

数字移相在原子频标领域中的应用

雷海东

(江汉大学 物理与信息工程学院, 湖北 武汉 430056)

摘要: 在被动型原子频标中, 由于相位延时及系统驰豫时间的影响, 给伺服环路的同步鉴相环节带来不便, 进而会影响系统的指标。从整机系统中参与同步鉴相的两路低频方波信号出发, 通过综合器模块中的 DDS 的 FSK 模式来调整两路方波信号的相位, 使其满足同步鉴相的要求, 并给出了调整后系统稳定度指标改善的实验结果。

关键词: 数字移相; 原子频标; 串行控制

中图分类号: TN76; TM935.113 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-0143(2012)01-0037-04

0 引言

在被动型原子频标应用领域中, 其微波探测检测环节需要两路相位差固定、频率相同的低频调制信号, 为获得这样的信号, 传统的做法是通过采用移相网络来实现, 如阻容移相、变压器移相等。这些方法由于其移相原理, 在应用上有许多不足之处, 比如: 输出波形受输入波形的影响, 移相操作不方便, 移相角度受信号频率和所接负载等因素的影响等。本文通过采用 PHILIPS 公司的 LPC900 系列单片机, 获得频率及相位差

高度稳定精确的信号, 且实现方便。

1 数字移相的实现

被动型原子频标整个系统由物理单元及电子线路两大部分组成, 如图 1 所示。电子线路部分提供微波探测信号和锁频功能, 将压控晶体振荡器 VCXO 的输出频率锁定在物理系统的原子吸收峰上, 而其中一个重要环节是为微波探测信号产生两路低频的有固定相差关系的方波信号, 这部分工作由综合器来完成^[1-2]。

在实际应用中为达到移相目的, 首先需要两

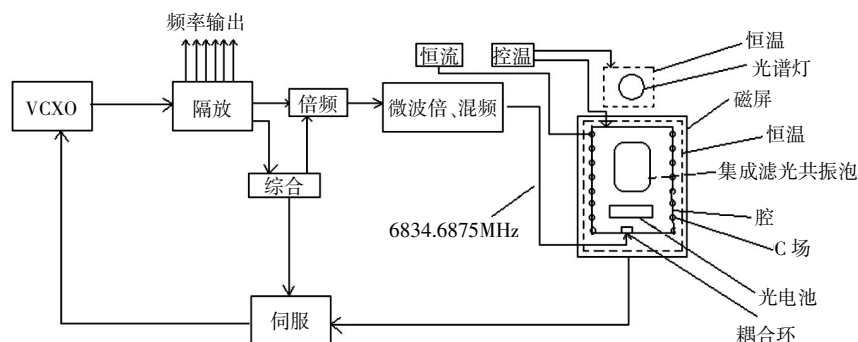


图 1 被动型原子频标原理图

路有固定相位关系的同频信号^[3-4], 如图 2 所示。A、B 两路信号的频率约为上百赫兹量级, 由于实际采用的 LPC932A1 单片机外部输入时钟最高可达 12 MHz, 在设计时, 采用单片机内部 16 位定时器实现上述各路信号。当单片机的外部时钟频

率为 12 MHz 时, 除乘法和除法指令外, 一个机器周期为 167~333 ns, 在同一时钟频率下, 其速度为标准 80C51 器件的 6 倍^[3]。为了获得频率稳定的 A、B 两路信号, 实际选用自石英晶体振荡器 (VCXO) 经隔离放大器后的 10 MHz 频率信号作

为单片机的外部时钟,其机器周期为 $0.2 \mu\text{s}$ 。对于 16 位定时器来说,最大定时时长为 $2^{16} \times 0.2 \mu\text{s}$,最小的定时时长为 $0.2 \mu\text{s}$ 。

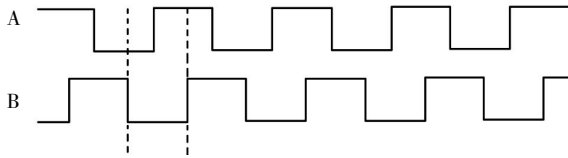


图 2 两路同频异相方波信号

在图 2 中,假定需要产生的两路移相信号 A、B 的频率为 500 Hz(即 2 ms),则需要以 1 kHz 的频率改变输出信号的高、低电平,以 LPC932A1 的 P2.0 引脚为 A 路输出信号为例,以 1 kHz 的频率对 P2.0 引脚电平取反($P2.0 = ! P2.0$)。同样的道理,可以在单片机另一个引脚 P2.2 上实现 B 路方波信号,只是 B 和 A 在相位上有一定的移相。具体的实现方法如下:

设置 LPC932A1 内部 16 位定时器的定时时间为 $0.2 \mu\text{s}$,即定时器以 $0.2 \mu\text{s}$ 为周期产生定时器中断。在相应的定时器中断服务子程序中,设置一个变量 i 进行累加循环,当 i 的值为 5 000 时,总定时时间为 $5\,000 \times 0.2 \mu\text{s} = 1 \text{ ms}$,执行 $P2.0 = ! P2.0$ 语句。实现过程如程序 1 所示^[5]。

——程序 1 定时器中断服务响应程序——

```
void Int_t0(void)interrupt 1
    // 定时器 0 中断服务程序
{
    TH0 = 0xFF; // 理论每 0.2 μs 响应中断
                // 服务程序后,重新给定时器
                // 赋初值
    TL0 = 0xFF;
    if (i > 5000) // i 记录循环总时间
    {
        P2.0 = ! P2.0; // A 路信号电平取反
        S = 1; // S 用于记录程序是否已
              // 经对 A 路信号 P2.0 引脚电
              // 平取反
        i = 0;
    }
    if (S == 1)
    {
        j++; // j 用于记录相位延时
        if (j > Data) // Data 用于记录 B 和 A
                    // 信号具体相位差值
```

```
{
    P2.2 = ! P2.2; // B 路信号电平取反
    j = 0;
}
S = 0;
}
```

2 移相精度的讨论

由程序 1 可知,程序中设置的变量 i 的值决定了产生信号的频率值, B 路信号与 A 路信号的固定相差值由变量 Data 决定,那么它的精度是多少呢?

上述提及的机器周期是由加在单片机外部时钟端信号的频率决定的,其实在每一条语句的执行中也会涉及执行周期,不同的语句根据所执行命令行为的不同可分别为 1 个、2 个、4 个机器周期,但是同一个语句执行的周期是固定的,这就为“软件延时移相”机制提供了保障。

在 LPC932A1 单片机执行的过程中,由于在定时器中断函数中插入了许多功能语句,如“赋值”、“电平转换”、“判断”语句等,这使得每一次定时器中断函数响应的时候,必须执行这些语句行,从而导致 LPC932A1 单片机在外部时钟为 10 MHz 时,实际的定时器定时周期要比 $0.2 \mu\text{s}$ 长,这就必须通过相应的软件仿真得到具体的定时周期,修正相应的 i 值来获得 500 Hz 的信号。图 3 为利用 Keil C 软件仿真时的情形。用户可以通过观察图 3 中箭头所指的数值判断定时器的具体定时周期。

假设定时器的实际定时周期为 T (s), A、B 两路信号的频率为 F (Hz), 计最小相位差为 S (度),则有

$$S = 2F \times T \times 360^\circ. \quad (1)$$

对于图 3 箭头所指的值,在实际的 LPC932A1 程序仿真时,两次响应定时器中断函数语句时的值分别为 2.332 097 92 和 2.332 097 02,即(1)式中的 T 为 $0.9 \mu\text{s}$,对于产生 500 Hz 的频率信号,最小的移相精度为

$$S = 2F \times T \times 360^\circ = 2 \times 500 \times 0.9 \times 10^{-6} \times 360^\circ \approx 0.4^\circ.$$

3 信号频率及相位值的改变

由于在 LPC932A1 内部集成了串口及 EEPROM 存储区,用户通过串口与 PC 机通讯,可以

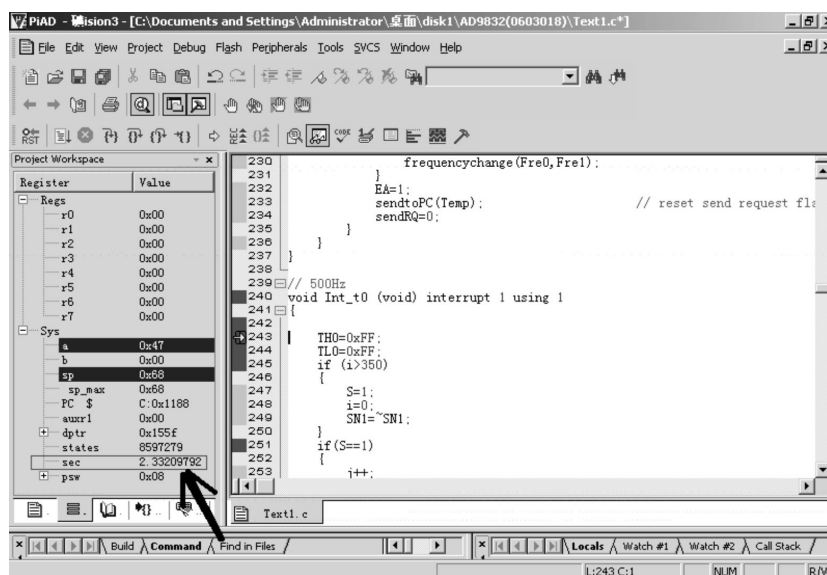


图3 Keil C 仿真界面

方便地修改程序 1 中的 i 、Data, 从而调整相应的信号频率值及相位差, 并通过片内的 EEPROM 存储这些修改后的变量值, 当单片机上电时, 从 EEPROM 中调用相应的值作为输出, 程序 2 中给出了相应的 EEPROM 操作^[6]。

——程序 2 EEPROM 读写操作程序——

void EEPROMwrite (unsigned int adr, unsigned char dat)

```
{
EA=0;          // 先关闭中断使能
DEECON=(unsigned char)((adr>>8)&0x01);
              // 设置写模式地址
DEEDAT=dat;   // 设置写数据
DEEADR=(unsigned char)adr;// 执行写操作
EA=1;
while((DEECON&0x80)==0);
              // 等待写操作完成
DEECON=DEECON&0x7F;
}
```

```
unsigned char EEPROMread(unsigned int adr)
{
DEECON=(unsigned char)((adr>>8)&0x01);
              // 设置读地址
DEEADR=(unsigned char)adr;// 执行读操作
while((DEECON & 0x80)==0);
              // 等待读操作完成
DEECON=DEECON&0x7F;
return DEEDAT; // 返回数据
}
```

4 测试结果

在被动型原子频标调制电路中引入了上述数字移相技术, 成功实现微波探测信号的检测过程。针对引入上述数字移相方案的一台原子频标, 做了以下测试, 测试用装置为 TemexTime 公司的 PicoTime 频率稳定度测试仪, 参考时钟信号选用高稳 H 钟, 其结果如图 4 所示。

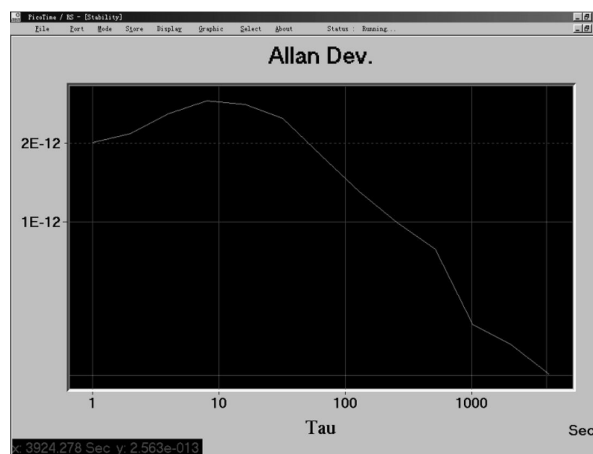


图4 频率稳定度测试曲线

在体系内优势组合原子频标整机设计中, 实际采用了秒级稳定度较高的晶振, 并将高稳晶振信号经隔离放大器后送入单片机的外部时钟输入端。由图 4 可知, 秒级稳定度已达 $2E-12$ 量级, 千秒稳定度已经优于 $1E-12$ 量级。

5 结语

在体系内优势组合的被动型原子频标中, 采

用数字芯片实现传统综合电路的参考时序及伺服环路的采样时序,提高了两路信号相位差精度,并使相位差在精度范围内任意可调。通过实际的测试结果得到:在短期内,晶体振荡器的良好短稳得到了很好的发挥;而在长采样时间上,量子系统的长期频率稳定度得到了传递。这充分说明上述数字移相中各项工作取得了比较满意的结果。由于在原子频标内部集成了数字技术,使整机体积、功耗大大减小,为日后原子频标小型化工作奠定了基础。

参考文献:

[1] Vanier J, Audoin C. The quantum physics of atomic

frequency standards[M]. Bristol: IOP Publishing Ltd, 1989.

[2] 王义道,王庆吉,傅济时,等. 量子频标原理[M]. 北京:科学出版社,1986:366-382.

[3] 雷海东,王艳,李超,等. 一种长短稳兼优的被动型原子频标:中国,200420111698.6[P].2006-03-01.

[4] 雷海东,候群,张霞,等. 改进的时域信号频率稳定度测量方法和装置:中国,200610125109.3[P]. 2007-05-16.

[5] 周立功. LPC900 系列 Flash 单片机应用技术:上册[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2004.

[6] 赵亮,侯国锐. 单片机 C 语言编程与实例[M]. 北京:人民邮电出版社,2003.

Application of Digital Phase Shift in the Field of Atomic Frequency Standard

LEI Hai-dong

(School of Physics and Information Engineering, Jiangnan University, Wuhan 430056, Hubei, China)

Abstract: The stability of the passive atomic frequency standard can be influenced by the phase delay and system relaxation time. In the servo loop of the synchronization phase discrimination, we can realize the system locked based on the synchronous pulse signal of low frequency. In this paper, the phases of two square waves are adjusted by FSK mode of DDS, in order to satisfy the requirements of synchronous phase discrimination, and the improved experimental results are list out.

Key words: digital phase shift; atomic frequency standard; serial control

(责任编辑:曾 婷)