

数字闭环光纤陀螺中滤波器量化效应研究

崔未东, 潘 雄, 宋凝芳

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要: 分析了光纤陀螺中滤波器的量化效应, 提出减小滤波器截尾量化的积分补偿算法。该算法可以保证滤波器的有效精度在系统输出数据时无损失, 有效地减小数据截断产生的量化误差, 进而提高系统精度。通过实验验证了此算法的有效性。

关键词: 滤波器; 量化效应; 光纤陀螺

中图分类号: V241.5

文献标识码: A

Research on filter quantization effects in digital closed-loop fiber optic gyroscope

CUI Wei Dong, PAN Xiong, SONG Ning Fang

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Filter quantization effects were analyzed in fiber optic gyroscope, based on which the integral compensation algorithm was provided to decrease the truncated quantization error in filter. This algorithm was effective to make the filter precision high enough when data was computed out of the system. Experiments results show that the algorithm decreases the quantization error caused by filter truncation effects. And system precision is promoted obviously.

Key words: filter; quantization effect; fiber optic gyroscope

数字闭环光纤陀螺闭环数据输出与系统数据输出相比速率较高, 因此在输出前需要对数据进行降采样处理。由于降采样过程会产生频率混叠^[1-2], 因此, 光纤陀螺在闭环数据输出与系统数据输出之间加入了低通滤波器。滤波器的作用不仅可以防止频率混叠, 还可以降低系统噪声。在设计滤波器过程中, 即使滤波器的性能满足了系统要求, 但如果滤波器输入/输出数据处理不当, 也会增大系统误差, 有可能出现实际闭环系统虽然显示正常工作, 但输出却出现“死区”的情况。

FIR 滤波器相对于 IIR 滤波器设计成熟, 有许多独特的优越性, 如线性相位、稳定性等。线性相位使得所有频率分量的延迟量是一样的, 即滤波后的输出只是输入信号的一个简单的延迟信号。而如果滤波器不具有线性相位, 那么输入信号的不同频率成分延迟量是不同的, 这将会导致输出信号的失真。因此, 在实际设计中通常要回避这种情况。通过光纤陀螺系统中使用 FIR 滤波器, 对 FIR 滤波器中的量化误差进行了分析与讨论, 提

出了减小滤波器截尾量化误差的积分补偿算法。

1 滤波器中的量化误差

1.1 运算量化误差

在数字系统中由于字长有限, 使得实际滤波器特性与设计的滤波器特性存在差异, 主要表现为系数量化及滤波器中的运算量化。FIR 滤波器乘法的运算量化噪声计算比较简单。图 1 为滤波器阶数 N 为奇数时的线性相位直接形式结构流图^[3], 如系统采用定点运算、舍入处理, 而且每次乘法运算后就进行尾数舍入处理, 则输

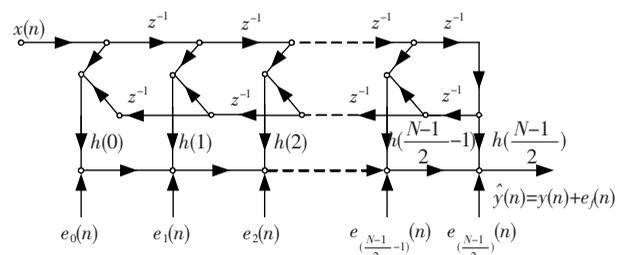


图 1 线性相位直接形式结构流图

技术与方法 Technique and Method

入端的量化噪声是其各乘法支路产生的量化噪声的叠加,其方差即为:

$$\sigma_f^2 = \left(\frac{N+1}{2}\right)\sigma_e^2 = \frac{N+1}{24} \times 2^{-2b} \quad (1)$$

式中, b 为计算字长。

由于各噪声不经过系统, 所以与系统参数无关, 而与字长及滤波器的阶数有关, 阶数越高, 则输出量化噪声越大。实际应用中可以使用多级滤波器来实现系统的要求。多级实现可以大量减小计算量、减小系统内的存储量、简化滤波器的设计、降低实现滤波器时的有限字长的影响, 即降低舍入噪声和系数灵敏度。

1.2 滤波器数据截断产生的量化误差

由于输出数据字长限制, 需要对滤波器的输出数据进行截断处理, 但数据截断会影响整个系统的精度。光纤陀螺系统中采用定点补码运算, 下面就定点制补码表数量化误差进行分析。

设有 B_0 位二进制表数的 x , 要量化为 B 位表数, 若用截尾处理, 截尾量化误差用 e_T 表示, 对于正数, 截尾量化误差为^[3]:

$$e_T = [x]_q - x = \sum_{i=1}^B b_i \times 2^{-i} - \sum_{i=1}^{B_0} b_i \times 2^{-i} = \sum_{i=B+1}^{B_0} b_i \times 2^{-i} \quad (2)$$

当被截去的各位都是 1 时, 误差最大, 即有:

$$(e_T)_{\max} = -\sum_{i=B+1}^{B_0} 1 \times 2^{-i} = -(2^{-B} - 2^{-B_0}) \quad (3)$$

当被截去各位为 0 时, 误差为 0, 因此对于正数截尾误差范围是:

$$-(2^{-B} - 2^{-B_0}) \leq e_T \leq 0 \quad (4)$$

对于负数, 二进制补码表示的真值由 $\hat{x} = -b_0 + \sum_{i=1}^{B_0} b_i \times 2^{-i}$ 决定, 量化为 B 位所引入的截尾误差 e_T 为:

$$e_T = [x]_q - x = \left(-1 + \sum_{i=1}^B b_i \times 2^{-i}\right) - \left(-1 + \sum_{i=1}^{B_0} b_i \times 2^{-i}\right) = -\sum_{i=1}^{B_0} b_i \times 2^{-i} \quad (5)$$

对比发现, 正数与负数补码截尾量化误差的表达式相同。

通常 $B_0 > B$, 有 $2^{-B} - 2^{-B_0} \approx 2^{-B} = q$, q 为最小量化间隔, 所以补码表数的尾数截尾量化误差为:

$$-q < e_T \leq 0 \quad (6)$$

为了研究量化误差对数字系统精度的影响, 必须对截尾误差的特性有所了解。对于截尾处理, 误差均值为 $-\frac{1}{2}q$, 方差均为 $\frac{1}{12} \times 2^{-2B}$ 。

从量化误差的数字特征值可以看出, 若希望量化噪声越小, 则要求字长 B 越长。同时从定点制截尾处理的误差平均值可以看出, 经量化后量化噪声产生直流分量, 这将影响信号的频谱结构。并且数字闭环检测的工

作原理使系统工作在动态调节过程时, 系统输出数据的均值跟踪系统输入量。当进入滤波器的数据与闭环反馈数据包含信息量不一致时, 会使系统测量准确度降低, 导致一定的测量误差。因此, 在设计系统时应该避免此情况的发生。

由以上分析可以看出, 截尾量化与计算过程中产生的量化误差相比是滤波器的主要误差源。

2 截尾量化误差的积分补偿算法

采用积分原理对截尾数据进行积分处理, 使截尾数据通过积分过程反应至输出中, 以此提高输出数据精度。补偿算法流程如图 2 所示。

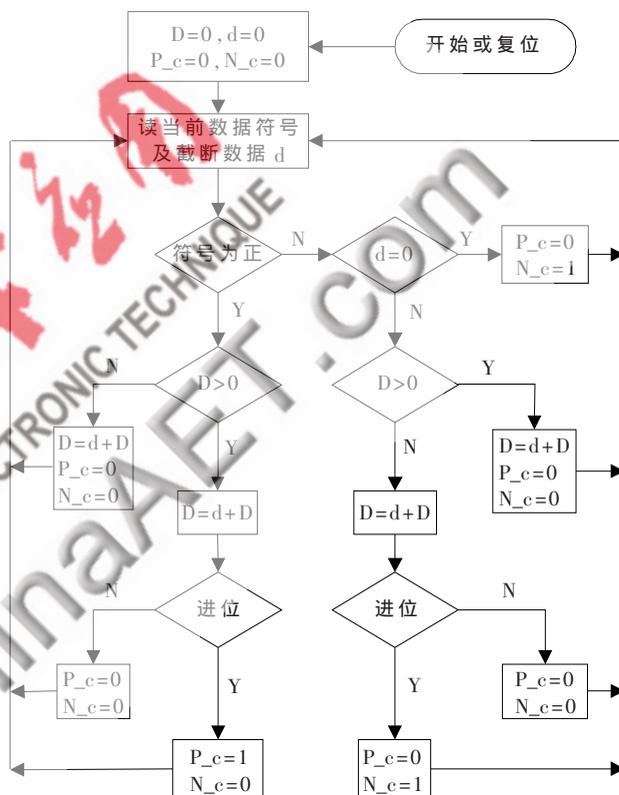


图 2 截尾量化误差补偿算法流程图

图 2 中 d 表示滤波器数据的低 36 位数据, 即滤波器截尾部分的数值, D 为积分寄存器数值, P_c 为正数进位标志, N_c 为负数进位标志。

由于截尾量化将正负数据均作了向下取整处理, 使得正负数据失去了对称性, 因此负数在进行高位截取时应该将其补码加 1, 使其与正数截尾对应。当数据为负数时, 采用 $out_data = shift_data + 1 + P_c - N_c$ 处理算法; 当数据为正数时, 则采用 $out_data = shift_data + P_c - N_c$ 处理算法, 以此来减小数据截断对系统精度的影响。其中 $shift_data$ 为滤波器输出的高 32 位数据, out_data 为陀螺输出的 32 位数据。

3 实验验证

3.1 输出数据尾数截断

更改算法前实验数据如表 1 所示。

欢迎网上投稿 www.pcachina.com 77

表 1 更改算法前实验数据

滤波器输入值	输出值	放大倍数
1	0	0.000 000 000 0
16	0	0.000 000 000 0
32	1	0.031 250 000 0
256	8	0.031 250 000 0
4 096	128	0.031 250 000 0
65 536	2 051	0.031 295 776 4
1 048 576	32 822	0.031 301 498 4
16 777 216	525 163	0.031 302 154 1
268 435 456	8 402 621	0.031 302 202 5
-1	-1	1.000 000 000 0
-16	-1	0.062 500 000 0
-65 536	-2 052	0.031 311 035 2
-268 435 456	-8 402 622	0.031 302 206 2

由于输出数据截断,滤波器输入值的低 5 bit 对输出没有任何贡献。正数输入时,无论低 5 bit 的数据为何值,对输出的贡献均为 0;而负数输入时,对输出的贡献均为-1。

滤波器输入值不同时,滤波器的输出放大倍数不一致,导致不同转速下光纤陀螺标度因数的不一致。引起的相对误差约为: $(0.031\ 302-0.031\ 25)/0.031\ 25=0.001\ 664$ 。由于存在截尾处理,使得进入滤波器的数据位权不等,最终的效果是高速时,光纤陀螺的标度因数变大。标度因数测试时,1°/s 以下的转速测量值不多,最终导致低速时,标度因数误差较大。将滤波器的数据全部输出,测得滤波器放大倍数为 0.031 302 202 8。因此,滤波器的输入数值越大,截尾量化对滤波器的输出影响越小。

3.2 使用补偿算法处理尾数

加入补偿算法后放大倍数测试结果如表 2 所示。

由于加入补偿算法后输出数据一直处于波动状态,因此表 2 只给出了计算后的放大倍数,而没有原始输出数据值。放大倍数的计算结果与计算过程中所取数据区间有很大关系,因此实验测得各输入数值对应的放大倍数有一定差异。由于光纤陀螺测量量为角速度,其积分为角度值,虽然实验数据测量过程中的均值与取值区间有关,但实际应用中系统的积分过程不会丢失信息。从

实验测得的数据可以看出,补偿算法明显改善了滤波器放大倍数的相对误差。

当输入为正负对称数据时,输出数据均值为零,表明加入补偿算法的程序对正负数据具有严格对称性,并

表 2 加入补偿算法后实验数据

滤波器输入值	放大倍数
1	0.031 302 357 893
16	0.031 302 543 085
256	0.031 302 201 446
4 096	0.031 302 202 498
65 536	0.031 302 202 784
268 435 456	0.031 302 202 769
-1	0.031 302 672 767
-16	0.031 302 245 044
-268 435 456	0.031 302 202 769

保证了对所有数据放大倍数一致性。

滤波器的截尾量化误差与计算过程中产生的量化误差相比是滤波器的主要误差源。截尾效应对光纤陀螺低速时的精度影响明显,采用积分补偿算法对数据截尾部分进行处理,保证了滤波器的有效精度在系统输出数据时无损失,该补偿算法有效地减小了数据截断对光纤陀螺输出数据精度的影响。

参考文献

- [1] 杨小牛,楼才义,徐建良.软件无线电原理与应用[M].北京:电子工业出版社,2001.
- [2] 刘益成,罗维炳.信号处理与过抽样转换器[M].北京:电子工业出版社,1997.
- [3] 应启珩,冯一云,窦维蓓.离散时间信号分析和处理[M].北京:清华大学出版社,2001.

(收稿日期:2009-09-05)

作者简介:

崔未东,男,1983年生,在读硕士,主要研究方向:信号检测。

潘雄,男,1977年生,讲师,主要研究方向:光纤传感及信号检测。

宋凝芳,女,1968年生,研究员,主要研究方向:导航系统。