是较为乐观的。本研究方法的优势主要在于建模的合理性, 与研究本方法相比, 文献[5]对星座图的建模是将信号星座图进行栅格化来实现的, 但实际中栅格大小很难明确给出, 而本研究方法利用定性定量转换模型——云模型对星座图进行建模, 则避免了这个问题, 由于云模型对星座图平面的划分是软划分, 所以更加符合信号的实际分布和人的思维方式。

表 1 对 8PSK 和 V. 29\_fallback 信号的识别结果/%

SNR/dB	8PSK	V. 29_fallback
0	93.00	94.00
5	95.00	95.00
10	97.00	99.00
15	100.00	100.00
20	100.00	100.00

## 6 结束语

本研究提出了一种新的通信信号调制识别方法, 该方法将信号星座图的形状作为识别特征, 利用知识发现的两种方法——聚类和云模型, 对接收到的通信

信号通过聚类而重建星座图, 并用云模型对星座图进行建模。该方法避免了复杂的信号处理过程。实验证明该方法是可行的。

### 参考文献:

- [1] Nandi A K, Azzouz E E. Algorithms for automatic modulation recognition of communication signals[J]. IEEE Transactions on Communications, 1998, 46(4): 431 - 436.
- [2] 朱中梁. 通信信号识别技术及其发展[A]. 技术科学与展望——院士论技术科学(2002 年卷)[C]. 济南: 山东教育科学出版社, 2002: 268 - 278.
- [3] 吕铁军, 等. 调制信号的分形特征研究[J]. 中国科学(E 刊), 2001, 31(6): 508 - 513.
- [4] Liang Hong, Ho K C. Identification of digital modulation types using the wavelet transform[A]. Proceeding of IEEE Military Communication[C], 1999.
- [5] Mobasseri Bijan G. Digital modulation classification using constellation shape[J]. Signal Processing, 2000, 80(2): 251 - 277.
- [6] 李德毅, 王晔, 吕辉军. 知识发现机理研究[A]. 中国人工智能进展[C], 2001: 314 - 325.
- [7] 范建华. 基于云理论的数据开采技术及其在指挥自动化系统中的应用[D]. 南京: 解放军理工大学, 1999.
- [8] Han Jiawei, Kamber M. Data Mining: Concepts and techniques[D]. USA: Morgan Kaufmann Publishers, 2000.
- [9] Hinneburg A, Keim D A. An efficient approach to clustering in large multimedia databases with noise[A]. In Proc. 1998 Int. Conf. Knowledge Discovery and Data Mining[C], 1998.

□

(上接第 14 页)

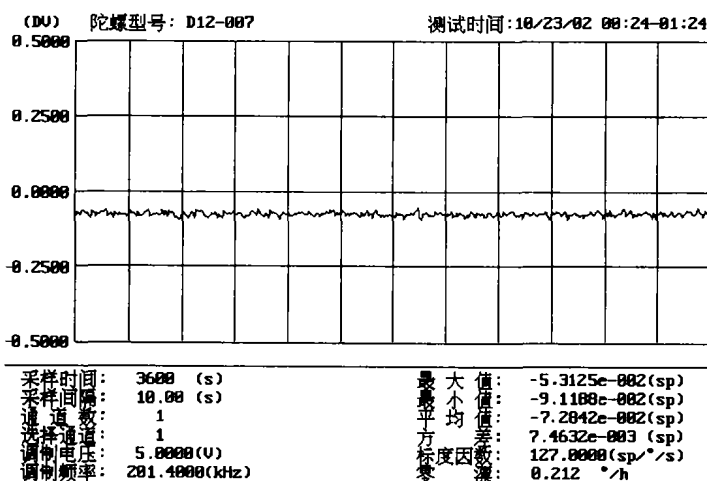


图 7 多级抽取算法的零漂曲线

## 3 结论

针对光纤陀螺数字信号处理中的多采样率转换, 设计了多级抽取滤波器, 可以更有效地防止有用信号

的混叠失真, 提高了光纤陀螺的测试精度。DSP 作为实现上述滤波算法的核心器件, 具有运算速度快、编程方便、容易实现等优点, 能够有效地完成系统的实时运算。测试结果表明, 利用 DSP 实现光纤陀螺数字信号处理中的多采样率转换是能够提高光纤陀螺的测试精度的。

### 参考文献:

- [1] Herve C. Lefevre. The Fiber-Optic Gyroscope[M]. 张桂才等, 译. 北京: 国防工业出版社, 2002: 114 - 125.
- [2] 张春熹等. 基于 DSP 的全数字闭环光纤陀螺[J]. 北京航空航天大学学报, 1998, 24(6): 695 - 697.
- [3] 刘益成等. 信号处理与过抽样转换器[M]. 北京: 电子工业出版社, 1997: 110 - 147.
- [4] 程佩青. 数字信号处理教程(第二版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001: 392 - 420.
- [5] 胡广书. 数字信号处理——理论、算法与实现[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997: 281 - 296.
- [6] 张芳兰等. TMS 3202XX 用户指南[M]. 北京: 电子工业出版社, 1998: 1 - 11.
- [7] 宗孔德. 多抽样率信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.

□