

高速莫尔条纹信号单片机细分的一种方法

王跃琼

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

摘要 提出了一种莫尔条纹信号单片机细分系统, 该系统采用闪电式模数转换器(简写ADC), 可对高速莫尔条纹信号进行瞬间采样和转换, 确定出其相对应的空间角位置。最后给出了模拟实验测试结果并对细分误差进行了分析。

关键词: 高速莫尔条纹信号; 细分系统; 单片机细分; 闪电式ADC

1 引言

随着航空航天技术的发展, 需要实时性强, 高精度的角度测量系统, 由此带来了用圆光栅作为分度基准件, 产生的莫尔条纹信号频率高达125 kHz, 且要求细分160份, 从而对电子学细分系统设计有了更高的要求。常见的电阻链细分方法, 在高速情况下, 电阻分布参数, 印制板的分布参数, 比较器时延的不一致性等因素都将影响细分精度, 实现制作起来很困难。常规的单片机细分方法中, 为了改善ADC转换时间长这一不足, 广泛采用了采样保持器(简写SHA), 由于常见的SHA建立时间也不能满足高速细分系统精度要求, 必须寻求新的单片机细分系统结构以满足实际需要。对此本文提出了一种莫尔条纹信号单片机细分系统, 该系统采用闪电式ADC, 完成对高速莫尔条纹信号的采样和转换。通过模拟实验测试, 实验结果表明此种系统具有实时性强, 频响宽, 精度高等特点。

2 细分原理及系统组成

2.1 单片机“算法”细分原理

由圆光栅产生的两路正交莫尔条纹信号可近似表示为:

$$V_1 = A_s \sin \theta$$

$$V_2 = A_c \cos \theta$$

通过ADC, 采样 V_1 、 V_2 信号并转换成二进制数送入单片机, 由单片机计算出其相角, 从而确定出棋空间角位置。

$$\theta = \arctg \left(\frac{A_s \sin \theta}{A_c \cos \theta} \right) \quad (1)$$

为了适于单片机计算方便, 根据 V_1 、 V_2 转换值的正负号以及绝对值的大小, 可将一个莫尔条纹信号周期划分为八个区段, 若在一个莫尔条纹周期细分 n 份, 则 I 区段的 θ 对应的细分值为:

$$n\theta = \frac{n}{2\pi} \arctg \left(\frac{A_s \sin \theta}{A_c \cos \theta} \right) \quad (2)$$

$$0 \leq \theta < \frac{\pi}{4}$$

$$0 \leq n\theta < \frac{n}{8}$$

其它各区段可以很方便地推导出来(详见参考文献[1])

2.2 莫尔条纹信号频率、细分份数与ADC最高采样频率的关系

以其中一路莫尔系统信号为例(另一路正交信号类同, 此略), 在高速时, 看作时间信号可表示为:

$$V_1 = A_s \sin(2\pi f t)$$

$$\frac{dV_1}{dt} = 2\pi f A_s \cos(2\pi f t) \quad (3)$$

从(3)式可知, 正弦信号在过零点时信号变化速率最大。

如果在一莫尔条纹信号周期内细分 n 份, 那么每一细分值平均占用的时间 Δt :

$$\Delta t = T/n = 1/f n \quad (4)$$

设 $f n = R$; R : 频率细分因子。

为了保证ADC对信号采样转换值的准确性, 应保证下式成立:

$$R_{ADC} \geq R \quad (5)$$

R_{ADC} : ADC最高采样频率。

或者对(5)式两边取倒数, 有下式:

$$t_{ADC} \leq \Delta t \quad (6)$$

t_{ADC} : ADC转换器转换时间。

只有满足(5)或(6)式, 才能保证系统的细分精度达到设计要求。

由(4)式可以看出, 当莫尔系统信号频率较高, 细分份数又较大时, Δt 是很微小的。如莫尔条纹信号频率为125 kHz, 细分160份时, $\Delta t = 50 \text{ ns}$, 也就是说ADC必须在不大于50 ns时间内将采样的莫尔条纹信号转换完成, 否则的话ADC输出的数据就不是所对应的采样点, 发生了错码, 从而导致细分精度的降低。

2.3 闪电式ADC

对于带宽超过1 MHz的模拟信号数字化, 常常需要用到闪电式ADC(Flash ADC)。闪电

式ADC 又常被称作并行式ADC。这种类型ADC 的一个突出特点是其很高的采样频率,可用于直接转换快变的视频信号,而无需再借助SHA。

图1是典型的闪电式ADC 的结构功能框图。对N 位而言,待转换的模拟信号同时输入到 $2^N - 1$ 个带锁存的比较器中,每一个比较器的参考电压从电阻分压器中得到,每一个比较器的参考电压都比相邻的下一个高出1个LSB,当输入模拟信号出现在各比较器的输入端口时,对那些参考电压值低于输入信号电位的比较器,输出为逻辑“1”;高于输入信号电位的比较器则输出逻辑“0”;这些结果均被送往译码逻辑进行处理,最终结果以二进制输出,通常译码逻辑要求连接片内输出锁存器。

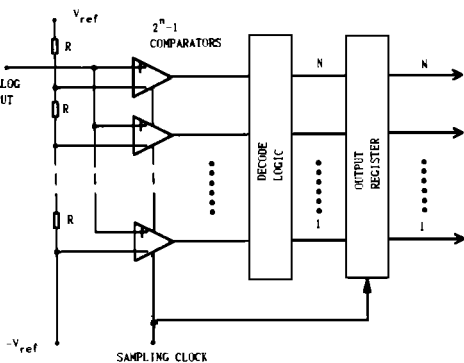


Fig 1 Diagram of N bit flash A/D converter

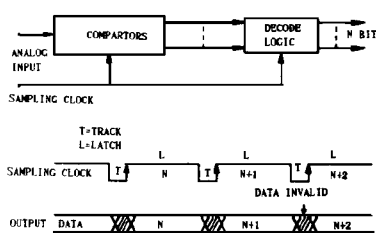


Fig 2 Flash A/D converter timing no pipeline delay

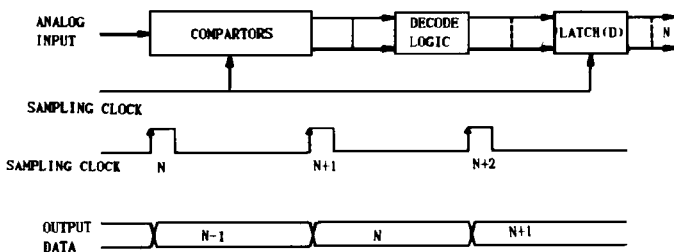


Fig 3 Flash A/D converter timing pipeline delay

没有输出数据锁存器的闪电式ADC,采样时钟与输出数据时序关系如图2所示,注意,此时输出数据有一段时间是无效的,持续期大致与时钟的脉冲宽度相当,带有内部锁存器的ADC,其时序关系如图3所示。注意,输出数据的有效期几乎是整个时钟周期,而且ADC 可以看作是边沿触发器件,具有内在的一个周期的流水延迟。

2.4 高速莫尔条纹信号单片机细分系统

高速莫尔条纹信号单片机细分系统原理图如框图4所示,此系统采用闪电式ADC 器件AD9048作为高速转换器件,

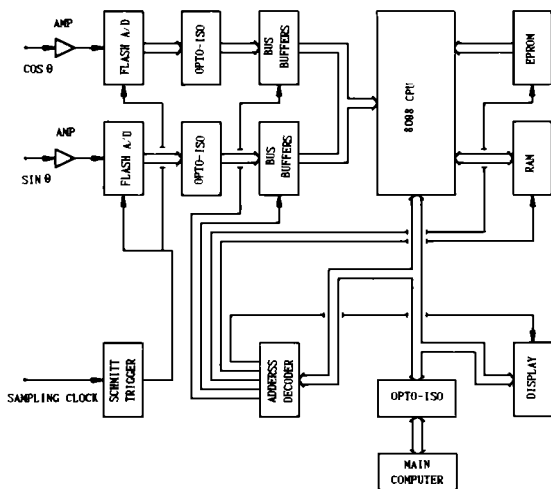


Fig 4 The diagram of subdivision system on signals of high speed moire fringe by single-chip micro computer

它最高采样频率为35 MHz, 分辨率8位, 能够满足对莫尔条纹信号频率高达125 kHz, 细分份数160份的精度要求。首先细分系统接收到采样信号, 立即(不大于32 ns)对正交的莫尔条纹信号 V_1, V_2 通过闪电式ADC 进行采样, 将其模拟量转换成二进制数据锁存起来并送入单片机, 单片机根据其数据计算出其相应的细分角度值, 与大数配合, 确定其对应的空间角位置, 并将结果送至主机。

3 模拟实验

3.1 静态模拟测试

干电池作为信号源, 用电位器调节电压幅值, 来模拟莫尔条纹信号 V_1, V_2 , 将其模拟信号输入到细分系统, 细分份数 n 为160份, 采样周期为8 ms, 测得数据如表1所示。

Table 1 Subdivision error of static simulation test

angle	error	angle	error	angle	error	angle	error
0°	0Δ	90°	0Δ	180°	0Δ	270°	0Δ
9°	- 1Δ	99°	- 1Δ	189°	0Δ	279°	- 1Δ
18°	- 1Δ	108°	- 1Δ	198°	0Δ	288°	0Δ
27°	- 1Δ	117°	- 1Δ	207°	0Δ	297°	0Δ
36°	- 1Δ	126°	0Δ	216°	0Δ	306°	- 1Δ
45°	- 1Δ	135°	0Δ	225°	1Δ	315°	0Δ
54°	0Δ	144°	- 1Δ	234°	1Δ	324°	0Δ
63°	0Δ	153°	1Δ	243°	1Δ	333°	0Δ
72°	0Δ	162°	1Δ	252°	1Δ	342°	0Δ
81°	1Δ	171°	1Δ	261°	1Δ	351°	0Δ

表1中误差单位 Δ 为一细分当量, 当细分份数160时, 有 $\Delta = 2\pi/n = 2.25^\circ$ 。从表1中可以看出静态最大细分误差: $\pm 1\Delta$ 。

3.2 动态模拟测试

用一个可以产生正交的, 频率为125 kHz 的正余弦信号发生器, 来模拟实际产生的动态莫尔条纹信号, 再用一个移相器调节采样信号, 此采样信号与信号同步, 从而保证每一次测试是在同一个采样点上, 便于调试和测量。信号与采样信号相位由相位计监测, 用上海第二电表厂生产的PX- 1C型相位计, 其分辨率为0.1°; 测量精度为 $\pm 0.3^\circ$ 。调节采样信号, 使其采样点可以在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 之间变化, 采样周期8 ms, 测得数据如表2所示。从表2中可以看出细分系统动态最大细分误差: $\pm 2\Delta$ 。

Table 2 Subdivision error of dynamic simulation test

angle	error	angle	error	angle	error	angle	error
0°	0Δ	90°	0Δ	180°	0Δ	270°	- 2Δ
9°	- 1Δ	99°	1Δ	189°	1Δ	279°	- 2Δ
18°	0Δ	108°	1Δ	198°	1Δ	288°	- 2Δ
27°	0Δ	117°	1Δ	207°	0Δ	297°	- 2Δ
36°	1Δ	126°	2Δ	216°	1Δ	306°	- 1Δ
45°	1Δ	135°	2Δ	225°	0Δ	315°	- 1Δ
54°	1Δ	144°	2Δ	234°	0Δ	324°	- 1Δ
63°	1Δ	153°	2Δ	243°	0Δ	333°	- 1Δ
72°	1Δ	162°	2Δ	252°	1Δ	342°	- 1Δ
81°	2Δ	171°	0Δ	261°	- 2Δ	351°	- 1Δ

3.3 动态幅度变化模拟测试

测试方法同上,只是对正交信号幅度进行调节,将其电压幅值同时减小25%时,细分系统动态最大细分误差: $\pm 3\Delta$ 。当正交信号电压幅值同时减小50%时,细分系统动态最大细分误差: $\pm 5\Delta$ 。

4 误差分析

4.1 由ADC转换量化误差带来的细分误差

x, y 为正交莫尔条纹信号ADC转换数据的绝对值, $0 \leq \theta < \frac{\pi}{4}$, θ 在 I 区段时, $0 \leq x < y < 128$, 量化误差 $\Delta x = \Delta y = 1/2$, 有下式:

$$d\theta = \frac{y-x}{y^2+x^2} \cdot \frac{1}{2}$$

系统设计时,总是将莫尔条纹信号峰值调整到接近于提供给ADC参考电压值。因此量化误差带来的最大细分误差: $x = 0, y = 128$ 时

$$d\theta_{\max} = 0.23^\circ$$

4.2 “计算法”中取整带来的误差

细分系统最后的显示值是对(2)式取整后所得,由此带来的细分误差接近1Δ,当细分160份时, $d\theta_{\text{th}} \approx 2.25^\circ$ 。

4.3 莫尔条纹信号幅值下降引起的细分误差

由(1)式可知,莫尔条纹信号幅值同时下降不会带来细分误差。但随着莫尔条纹信号幅值下降,由ADC转换量化误差带来的细分误差将增大。如幅度变化25%时, $d\theta_{\max} = 0.60^\circ$; 幅度变化50%时, $d\theta_{\max} = 0.90^\circ$ 。

4.4 其它因素对细分误差的影响

4.4.1 信号幅度不等

信号幅度不等时: $V_1 = A \sin \theta, V_2 = (A + \Delta A) \cos \theta$ 引起的误差:

$$\Delta \theta_{\max} = \frac{1}{2} \frac{\Delta A}{A} (\theta = 45^\circ)$$

4.4.2 剩余直流电平

$V_1 = A \sin \theta + e_1, V_2 = A \cos \theta + e_2$ 引起的最大误差:

$$\Delta \theta_{\max} = \arcsin \frac{\sqrt{e_1^2 + e_2^2}}{A}$$

4.4.3 二次谐波和三次谐波

谐波引起的最大误差:

$$\Delta \theta_{\max} = \arcsin \frac{A_2}{A} (A_2 \text{ 二次谐波幅值})$$

$$\Delta \theta_{\max} = \arcsin \frac{A_3}{A} (A_3 \text{ 三次谐波幅值})$$

4.4.4 信号不正交

$V_1 = A \sin \theta, V_2 = A \cos(\theta + \alpha)$ 引起的最大误差: $\Delta \theta_{\max} = \alpha$

由于信号不理想造成的综合细分误差:

$$\Delta \theta = \Delta \theta_{\max} + \Delta \theta_{\max} + \Delta \theta_{\max} + \Delta \theta_{\max} + \Delta \theta_{\max}$$

分析和实验表明, 信号不正交, “算法”中取整运算以及采样信号的抖动是影响细分误差的主要因素。

5 结 束 语

通过初步模拟实验, 实验结果表明高速莫尔条纹信号单片机细分系统具有实时性强, 动态范围大, 频响宽, 精度高等优点, 在航空、航天、自动控制、数控等领域具有广阔的应用前景。

孙承浦老师提供了动态模拟实验装置, 并给予了很大帮助, 在此表示感谢!

参 考 文 献

- [1] 张 彤, 王作斌 微型计算机在光电轴角编码器中的应用 长春光学精密机械学院学报, 1985, (4): 81~87.
- [2] 沈兰荪 高速数据采集系统原理及其应用 北京: 人民邮电出版社, 1995, 76~79
- [3] 王祖文 单片机高倍数光栅细分. 光学工程, 1989, (5): 51~59

Subdivision Method on Signals of High Speed Moire Fringe by Single-chip Micro Computer

Wang Yueqiong

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

Abstract

A new single-chip microcomputer subdivision system for moire fringe signals is presented in this paper. Applying flash-ADC, the system can transiently sample and convert the signals of high speed moire fringe, and determine their space position. Finally, some test results are given, and subdivision errors are analyzed.

Key words: High speed moire fringe signals, Subdivision system, Single-chip microcomputer subdivision, Flash-ADC.

王跃琼 男, 1965年1月生, 1986年毕业于长春邮电学院通信工程专业, 1992年北方交通大学通信控制系研究生毕业, 获电路与系统专业工学硕士学位。参加了获国家科技进步二等奖“圆光栅用于角度基准的研究”课题研制工作, 现从事高速测角系统研究及编码器新产品的开发。