

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.05.027

便携式在线局放信号源系统的设计*

陈慧鹏,李文欣,王堃喆,金杜挺

(杭州电子科技大学 机械工程学院,浙江 杭州 310018)

摘要:针对智能电网局部放电检测技术实际运用中的问题,对 ADF4350 频率合成器的基本原理与工作特性进行了研究,应用了锁相环、滤波器组、同步信号提取、程控开关等技术,提出了一套基于 AVR Atmega128 单片机控制 ADF4350 的硬件电路结构和软件程序设计方法,得到了一种能实际应用 in 智能电网局部放电监测的多频段信号源。现场工作人员通过用户端操作板上的简单操作,进行模式选择与设定,就可以方便地实现现场在线监测。研究表明,该信号源覆盖了局放信号的全部频点,现场测试时锁相效果良好、携带方便、性能可靠。

关键词:频率合成器;信号源;滤波器组;同步信号

中图分类号:TP273;TM71

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)05-0722-05

Design of portable discharge signal source online system

CHEN Hui-peng, LI Wen-xin, WANG Kun-zhe, JIN Du-ting

(School of mechanical engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at the discharge test problems in the practical application of the smart grid, the ADF4350 frequency synthesizer's basic principle and working characteristics were researched. Using the technologies such as phase lock loop, filter group, extraction of synchronization signal, program-controlled switch, through AVR Atmega128 chip, a hardware circuit control structure and software program design method of ADF4350 was presented, a set of multiband signal source which can apply in the smart grid partial discharge monitoring was gotten. With a simple operation in client dashboard, the field staff can conveniently realize the online monitoring after the mode selection and setting. The results indicate that the signal source can cover all signal frequency, in the field test, phase locking effect is good, easy to carry, reliable in performance.

Key words: frequency synthesizer; signal source; filter group; sync signal

0 引 言

随着智能电网的普及,局放检测仪得到迅速地发展,其中一些关键性问题,如:局放测试系统、实时高速采集技术以及干扰的抑制和局放信号的提取技术等问题,已经得到了很好的解决。KEMA 实验室的 Rutgers 等人在实验室中对变压器特高频局部放电检测技术进行了初步研究。英国 Strathclyde 大学的 Judd 等人在

GIS 的局部放电检测技术研究的基础上,也对电力设备进行了实验室研究,并在现场进行了初步实验^[1-2]。近年来国内有关研究机构对各种局部放电检测技术进行了广泛的研究,但总的来讲,国内外利用各种先进方法检测电力设备局部放电的工作大部分集中在实验室进行,现场开展的较少,缺乏大量现场实测数据的验证、调试。因此研究人员必须研制能反映所检测局放的在线信号源系统,以便真实地展现电力设备在运行

收稿日期:2014-12-12

基金项目:浙江省重大科技专项重点工业资助项目(LZ12E07001)

作者简介:陈慧鹏(1978-),男,湖北黄冈人,博士,副教授,主要从事智能电网,控制系统设计方面的研究. E-mail:hpchen@hdu.edu.cn

过程中局部放电状况。

本研究提出了一套基于 AVR Atmega128 单片机控制 ADF4350 的硬件电路结构和软件程序设计方法。

1 设计原理

设计原理图如图 1 所示。该设计利用锁相原理,宽带频率合成器根据指令合成并发出频率范围为 137.5 MHz ~ 4 000 MHz 的信号,经过滤波器组形成单纯的单载波信号。MCU 通过程控开关,结合现场 t 提取的同步信号在线精确截取操作键盘所设定的信号频段与相位。所需信号经可编程放大器(TQM8M9076)处理后,由片上天线发射。使用者可通过用户端 12864 显示屏旁的按键,查看产品运行模式资料并根据现场状况,分析、选择特定的工作模式。

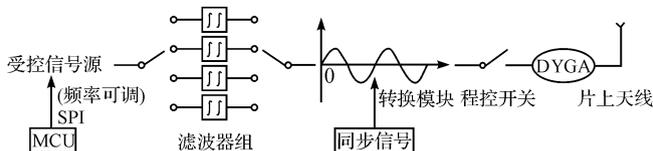


图 1 设计原理图

1.1 全数字锁相环

该设计采用了一种基于 FPGA 的可变模全数字锁相环。

在工作过程中:一方面,前馈鉴频器对输入信号进行鉴频,快速检测到输入频率的变化,并通过前馈通路改变输出信号,调整可变模分频器的分频系数,从而实现快速调频,提高了锁相速度。另一方面,鉴相器对输入信号进行鉴相,并通过具有比例积分调节作用的环路滤波器,调整可变模分频器的分频系数,从而实现精确调相,消除了输出信号的相位误差,并能有效抑制量化误差等干扰^[3]。

1.2 同步信号提取

利用同步信号实现位同步的方法有直接法(自同步法)和插入导频法(外同步法)2种,该插入导频法是在发送有用信号的同时,在适当频率位置上插入一个或多个称为导频的正弦波;直接法则不需要专门的导频,而是设法在接收信号中直接提取同步信号。直接法又分为滤波法和锁相法2种,该设计将再次使用数字锁相法。

位同步锁相法的实现原理是在提取端利用鉴相器比较提取码元和本地时钟产生的位同步信号的相位,

若两者不一致(超前或滞后),鉴相器就产生误差信号,并通过控制器调整位同步信号的相位,直至获得准确的现场同步信号为止^[4-10]。

2 系统设计

2.1 硬件设计

硬件部分主要由频率合成器、Atmega128 芯片、滤波器组、同步信号输入端、转换模块、数控可变增益放大器、片上天线、操作板、电源等组成。

2.1.1 频率合成器

该设计采用的频率合成器,结合外部环路滤波器和外部基准频率使用时,可实现小数 N 分频或整数 N 分频。锁相环 ADF4350 具有一个集成电压控制振荡器,其基波输出频率范围为 2 200 MHz ~ 4 400 MHz。此外,利用 1/2/4/8/16 分频电路,用户可以产生低至 137.5 MHz 的 RF 输出频率。对于要求隔离的应用,RF 输出级可以实现静音。诸多功能既可以通过引脚控制也可以通过软件控制。同时提供辅助 RF 输出,且不用时可以关断,ADF4350 原理如图 2 所示。

本研究利用 INT、FRAC 和 MOD 的值以及 R 计数器,可以产生间隔为 PFD 频率的分数的输出频率。RF VCO 频率公式为:

$$RF_{OUT} = f_{OUT} \times (INT + (FRAC/MOD)) \quad (1)$$

式中: RF_{OUT} —外部电压控制振荡器的输出频率,INT—二进制 16 位计数器的预设分频比,MOD—预设小数模数,FRAC—小数分频的分子。

$$f_{PED} = RFE_{IN} \times [(1 + D)/(R \times (1 + T))] \quad (2)$$

式中: REF_{IN} —基准输入频率, D — REF_{IN} 倍频位器, T — REF_{IN} 2 分频位, R —二进制 10 位可编程参考分频器的预设分频比。

2.1.2 滤波器组

信号的处理在设计伊始主要围绕隔离度的提升展开。对于 RF 功放而言,其谐波成分必须限制在一定电平以下才能避免工作时对其他设备的干扰。而单纯的放大器本身,二次谐波成分的抑制往往只有 20 dBc 左右,为了达到一定的谐波抑制指标,必须额外增加滤波器滤除谐波。当 RF 功放的工作频带超过 1 个倍频程的时候,低端频率的二次谐波就将落在工作带宽以内,此时不得不采用“分段滤波”的方式来保证宽带范围内的谐波抑制。因此该设计采用了四波段开关滤波器组。

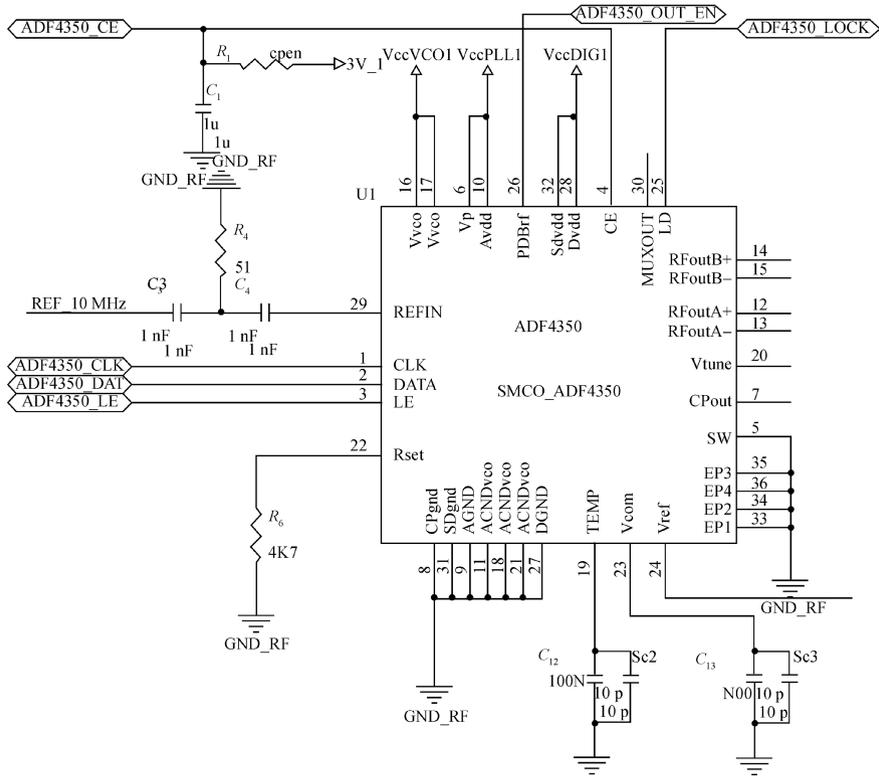


图 2 ADF4350 原理图

目前来看,多路开关滤波器组件中高低波段的相互串扰是难以避免的。虽然不能消除它,但可以通过将两组四波段滤波器串联的办法使之尽可能地减小。

2.1.3 天线与放大器

信号源产生的信号经过处理,最后将通过天线发射出去。该系统通过运用“片上天线”技术,系统在制作后期,通过更新、采用 TQM8M9076 数控可变增益放大器,使其宽带频率范围达到 50 MHz ~ 4 000 MHz,可提供范围 0.5 dB ~ 31.5 dB 数字可变增益,具有高线性度和低噪声的特点。

2.2 软件设计

整个软件的流程如图 3 所示。关键代码主要包括:片内寄存器的读写、USB 串口的通讯和 ADF4350 的寄存器写控制等。最终在硬件基础上实现:同步信号引入、特定频率合成、特定相位截取和与操作板之间的串口通信。

2.2.1 同步信号的引入

在实际的在线监测中,必须考虑现场信号源的振荡性和其受到的干扰,本研究将在上文提到的信号滤波之后,引入同步信号技术,即配合使用一个工频电流传感器(电磁式电流互感器由于铁芯的非线性特点,主要适用与额定频率的电流测量,额定频率通常为 50/60 Hz)。工频电流传感器,感应现场真实环境,输出信

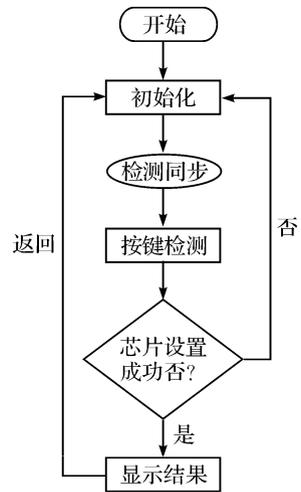


图 3 程序框图

号为 50 Hz 正弦波。经模块转换后形成相同频率的方波,利用同步信号提取技术,输入至系统内部修正信号源所发出的信号。

2.2.2 特定频率合成

特定频率合成程序功能主要是读取内部缓存区的数据写入 ADF4350 的寄存器或接收上位机的串口数据写入片内缓存区后写入 ADF4350 的寄存器。软件部分主程序正是将围绕着频率合成器展开,程序如下:

```
int main (void)
{
```

```

unsigned char buf[4];
unsigned short un_lock_num = 0;
init_led();
ADF4350_IO_INIT();//频率合成器初始化
init_select_channel_io();
init_HMC625LP5();
usart_init();//通信初始化
set_fre(1500);
while(check_fre_lock() == 0);//一直要确定信号锁定。
delay_1ms();
init_time();//定时器初始化
delay_1ms();
select_channel(3);//信号通过第一组分段滤波器
delay_1ms();
select_channel(3);//信号通过第二组分段滤波器
Write_HMC625LP5(60);
sys_fre = 1500;
while(1)
{
    if((PING & (1 < < 2)) == 4)
    {LED_ON; //指示灯亮,锁频成功
    un_lock_num = 0;}
    else
    {LED_OFF;
    un_lock_num ++;
    if(un_lock_num == 60000)
    {set_fre(sys_fre);}}
    deal_uart_dat(); //向显示屏反馈信息
}

```

2.2.3 特定相位截取

程控开关如图4所示。MCU通过SPI总线系统,设置受控信号源的频率,经过滤波后,将流向程控开关。由于通常情况下并不需要整个周期的信号都通过天线发射出来,非常有必要通过程控开关截取每个周期特定的一段相位。

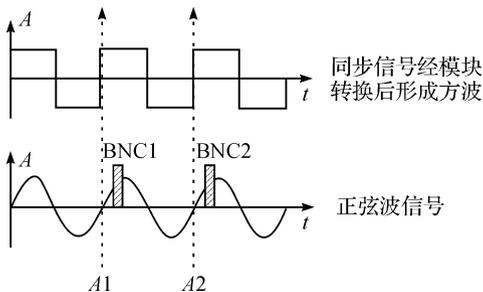


图4 程控开关

程控开关的功能主要运用软件方式实现,即针对Atmega128芯片的en引脚。通过捕捉同步信号的上

升沿(A_n),校准、锁定每一个滤波后信号周期的起始点 A_n ,再通过两个定时器中断: $A_n \sim B_n$ 、 $B_n \sim C_n$,适时打开或关闭en引脚。

2.2.4 串口通信

该设计采用的SPI是一种高速的、全双工、同步的通信总线,特别是在ADF4350芯片的管脚上只占用4根线,节约了芯片的管脚,从软件角度为硬件PCB的布局节省空间、提供方便。操作板部分主要由Atmega16芯片、12864液晶显示屏、按键和JTAG输入端组成。前期,可由专业人员根据现场需要和所匹配的局放检测仪,确定好所需的信号参数(如信号频率、截取相位等)对应简单地修改附带的c文件,通过JTAG输入端更新、导入atmega16芯片。现场使用时便可通过按键便捷地选择工作模式,经串口通信至主板,最终输出对应的信号。

3 工作特性与结果分析

3.1 技术参数与指标

分输出频率范围:137.5 MHz ~ 4 400 MHz;

程控开关截取时间间隔:10 us;

小数 N 分频频率合成器和整数 N 分频频率合成器;

具有低相位噪声的VCO;

可编程1/2/4/8/16分频输出;

均方根(RMS)抖动:小于0.4 ps rms(典型值);

电源电压:3.0 V ~ 3.6 V;

逻辑兼容性:1.8 V;

可编程双模预分频器:4/5或8/9;

可编程的输出功率;

RF输出静音功能;

三线式串行接口;

模拟和数字锁定检测;

在宽带宽内快速锁定模式周跳减少;

工作温度:-10 °C ~ +70 °C;

存储温度:-20 °C ~ +75 °C;

环境相对湿度(在25 °C时)最大日平均值:95%。

3.2 现场测试结果分析

初步调试时,本研究设置频率合成器频率为702 MHz,分别发出-70 dBc和-75 dBc的信号。现场测试图如图5所示。测试结果将显示分别为-71.70 dBc和-76.56 dBc。

尽管该系统的检测频率较高,受外界干扰小,但还

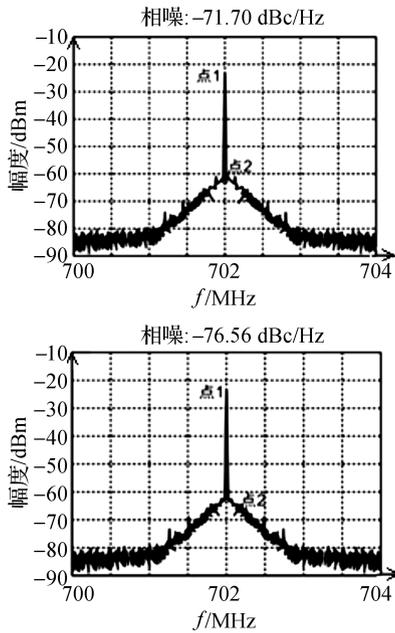


图 5 现场测试图

1—线路差损;2—噪声干扰;3—包装箱体选择不当

是存在少量的高频干扰信号。在检测系统的背景噪声中,除系统的热噪声外还存在两类比较稳定且幅值较大的干扰信号,分别为无线电干扰和手机信号。对于窄带干扰可使用软件方法予以消除。另外,因为经验不足,后期组装选用包装箱体时,没有考虑选择正规的材料,对发射出来的信号造成了一定的影响。

4 结束语

锁相环是用分立元件实现的,导致锁相环电路的体积过大,而且分立元件容易引发各种不可预见的问题。该系统与分立器件实现的锁相环相比,采用 ADF4350 实现的锁相环电路结构简单、体积小,调试工作量小,抗干扰性能好。整个系统和常用的信号发生器相比,在体积上更加便携,与局放测试仪配合使用,

将有力地保障智能电网电力设备的安全运行,推进在线监测理念的落实。在投入批量生产后,完全可以进一步集成,使整个系统主体部分体积如同一个万用电表;而在功能上则更加集成化,在射频信号质量、隔离度与 E4421B 相当的情况下,增加了程控开关、同步信号等技术。

参考文献(References):

- [1] KRIVDA A. Automated recognition of partial discharges [J]. *IEEE Trans. on D&E I*, 1995, 2(5): 796.
- [2] YANG I, JUDD M D. Propagation Characteristics of UHF Signals in Transformers for Locating Partial Discharge Source [C]. Netherlands: 13th International Symposium on High Voltage Engineering, 2003: 115-120.
- [3] 肖 帅, 孙建波. 基于 FPGA 实现的可变模全数字锁相环 [J]. *电工技术学报*, 2012(4): 2-7.
- [4] 毕成军, 陈利学, 孙茂一. 基于 FPGA 的位同步信号提取 [J]. *现代电子技术*, 2006, 20(1): 1-4.
- [5] 侯启方. 智能牵引变电站建设方案研究 [J]. *机电工程*, 2014, 31(6): 790-794.
- [6] 夏向阳. 电力变压器故障在线监测与诊断系统 [D]. 长沙: 中南大学电气与信息工程学院, 2004.
- [7] 郑 瑛, 徐彬艳, 杨 瑞. 配电变压器的实时监控 [J]. *机械*, 2013(S1): 84-91.
- [8] 凌海峰, 刘津浩, 李志新. 变压器油色谱分析与故障判断 [J]. *液压气动与密封*, 2012(5): 46-50.
- [9] 徐青山. 电力系统故障诊断及其故障恢复 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [10] RAMAMURTHY H, PRABHU BS, GADH R, et al. Wireless industrial monitoring and control using a smart sensor platform [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2007(5): 611-618.

[编辑: 李 辉]

本文引用格式:

陈慧鹏, 李文欣, 王堃喆, 等. 便携式在线局放信号源系统的设计 [J]. *机电工程*, 2015, 32(5): 722-726.

CHEN Hui-peng, LI Wen-xin, WANG Kun-zhe, et al. Design of portable discharge signal source online system [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015, 32(5): 722-726.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>