

# 基于FPGA的雷达天线方位角信号的模拟系统

廖小芳

(电子科技大学成都学院电子工程系 成都 611731)

**摘要:** 为满足天线离线状态下的雷达测试需求,设计开发一种基于FPGA的雷达天线方位角信号的模拟系统。雷达天线方位角信号的模拟对雷达信号处理机性能的测试显得尤为重要,设计以伺服控制输出的PWM信号、电机转动方向控制信号和制动信号作为输入参数,计算出雷达天线的方位角位置,并转换为光电编码传感器的脉冲信号输出给雷达信号处理机。该模拟系统具有输入输出信号属性与雷达天线单元一致、易实现等优点,并已应用于某型雷达测试系统,实践证明效果良好。

**关键词:** FPGA; 雷达天线; 方位角; 光电编码

**中图分类号:** TN955    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** 510.70

## Signal simulation system of radar antenna azimuth based on FPGA

Liao Xiaofang

(Department of Electronic Engineering, Chengdu College of University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** In order to meet the need of radar testing in the state of antenna being off-line, a signal simulation system of radar antenna azimuth based on FPGA is designed. The signal simulation of radar antenna azimuth is very important for the test of radar signal processor. The PWM signal, direction control signal and braking signal of motor given by servo control system are used to compute the azimuth position of radar antenna which is processed to be simulating pulses of optical encoder sensor and outputted to radar signal processor. The simulation system has such advantages as that the attributes of input/output signal are in line with those of radar antenna and the method is simple to implement, which has been applied to the radar testing system of a certain type. Practice proves that the effect is good.

**Keywords:** FPGA; radar antenna; azimuth; optical encoder

## 1 引言

某型号雷达信号处理机在测试过程中会脱离雷达天线单元,需测试设备为雷达信号处理机提供天线方位角数据,以实现雷达综合性能的检测。目前,雷达天线转角数据的模拟系统多以搭建硬件电路的形式出现<sup>[1-2]</sup>,系统输入输出接口一旦固定就不易改变,不能适应灵活的测试需求。因此,针对某型号雷达测试系统的特殊性,基于FPGA应用开发技术,运用硬件描述语言VHDL设计了一个简单可行的天线方位角信号模拟系统,以PWM信号、电机转动方向控制信号、制动信号等控制参数计算雷达天线当前所处的方位角度并转换为模拟脉冲输出,实现对天线方位角数据的实时模拟和光电编码传感器脉冲信号的模拟,并提供给雷达信号处理机进行性能测试或故障检测。该方法相对于全硬件电路方法具有控制方法灵活、实现简单,输出的方位角信号精度高等优点。

## 2 总体方案

雷达天线方位角模拟系统以Altera公司的FPGA芯片为控制核心,由PWM占空比测量模块、角度模拟模块、光电编码器时序模拟模块、UART通信接口模块、时序控制模块等组成,如图1所示。其中,UART通信接口模块通过RS485与上位机通信<sup>[3-4]</sup>,实现角度预置等控制指令的接收和解析及上传角度信息等,时序控制模块利用PLL进行时钟管理,产生各模块需要的工作时钟,PWM占空比测量模块对输入的PWM信号的占空比进行测量,并将占空比数值传送给角度模拟模块,角度模拟模块则以占空比数值、电机转动方向控制信号、制动信号等控制参数计算雷达天线当前所处的方位角度,然后由光电编码器模拟模块将此二进制角度数据转换为光电编码器传送的格雷码形式,并根据同步时钟模拟光电编码器接口的脉冲输出。其中,PWM占空比测量模块、角度模拟模块、光电

编码器时序模拟模块为该设计的核心,其他电路模块在相关文献中均有详细介绍,这里不再赘述。

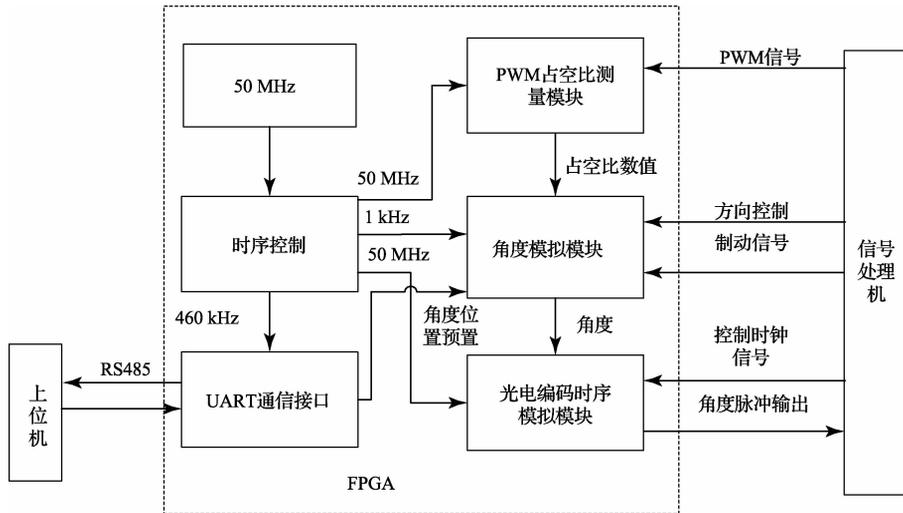


图1 雷达天线方位角模拟系统

### 3 PWM 占空比测量模块

如图2所示,PWM占空比测量是在被测信号的周期里对标准信号计数<sup>[5-6]</sup>,以50 MHz标准时钟为基准,设计2个计数器,首先用计数器1分别对被测PWM信号的高脉冲进行计数得到nh,然后用计数器2对低脉冲计数得到nl,则整周期计数n为nh和nl之和。占空比的计算通过调用除法模块,根据nh和n的商值,得到占空比。由于用百分比表示占空比牵涉小数运算,增加了运算复杂性,因此实际处理过程中将nh乘以10后再除以n得到占空比数值,如占空比为60%,占空比数值为6。

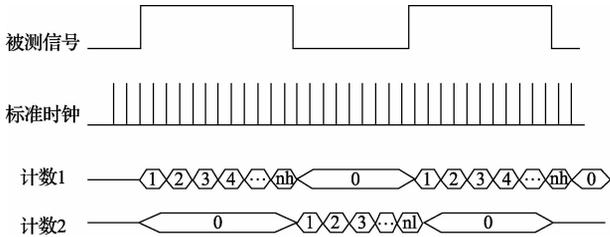


图2 PWM占空比测量原理

PWM占空比测量具体实现如图3所示。

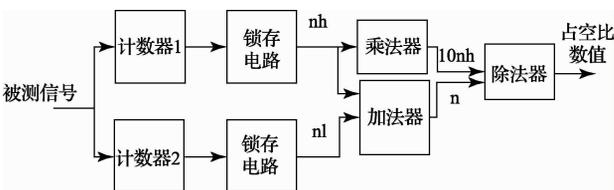


图3 角度数据模拟模块

### 4 角度数据模拟模块

控制天线运转时,由伺服控制输出PWM信号、电机转

动方向控制信号及制动信号来控制电机转动,电机通过机械传动装置驱动天线转动<sup>[7]</sup>。因此模拟的天线方位角根据PWM占空比、电机转动方向控制信号及制动信号参数来计算,可以用式(1)来描述:

$$\theta^* = \theta + bDIR(k \cdot R)\Delta t \tag{1}$$

$$b = \begin{cases} 0 & \text{制动有效} \\ 1 & \text{制动无效} \end{cases}$$

式中: $\theta^*$ 为雷达天线当前时刻的方位角, $\theta$ 为前一时刻的方位角, $b$ 为制动系数,当制动信号为1表示制动有效此时**b**值为0,制动信号无效时**b**值为1, $DIR$ 为电机转动方向控制信号,左转为1,右转为-1, $k$ 为比例系数,由天线转角转速和占空比的比值决定, $R$ 为PWM占空比数值, $\Delta t$ 为角度值计算的间隔时间。

由式(1)计算雷达天线方位角,天线运行行程方位角为 $-180^\circ \sim 180^\circ$ ,对应十六进制数字量为0~FFFFH,由此可知方位角 $1^\circ$ 对应十进制数字量为182。根据测得的数据,PWM在一定周期范围内,占空比为10%~60%时,天线转速与PWM占空比近似呈线性关系,这样可以将天线转速与PWM占空比的比值**k**近似为常数。因此,本设计主要模拟PWM占空比为10%~60%时的角度数据,此范围能满足某雷达测试要求。根据测试数据,占空比为10%时,天线转速为,对应十进制数字量变化为1274/s,若 $\Delta t$ 取1 ms,则转速的十进制数字量变化为1.274/ms,经过舍去小数部分后, $k$ 取1,占空比字R取值范围为1~6。以50 MHz标准时钟分频后产生1 kHz的控制信号,满足 $\Delta t$ 为1 ms的时间间隔,每当检测到1 kHz控制信号的上升沿使 $\theta$ 增加,则得到当前天线角度数据 $\theta^*$ ,根据式(1)可知 $\Delta\theta$ 的值为**b**、 $DIR$ 、 $R$ 的乘积。

角度数据模拟模块的具体实现流程如图4所示,其中ang\_dat表示角度数据,brake\_in和dir\_in分别为电机制动信号和电机转动方向控制信号,ZHKB表示占空比数值。

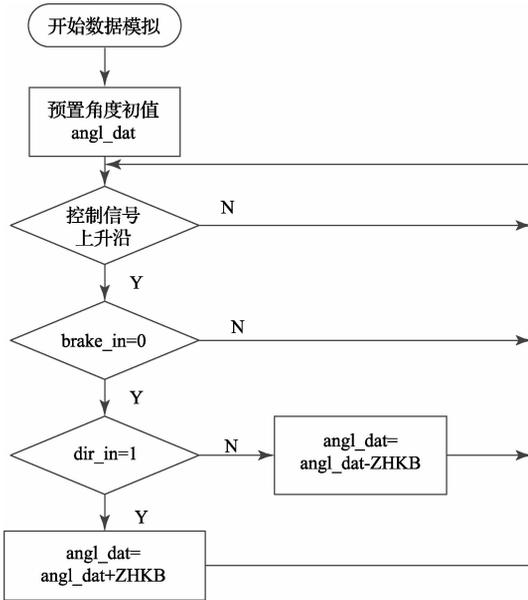


图 4 角度数据模拟模块的实现流程

### 5 光电编码器模拟模块

光电编码器模拟模块模拟的编码器精度为 16 位, 首先将模拟的天线角度的二进制数据转换为 16 位格雷编码<sup>[8]</sup>, 并根据同步时钟产生编码器输出的脉冲信号。光电编码器模拟模块的数据传输时序<sup>[9-10]</sup>如图 5 所示, clock 为同步时钟,  $T_p$  为时钟序列脉冲间隔, 表示上一帧同步时钟脉冲信号和下一帧信号的间隔,  $T$  为同步时钟周期。开始传输数据时, 由信号处理机向编码器模拟模块发送一帧同步时钟脉冲信号, 脉冲个数为 16 个, 光电编码器模拟模块则检测同步时钟的时钟序列脉冲间隔, 以 50 MHz 时钟对高电平进行采样计数, 当高电平的计数值大于一个同步时钟周期, 则认为此高电平为同步时钟的时钟序列脉冲间隔, 则从最高有效位 (MSB) 开始传输数据。在时钟信号第一个下降沿, 如“1”位置, 将角度数据的 16 位格雷码锁存, 在随后的第一个时钟上升沿, 如“2”位置, 将锁存的角度数据送出, 即最高有效位 MSB 被送出, 此后依次送出其他有效位, 直到最低有效位 LSB 被送出, 输出传输周期结束。

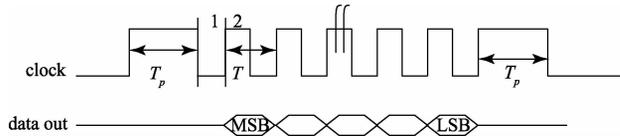


图 5 光电编码器模拟模块的数据传输时序

光电编码器模拟模块的具体实现流程如图 6 所示, 本设计中光电编码器同步时钟为 250 kHz, 因此以 50 MHz 时钟对同步时钟高电平进行采样计数, 当计数器大于 200 即大于一个同步时钟周期则认为是  $T_p$  时段, 开始数据转换, 并设置数据帧传送开启标志, 在其后第一个下降沿锁存数据, 并在第一个上升沿开始传送数据位, 传送完毕将开启标志清零。

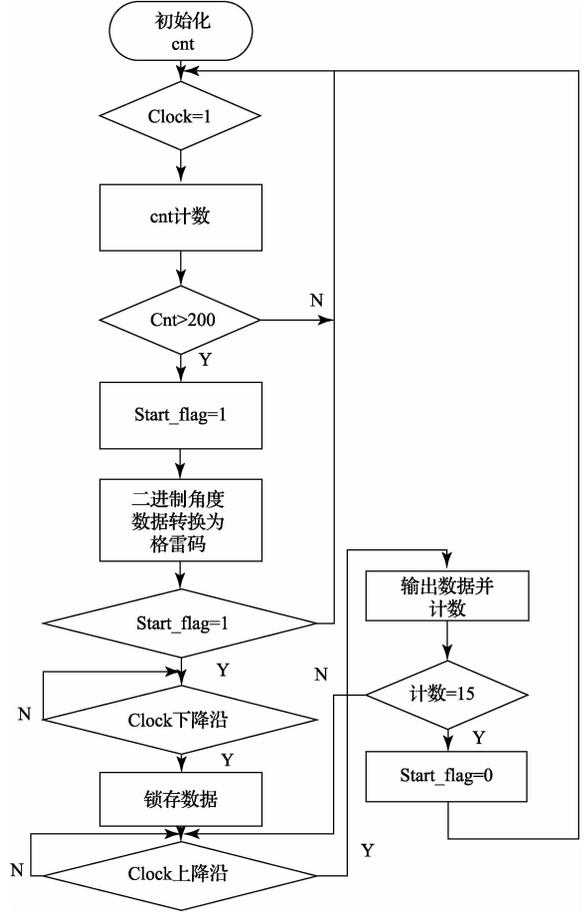
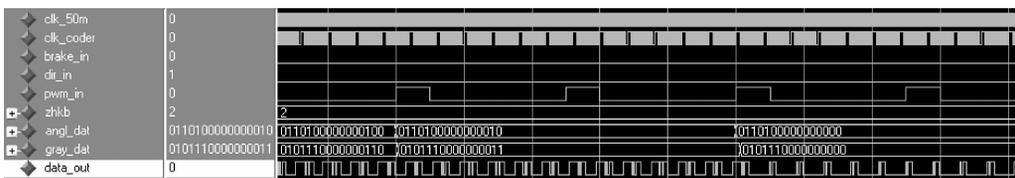


图 6 光电编码器模拟模块的实现流程

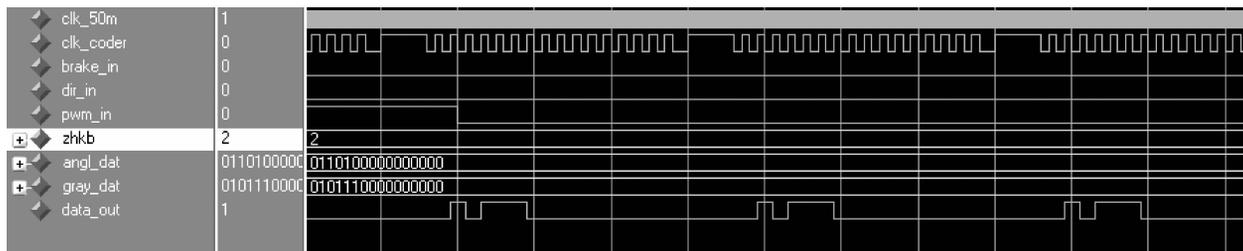
### 6 系统功能仿真及测试

#### 6.1 功能仿真结果及分析

本方案采用 Altera 公司的 Quartus II 11.0 开发平台进行系统设计, 并用 ModelSim SE 6.0 进行仿真测试。设置标准时钟频率为 50 MHz, 输入 PWM 占空比为 20%, 光电编码器同步时钟为 250 kHz 的波形仿真结果如图 7 所示。



(a) 角度数据模拟仿真结果



(b)光电编码器输出脉冲放大图

图7 Modelsim 波形仿真结果

图中(a)是天线方位角数据模拟的仿真结果,图(b)是图(a)的光电编码器输出脉冲的放大图。其中,clk\_50m为标准时钟频率信号,clk\_coder为光电编码器同步时钟,brake\_in、dir\_in和pwm\_in分别为电机制动信号、电机转动方向控制信号和PWM信号。由仿真波形可以看出,测得PWM占空比数值zhkb为2,对应占空比为20%,在电机转动方向控制信号dir\_in为低电平(右转)时,每隔1ms单位时间,角度数据angl\_dat以数字量2递减,gray\_dat为angl\_dat的格雷码形式,data\_out是最终光电编码器的输出脉冲,由此看出,模拟的角度数据符合式(1)的计算结果。从图(b)可以看出,一帧同步时钟脉冲信号为16个,编码器模拟的输出脉冲则从第一个同步时钟脉冲上升沿开始依次送出数据,因此光电编码器的脉冲传输时序符合设计要求。

## 6.2 实际测试结果及分析

完成数字逻辑系统部分的设计后,方位角模拟系统调试结果如图8所示。示波器上显示了信号处理机输出的同步时钟信号和模拟系统输出的光电编码器脉冲信号,通道1显示的波形为同步时钟,通道2显示的波形为光电编码器的脉冲信号。测试结果表明,天线方位角模拟系统的设计可以实现天线方位角信号的模拟,符合某型号雷达测试要求。

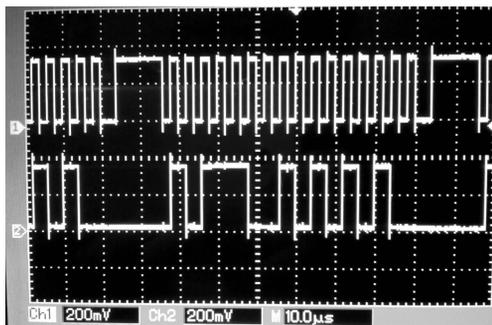


图8 模拟系统测试结果

## 7 结论

针对天线离线状态下的雷达测试需求,研究基于FPGA的天线方位角信号模拟系统。测试结果表明,系统

可以根据伺服控制输出的PWM信号、电机转动方向控制信号和制动信号,计算出雷达天线的方位角位置,并根据同步时钟输出光电编码器的模拟脉冲信号。该模拟系统具有输入输出信号属性与雷达天线单元一致、响应快和易实现等优点,并已应用于某型号雷达信号处理机的测试,实践证明效果良好。

## 参考文献

- [1] 杨大伟,余岚,丁国宁. 雷达天线方位角信号模拟器的设计与实现[J]. 空军雷达学院学报, 2012, 26(4): 256-258.
- [2] 唐金元,王翠珍,于潞. 基于CH451L控制芯片的方位角度信号模拟器[J]. 仪表技术, 2011(12): 4-6.
- [3] 杨俊强,毛征,曹峰,等. 多通道数据实时采集标时系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2011, 30(3): 29-32.
- [4] 蒋明柯,皮佑国. 数控系统中RS485串行通信协议的设计[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2013(5): 23-26.
- [5] 张大为,姜忠山,鲁芳. 基于FPGA的新型数字频率计的设计与仿真[J]. 机械与电子, 2011(9): 31-33.
- [6] 李龙涛,习友宝. 基于FPGA的无间歇测频方法研究与实现[J]. 电子测量技术, 2012, 35(9): 99-100.
- [7] 唐茂华. 基于直流无刷电机的雷达伺服系统设计[J]. 雷达科学与技术, 2009, 7(6): 480-484.
- [8] 张晖,刘晶,裘昌利. 基于虚拟仪器的绝对式光电编码器的角度测量[J]. 电脑知识与技术, 2011, 7(31): 7787-7788.
- [9] 邓建,林桦. 基于DSP的绝对式光电编码器的电机转速测量[J]. 电机与控制应用, 2010, 37(1): 51-52.
- [10] 张琴琴,杨建宏,刘琳. 基于DSP的绝对式光电编码器串行接口设计[J]. 现代电子技术, 2012, 35(14): 185-187.

## 作者简介

廖小芳,工学硕士,助教。主要研究方向为雷达信号处理。

E-mail: liaoxiaofang-123@163.com