

# 基于 DDS IP 核的无线电罗盘天线信号模拟器的设计与实现

唐 曦<sup>1</sup> 李文海<sup>2</sup> 李睿峰<sup>2</sup> 吴忠德<sup>2</sup>

(1. 海军航空工程学院研究生四队 烟台 264001; 2. 海军航空工程学院科研部 烟台 264001)

**摘要:** 为了对某型机载无线电罗盘进行测试与维修,提出了一种基于 DDS IP 核的通用无线电罗盘天线信号模拟器的设计方法。首先讨论了无线电罗盘天性信号的格式与特点,然后利用 FPGA 中的 DDS IP 核来合成符合规范的无线电罗盘模拟信号,并在 Lab Windows/CVI 平台上开发了上位机软件,实现人机交互功能,可方便、灵活地对输出信号的频率、方位角和调幅系数等参数进行设置。最后用示波器对设计的无线电罗盘天线信号模拟器进行了测试,测试结果表明其各项参数都能达到设计要求,同时精简了硬件结构、节约了 FPGA 逻辑资源,并且控制更加灵活。

**关键词:** DDS IP 核;无线电罗盘天线信号模拟器;Lab Windows/CVI

**中图分类号:** TN742 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1020

## Design and implementation of radio compass antenna signals simulator based on DDS IP core

Tang Xi<sup>1</sup> Li Wenhai<sup>2</sup> Li Ruifeng<sup>2</sup> Wu Zhongde<sup>2</sup>

(1. Graduate Student Team Four, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China;

2. Department of Scientific Research, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

**Abstract:** In order to test and repair a kind of airborne radio compass, a design method of universal radio compass signal simulator based on DDS IP core is proposed. Firstly, the format and characteristics of the radio compass signal are discussed. Then, the DDS IP core in the FPGA is used to synthesize the conformal radio compass simulation signal. The host computer software is developed on the Lab Windows / CVI platform to realize the human-computer interaction function. User can set easily and flexibly on the output signal frequency, azimuth and modulation coefficients and other parameters. Finally, the design of the radio compass antenna signal simulator was tested with the oscilloscope. The test results show that the parameters can meet the design requirements, the hardware structure is compact, the FPGA logic resources are saved, and the control is more flexible.

**Keywords:** DDS IP core;radio compass antenna signal simulator;Lab Windows/CVI

## 0 引 言

无线电罗盘是供飞机测向用的重要无线电导航设备,目前广泛装备在各型飞机上。机载无线电罗盘对地面信标发射来的电磁波进行测向<sup>[1]</sup>,引导飞机沿正确航线飞行或进场着陆。机载无线电罗盘的正常工作以及良好性能对于飞机的安全飞行或着陆具有重要意义,因此需对其进行经常性的检测和维护。罗盘接收机检测是罗盘性能测试的一个重要内容,所以一个设计合理、测试精度高的天线信号模拟器对机载无线电罗盘的保障工作来说十分重要。

无线电罗盘天线信号模拟器用于模拟产生机载无线电

罗盘天线系统输出的含有导航台方位角度信息的导航信号,送给罗盘接收机,为罗盘主机的接收和定向提供信号支持<sup>[2]</sup>。传统无线电罗盘天线信号模拟器多采用以“单片机+步进电机+测角器”的机电一体化电路结构形式,利用单片机控制伺服步进电机带动测角器转子的旋转来实现无线电罗盘模拟信号方位角度的高精度、连续变化,其电路结构复杂,体积大,功耗大,且成本较高<sup>[3]</sup>。随着软件无线电技术和微电子技术<sup>[4-6]</sup>的高速发展,人们提出了用“DDS (direct digital frequency synthesis) 芯片+单片机”的结构形式来合成无线电罗盘信号的构想<sup>[7-12]</sup>,但是这种方法囿于 DDS 芯片的固有特点,不能进行灵活的设计,同时单片

机的工作频率过低,难以满足设计要求。近来,董理濛、李勇提出了“FPGA+DSP”的方案来实现无线电罗盘信号的模拟输出<sup>[11]</sup>,该方案虽然解决了“灵活性”的问题,但是并没有充分利用 FPGA 强大的设计功能,同时也缺少相应的上位机程序设计、各项技术指标不高。为克服上述不足,本文提出了基于 FPGA 的无线电罗盘天线信号模拟器设计方法,选用 FPGA 作为信号模拟器的硬件平台,通过调用 XILINX 公司开发的各种 IP 核<sup>[13,15]</sup>来合成罗盘信号,并在 Lab Windows/CVI 平台上设计了上位机软件,通过串口指令控制下位机,实现无线电罗盘信号的实时程控模拟输出。

## 1 设计需求分析

### 1.1 无线电罗盘天线系统简介

无线电罗盘的天线系统按照安装和封装方式的不同主要分为两类:分离式天线系统和组合式天线系统。分离式天线系统包括两个方向性天线和一个无方向性天线,有方向性天线由横环形天线和纵环形天线组成,无方向性天线是一个垂直天线。组合式天线系统是在分离式天线基础上附加了环匹配电路,并在结构上封装为一个独立部件<sup>[3]</sup>。环形天线在水平面内的方向性图为倒“8”字形,两个环形天线互相垂直安装,纵环形天线面与飞机纵轴平行。环形天线可以根据其方向性图来辨别无线地磁波的方向,但是存在双值性的问题,将环形天线信号进行平衡调制并叠加垂直天线信号后得到一个高频调幅方位信号,方位角  $\theta$  在此处键入公式。包含在低频部分的相位中,很好地解决了双值性的问题。

### 1.2 设计需求分析

本文研究的信号模拟器主要针对组合式天线系统,输出一个高频调幅信号,该信号的参考模型如式(1)所示<sup>[7]</sup>。

$$u = E_A [1 + m \sin(\Omega t + \theta)] \sin \omega_c t \quad (1)$$

式中:  $E_A$  为调幅信号载波的振幅,  $m$  为调幅系数,  $\Omega$  为平衡调制信号的角频率,  $\omega_c$  为载波角频率。

将式(1)展开得:

$$u = E_A \sin \omega_c t + E_A m \sin(\Omega t + \theta) \sin \omega_c t \quad (2)$$

式中:  $E_A \sin \omega_c t$  为垂直天线信号,  $E_A m \sin(\Omega t + \theta) \sin \omega_c t$  为环形天线信号经  $90^\circ$  移相、平衡调制后的信号,其中飞机的方位角  $\theta$  包含在低频信号  $\sin(\Omega t + \theta)$  中。

将低频信号展开可得:

$$\sin \Omega t \cdot \cos \theta + \cos \Omega t \cdot \sin \theta \quad (3)$$

无线电罗盘的工作频率为  $100 \text{ kHz} \sim 1.8 \text{ MHz}$ ,因此要求信号模拟器输出信号的频率能够在此范围内可调;为保证测向精度,两个环形天线信号振幅相等且不大于垂直天线信号的振幅,故要求调幅系数  $m$  可调;为模拟组合天线系统输出信号方位角的高精度,连续变化,则要求方位角  $\theta$  在  $[0, 2\pi]$  范围内可调。综上所述,设计的无线电罗盘天线信号模拟器需满足以下条件:

1) 输出  $100 \text{ kHz} \sim 1.8 \text{ MHz}$  范围内的高频调幅信号,

频率分辨率为  $5 \text{ Hz}$ ;

2) 输出的高频调幅信号的调幅系数  $m$  在  $[0.7, 1]$  范围内可调;

3) 输出的高频调幅信号的方位角  $\theta$  在  $[0, 2\pi]$  范围内可调,模拟方位精度设为  $0.1^\circ$ 。

## 2 硬件设计

### 2.1 结构组成

信号模拟器的硬件由 FPGA、USB 转串口芯片、D/A 转换模块、A/D 转换模块、幅度调节电路和低通滤波器 (low-pass filter, LPF) 等部分构成,其结构如图 1 所示。USB 转串口芯片把上位机输入的 USB 信号转换为串口信号后输出给 FPGA。A/D 转换模块对罗盘接收发送过来的低频信号进行采样并发送给 FPGA。FPGA 根据上位机的控制指令与 A/D 转换模块接收的低频信号合成频率、方位角和调幅系数等参数符合需求的数字信号。数字信号 D/A 转换后得到模拟信号,最后经 LPF 滤除毛刺和幅度调节电路设定幅度后输出一个高频调幅信号。

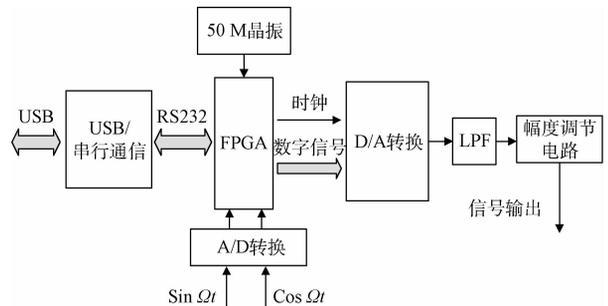


图 1 信号模拟器的硬件结构

### 2.2 电路设计

FPGA 采用的是 XILINX 公司的 SPARTAN-6 系列的 XC6SLX9 芯片,其采用成熟的  $45 \text{ nm}$  低功耗铜制技术制造,能够提供高效的双寄存器 6 输入查找表 (LUT) 逻辑和一系列丰富的内置系统级模块,内含一万多个逻辑单元,最高工作时钟可达  $500 \text{ MHz}$ ,具有很强的计算能力。由  $50 \text{ MHz}$  的高精度固体晶振为其提供时钟信号。

D/A 转换电路的功能是将 FPGA 生成的数字信号转化成模拟信号,其采用的是 AD 公司的 AD9708 芯片,数据宽度为 8 位,最大采样率为  $125 \text{ Msps}$ ,无线电罗盘信号的频率最大  $1.8 \text{ MHz}$ ,故满足设计需求。A/D 转换电路对低频信号进行采样,转换成数字信号,采用的是 AD9280 芯片,数据宽度为 8 位,最大采样率  $32 \text{ Msps}$ ,满足低频信号对采样速率的要求。

低通滤波器主要实现滤除信号高频部分的功能,以输出光滑曲线的连续波。针对罗盘信号的特点,设计了 7 阶巴特沃斯低通滤波器,滤波器参数如图 2 所示。滤波之后,采用 2 片高性能的运放 AD8056 芯片,实现差分变单端和

幅度调节等功能。幅度调节,使用的是 5 K 的电位器,最终的输出范围是  $-5 \sim 5$  V。

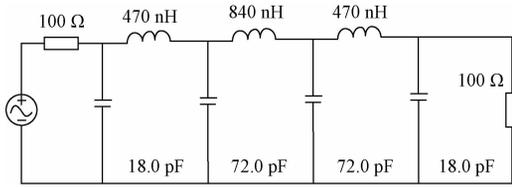


图 2 巴特沃斯低通滤波器

### 3 软件设计

#### 3.1 FPGA 软件设计

FPGA 软件设计是无线电罗盘天线信号模拟器的核心部分,主要分为串口通信模块与信号生成模块,串口通信模块的功能是与上位机进行通信,将接收到的控制字储存在寄存器中并立即返发给上位机进行回读,同时再发送给信号生成模块;信号生成模块则根据收到的控制字,调用多个 DDS IP 核来合成组合式天线系统信号。DDS IP 核是在 DDS 技术的基础上进行开发的,为更好地理解 DDS IP 核的原理和功能,下面对 DDS 技术其进行简要的介绍。

DDS 是从相位的概念出发直接合成所需波形的一种频率合成技术,其组成主要包括相位累加器、波形存储器、数模转换器 (digital-to-analog converter, DAC)、LPF 和参考时钟几部分,原理框图如图 3 所示。相位累加器每个时钟周期累加一次频率控制字,将得到的相位码作为波形存储器的寻址地址,使之输出相应的幅度码,经数模转换、低

通滤波后输出一个连续变化的波形<sup>[10]</sup>。输出频率  $f$  为:

$$f_o = k \cdot f_c / 2^N \quad (4)$$

式中: $k$  为频率控制字; $f_c$  为参考时钟频率; $N$  为相位累加器位数。

频率分辨率  $\Delta f$  为:

$$\Delta f_o = f_c / 2^N \quad (5)$$

DDS 的参考时钟一般为固定频率的信号源,可调整空间不大,因此由式(4)、(5)可知,输出信号的频率、频率分辨率分别由频率控制字  $k$ 、相位累加器位数  $N$  来决定。DDS IP 核很好地借鉴了 DDS 技术的原理,预留了可编程的频率控制端口和相位控制端口,用户可以根据自己的实际需求灵活地设置输出信号的频率、相位。此外,DDS IP 核还有设置频率分辨率的选项,提高了信号合成的精度。用户对 DDS IP 核的接口参数进行配置后就可以直接调用这些模块,这样不仅节省了 FPGA 的逻辑资源,还提高了设计效率。

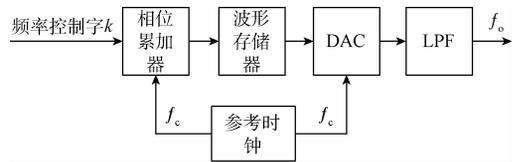


图 3 DDS 的原理

信号合成过程如图 4 所示,由式(2)可知,组合式天线系统的输出信号主要由垂直天线信号  $E_A \sin \omega_c t$  与平衡调制后的环形天线信号  $E_A m \sin(\Omega t + \theta) \sin \omega_c t$  叠加而成,因此必须首先合成这两路信号,然后再相加,具体步骤如下。

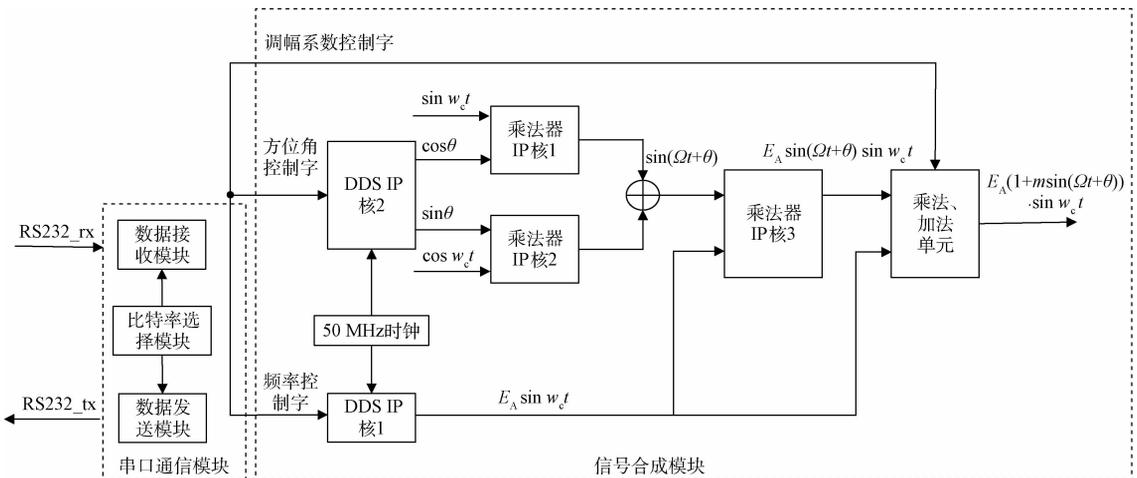


图 4 FPGA 软件设计原理

1)DDS IP 核 1 接收到频率控制字后生成高频载波信号,即垂直天线信号,频率控制字为 24 位二进制数,参考时钟为 50 MHz,由式(5)可知,输出信号频率的分辨率为 3 Hz,可满足设计要求。

2)摒弃了用 PROM 芯片存储方位角的正弦波形值的方法,由式(4)可知,当频率控制字  $k$  取 0 时,输出信号频率为 0 Hz,故可采用 DDS IP 核来产生  $\sin \theta$  和  $\cos \theta$  的值,方位角控制字为 16 位二进制数,因此方位角分辨率为  $0.005^\circ$ ,

满足设计需求。如此不仅保证低频信号的方位角精度,还大大节约了 FPGA 的逻辑资源、提高了效率。

3)  $\sin\theta$ 、 $\cos\theta$  与  $\sin\Omega t$ 、 $\cos\Omega t$  相乘后相加生成包含方位角  $\theta$  信息的低频信号。

4) 两路信号经乘法器相乘后得到平衡调制信号,调制信号与调幅系数  $m$  相乘后再和高频载波信号进行叠加,最后输出所需的组合式天线系统信号。

### 3.2 上位机软件设计

在 Lab Windows/CVI 平台上设计了上位机软件,主要实现控制信号模拟器输出信号的频率、相位,调幅系数的功能。开发了一个人机界面友好的程序面板,如图 5 所示,上面有频率、相位、调幅系数等参数的设置端口,用户可在规定范围内进行设置,当超出范围时将发出警告,参数需重新输入,当输入有效时,参数设置值将被转化为 FPGA 实际需要的控制字并通过 USB 接口依序发送出去。为保证 FPGA 实际接收的控制字的准确性,特设计了控制字回读功能,将 FPGA 发回的控制字与上位机发出的控制字进行比较,当二者不同时将发出警告,指示灯变红。最后程序回到参数设置状态,流程如图 6 所示。

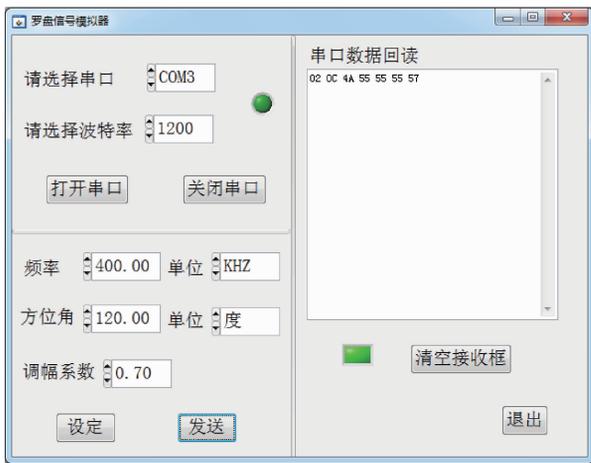


图 5 上位机程序面板

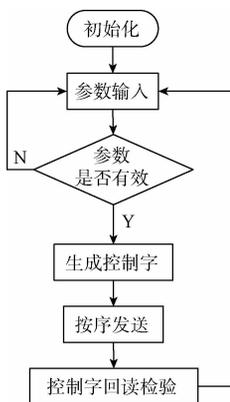


图 6 上位机程序流程

## 4 实验验证

硬件调试完毕后,在上位机上设置频率为 400 kHz,方位角为  $120^\circ$ ,调幅系数为 0.7,并用示波器测得输出信号如图 7 所示。由图 7 可知输出信号频率为 400.001 kHz,频率精度小于 3 Hz,调幅系数为 0.7,达到了设计要求。为检测方位角的模拟精度,分别把低频基准信号和方位角设置为  $60^\circ$  的信号模拟器信号输入示波器测相位差,如图 8 所示,时间差  $\Delta t = 1.2333$  ms。

$$\Delta\theta = \Delta t \cdot 360/T \quad (6)$$

由式(6)计算可得其相位差  $\Delta\theta$  为  $59.94^\circ$ ,方位角误差为  $0.06^\circ$ ,满足精度要求,式中  $T$  为低频信号的周期。综上所述可知,基于 DDS IP 核设计的无线电罗盘天线信号模拟器达到了总体设计需求,性能好,精度较高。

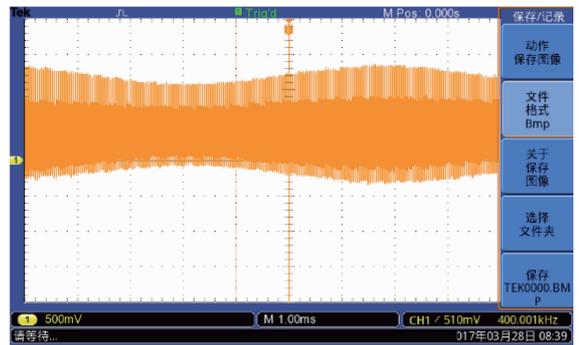


图 7 模拟的组合式天线信号

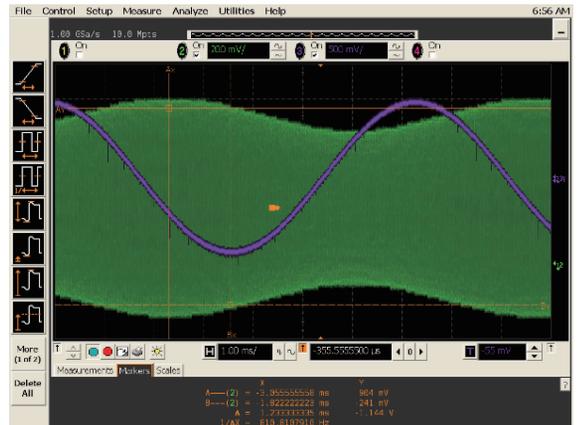


图 8 基准信号和罗盘信号

## 5 结 论

本文基于软件无线电理念,提出了一种基于 FPGA 的无线电罗盘天线信号模拟器设计方法。该方法与其他方法相比结构更加紧凑、设计更加灵活;采用调用 DDS IP 核的方式来设计 FPGA,提高了设计效率、节约了 FPGA 逻辑资源;交互性好的人机界面使用户可方便、灵活地设置

频率、相位和调幅系数等参数,便于实时控制。实验结果表明,该无线电罗盘天线信号模拟器,实现了对100~1.8 kHz频率范围、 $0\sim 2\pi$ 范围内方位角的组合式天线信号的高精度模拟,能满足无线电罗盘的测试需求。

## 参考文献

- [1] 陈高平,邓勇. 航空无线电导航原理[M]. 北京:国防工业出版社,2008:81-82.
- [2] 于潞,唐金元. 无线电罗盘信号模拟器的设计与实现[J]. 仪表技术,2012,41(5):39-41.
- [3] 于潞,唐金元,刘水. 基于振幅比例变换法的程控型无线电罗盘信号模拟器设计[J]. 仪表技术,2012,41(7):31-34.
- [4] 陈迪,刘旺锁,姚直象. 基于DDS的声呐信号发生器设计与实现[J]. 国外电子测量技术,2012,31(5):74-77.
- [5] 魏岳伦,岳庆英,齐庆堃,等. 基于Nios II的DDS函数信号发生器[J]. 国外电子测量技术,2016,35(7):13-16.
- [6] 陈科,叶建芳,马三涵. 基于DDS+PLL技术的频率合成器的设计与实现[J]. 国外电子测量技术,2010,29(4):43-47.
- [7] 黄家成,董庆洋,黄国庆. 基于AD9959的无线电罗盘天线信号产生器设计[J]. 测控技术,2016,35(9):138-141.
- [8] 汪健,丁国臣,姜茂仁. 单片机控制下的AD9854在无线电罗盘模拟信号中的应用[J]. 2007(16):52-54.
- [9] 岳伟平,唐金元,于潞,等. 无线电罗盘的天线信号模拟器的电路设计[J]. 计算机测量与控制,2011,19(7):1678-1680.
- [10] 张鹏明,魏俊淦,田建学. 试论DDS技术在无线电罗盘中的应用[J]. 科技信息,2007(18):98-99.
- [11] 赵冬梅,姜茂仁,王伟斑. AD9854在无线电罗盘测试信号源中的应用[J]. 科技信息,2007,7(17):22-23.
- [12] 赵孙毅刚,吕凤桐,张文林,等. 机载无线电导航系统集成射频激励器的设计与实现[J]. 科学技术与工程,2015,15(33):243-248.
- [13] 董理濛,李勇. 基于软件无线电的罗盘激励器系统设计[J]. 现代电子技术,2014,37(3):38-41.
- [14] 张献伟,任志良,陈光,等. 基于Xilinx\_FPGA\_IP\_CORE的可调正弦信号发生器设计[J]. 电测量技术,2009,32(5):1-4.
- [15] Xilinx Inc. DDS complier v5.0 product specification[M]. USA: Xilinx 2005.

## 作者简介

**唐曦**,1992年出生,硕士研究生,研究方向为自动测试系统。

E-mail:910073134@qq.com

**李文海**,1969年出生,博士生导师,研究方向为自动测试系统集成。

E-mail:ythylwh@vip.163.com