

文章编号: 1672-2892(2012)01-0077-05

基于 AD9910 的多通道信号发生器

胡茂海, 蒋鸿宇, 严俊, 文豪, 富艳琴

(中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 基于直接数字频率合成(DDS)技术, 采用现场可编程门阵列(FPGA), 通过对 DDS 芯片 AD9910 的控制, 实现多通道信号发生器的设计。所设计的信号发生器具有高频率精度、低杂散、捷变频的特点, 并可编程调整输出频率值以及多路输出信号之间的相位值。实测结果表明, 本文所研究的方法和研制的系统是可行、有效的, 具有广阔的应用前景。

关键词: 直接数字合成; 现场可编程门阵列; 多通道信号发生器

中图分类号: TN47

文献标识码: A

Multi-channel signal generator based on AD9910

HU Mao-hai, JIANG Hong-yu, YAN Jun, WEN Hao, FU Yan-qin

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621900, China)

Abstract: As the development of multicarrier communication technology, multi-channel signal generator has become more and more important. Based on the Direct Data Synthesis(DDS) technology, this design uses FPGA to control the AD9910 to implement a kind of multi-channel signal generator. This multi-channel signal generator features high frequency precision, low stray, fast frequency switching, and programmable adjustment of the multi-phase value of the output signal. Measured results show that this method is feasible and effective, and it would be widely applied in the future.

Key words: Direct Digital Synthesis; FPGA; multi-channel signal generator

在现代雷达、通信和电子对抗领域中, 信号发生器得到广泛应用, 同时对信号的指标要求也越来越高。在目前信号频率合成的各种类型中, 直接数字频率合成(DDS)^[1]技术是近年来迅速发展起来的频率合成方法。DDS采用数字存储技术, 通过相位累加、幅度查表以及数模变换来实现波形产生, 因具有超宽的相对带宽, 超高的频率捷变速度, 超细的频率分辨率, 相位连续, 全数字化, 便于单片集成等优越性能而得到广泛应用^[2]。本文介绍了一种基于DDS技术实现的高频率分辨率、低杂散、捷变频的多通道信号发生器设计方案。

1 DDS 调制原理

DDS是一种理想的调制器, 因为合成信号的3个参量: 频率、相位和幅度均可由数字信号精确控制, 因此DDS可以通过预置相位累加器的初始值来精确控制合成信号的相位, 从而达到调制的目的。

DDS的理论依据是时域抽样定理, 即一个频带限制在 $0 \sim f_c/2$ 范围内的时间信号 $f(t)$, 如果以 $T_c = 1/f_c$ 的时间间隔对它进行等间隔抽样, 则信号完全由得到的抽样值确定, 即该信号 $f(t)$ 可以由其采样值完全恢复。DDS正是基于此原理, 将一个阶梯化的信号(采样信号)通过一个理想的低通滤波器, 以得到原始的连续信号。

DDS的基本原理^[3-5]如图1所示, 它主要由5个部分组成: 相位累加器、正弦查询表、数模转换器、低通滤波器和参考时钟。DDS工作时, 通过改变相位累加器的频率控制字(Frequency Tune Word, FTW)来改变相位增量, 相位增量的不同, 将导致一周内的取样点数不同。取样是在系统时钟控制下进行的, 即取样周期是一定的, 根据相位增量的不同, 从ROM中读取的信号周期就不同。ROM输出的二进制数送到DAC进行D/A变换, 得到模拟形式量化(阶梯式)的正弦波。最后经过滤波器滤除不需要的频率分量, 平滑得到正弦波, 输出正弦波的频率为:

$$f_{\text{out}} = \frac{FTW}{2^N} \times f_c \quad (1)$$

为了达到足够小的频率分辨率,通常将相位累加器的位数 N 取大,如 $N=32$ 。但受体积和成本的限制,即使采用先进的存储方式,ROM的容量都远小于此,因此在对ROM寻址时,只是用相位累加器的部分高位去寻址,这样不可避免地引进误差,即相位截断误差。

另外,一个幅值在理论上只能用一个无限长的二进制代码才能精确表示,由于ROM的存储能力,只采用一定比特代码来表示这一幅值,这必然会引起幅度量化误差。另外,DAC的有限分辨力以及非线性也会引起误差。因此,DDS杂散是DDS本身所固有的,主要由相位舍位、幅度量化和DAC的非理想特性所引起。

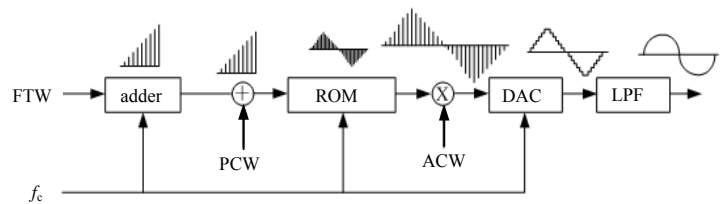


Fig.1 Diagram of direct digital synthesizer
图1 DDS原理框图

2 芯片选择

应某多载波通信系统要求,信号发生器需要同时输出最大10路信号,每路信号的频率、幅度、初始相位均单独可调,它们之间可实现任意相位差要求,且要求输出的信号具有高分辨力、低杂散、快速捷变频等特点。

基于以上要求,设计采用ADI公司的DDS芯片AD9910^[6],该芯片无杂散动态范围达到80 dBc,相位噪声达到140 dBc/Hz。由于采样频率 f_{SYSCLK} 达到1 GSPS^[7],内部相位累加器为32 bit(即将 2π 分为 2^{32} 等份),即频率分辨率 Δf 可以达到 $\Delta f = f_{\text{SYSCLK}}/2^{32} \approx 0.23$ Hz;相位偏移控制字(Phase Offset Word, POW)为16 bit,可方便地实现输出波形的初相角 ϕ 的调制($\phi = 2\pi \times \text{POW}/2^{16}$);内部D/A为14 bit,主时钟 f_{SYSCLK} 最高为1 GHz,输出信号频率最高可达400 MHz。另外,除可产生正弦波外,AD9910还可以通过内部寄存器配置,输出FKS,PSK,ASK信号及周期的任意波信号。AD9910的并口调制模式提供了更新速率可达250 MHz的16 bit快速编程的并行接口,使每隔8 ns更新1次32 bit的频率控制字成为可能,这种快速编程能力可以满足系统捷变频的要求。

3 系统设计

系统电路由FPGA控制单元、AD9910信号发生单元、时钟分配单元、合路及变频单元组成。根据系统提出的要求,FPGA控制单元将输出信号的形式、初始相位、频率、幅度等控制信息发送给信号发生单元和时钟分配单元,使其产生最大10通道的同步信号,每通道信号经滤波、倍频(Frequency Multiplier, FM)、放大后送给合路器合成1路信号,再经变频器上变频到合适的频率输出,系统原理框图如图2所示。

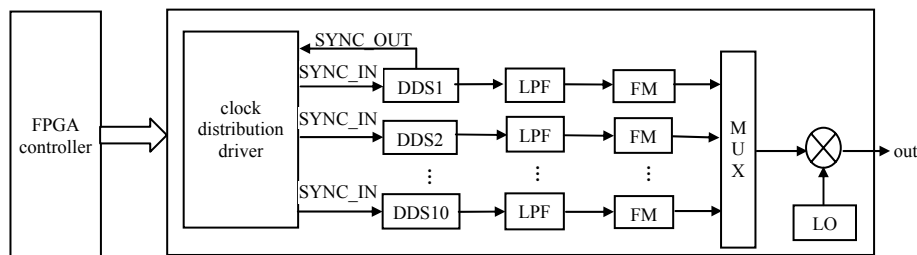


Fig.2 Block diagram of multi-channel signal generator
图2 多通道信号发生器结构框图

对于DDS来讲,捷变频速度取决于控制字写入的速度和系统时钟的速率。为提高控制字写入的速度,系统控制单元采用XILINX公司的V5芯片来实现。V5芯片集成了大量的I/O接口,且处理速度高达500 MHz,能同时完成10通道DDS的捷变频控制。

AD9910信号发生单元采用ADI公司的DDS芯片AD9910,采样时钟为1 GHz。每通道信号发生单元通过接收FPGA控制器的控制字产生相应的信号输出,经低通滤波后送给合路器。

时钟分配单元的作用是实现多通道信号发生单元的同步工作。要实现多通道同步,就必须满足3个条件:多通道DDS工作在相关的工作时钟之下;多通道DDS有相关的同步时钟;在每片DDS内部作一定的时延设定,使同步时钟信号与工作时钟之间满足确定的采样关系。因此,系统设计将1路1 GHz时钟信号分为10路时钟信号,

送给10个信号发生单元作采样时钟,使其满足第1个条件。以第1路DDS的同步时钟输出信号(SYNC_OUT)作为时钟分配器的输入,输出10路相关的同步时钟信号,连接到10路DDS芯片作同步时钟输入(SYNC_IN),实现第2个条件。通过FPGA控制器控制每通道同步时钟输入信号的时间延迟,以确保满足合适的采样关系,从而实现多通道信号发生单元间的同步。

合路及变频单元完成多通道信号的滤波、倍频、放大、多通道信号合成及上变频功能,以最终实现在较高频率的多载波信号输出。

系统工作首先是对各个单元进行初始化和复位,接着配置时钟分配单元,使10通道信号发生单元同步工作,然后等待系统命令,根据任务要求读取各通道的信号形式、频率、相位、幅度信息,对系统命令作进一步的解析(选通的通道个数,具体选通的是哪几个通道等),并计算相应的控制字。在下发新的指令之前,需要初始化所有通道信号,关断合路信号输出,确保新命令的准确执行。FPGA控制器根据系统命令,下发控制字给所有通道,控制信号发生单元输出多通道信号。最后打开合路输出开关,输出合路信号,具体程序控制流程如图3所示。

10通道信号的相位控制是通过FPGA控制器计算得出。通过峰均比抑制算法,计算得出峰均比最小的相位组合,进而控制10通道的相位,部分代码如下:

```

always @(posedge FJB_CLK)
begin
    if (!FJB_RESTM)
    begin
        z<=0;
        maxi<=0;
        min<=16'hffff;
        muo<=NN*16'h0800;
        phaseq0<=16'h0000;phaseq1<=16'h0100;phaseq2<=16'h0200;
        phaseq3<=16'h0300;phaseq4<=16'h0400;phaseq5<=16'h0500;
        phaseq6<=16'h0600;phaseq7<=16'h0700;phaseq8<=16'h0800;
        phaseq9<=16'h0900;
    end
    else
    begin
        if(y10<muo)      z<=muo-y10;
        else            z<=y10-muo;
        if(z>maxi)      maxi<=z;
        if(set130==1)
        begin
            if(maxi<min)
            begin
                min<=maxi;
                case(counter10)
                4'b0000:    phaseq0<=phase[0];
                4'b0001:    phaseq1<=phase[1];
                4'b0010:    phaseq2<=phase[2];
                4'b0011:    phaseq3<=phase[3];
                4'b0100:    phaseq4<=phase[4];
                4'b0101:    phaseq5<=phase[5];
                4'b0110:    phaseq6<=phase[6];
                4'b0111:    phaseq7<=phase[7];
                4'b1000:    phaseq8<=phase[8];
                4'b1001:    phaseq9<=phase[9];
                default:    begin
                    phaseq0<=16'h0000;phaseq1<=16'h0100;phaseq2<=16'h0200;
                    phaseq3<=16'h0300;phaseq4<=16'h0400;phaseq5<=16'h0500;
                    phaseq6<=16'h0600;phaseq7<=16'h0700;phaseq8<=16'h0800;
                end
            end
        end
    end
end

```

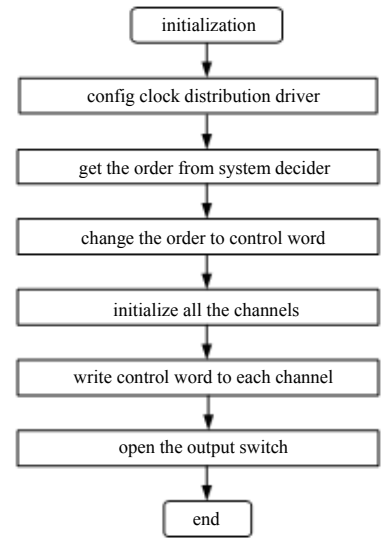


Fig.3 Software flowchart
图3 软件流程图

```

        phaseq9<=16'h0900;
        end
    endcase
    end
    maxi<=0;
    if(set10==1) min<=16'hffff;
    end
end
end
end

```

4 测试结果

本文设计的多通道信号发生器,其特性在实验上得到了证明,即测试结果完全满足设计要求。以输出10通道信号为例,合路信号具有低杂散、相位噪声良好的特性。图4为用Agilent频谱仪测量的10通道合路信号输出频谱图,图5为用Tek示波器测量的相位精确控制前、后的10通道合路信号时域波形图。

根据实际测试结果,基于AD9910的多通道信号发生器能同时产生最多10路信号,信号杂散 -60 dB,每路信号最大功率 -3 dBm;通过精确控制每通道信号的初始相位,可以有效降低合路信号的峰均比值,峰均比抑制能力最大可达 6 dB^[8]。

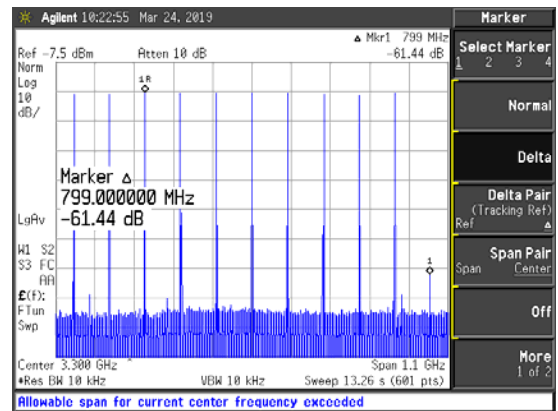


Fig.4 Spectrum of output signal
图4 十通道合路信号频域图

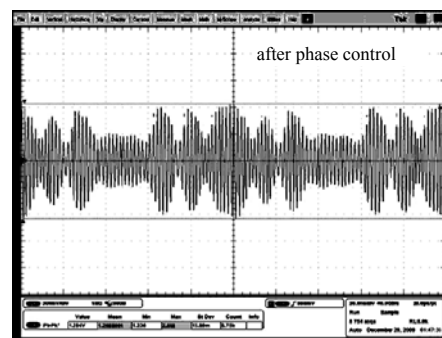
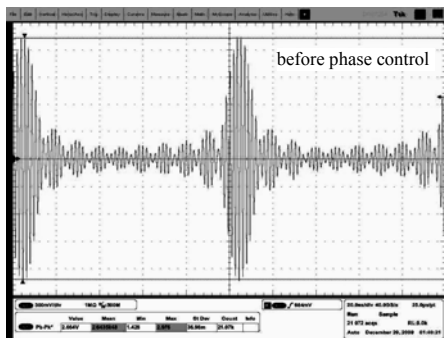


Fig.5 Time domain waveform of output signal
图5 十通道合路信号时域图

5 结论

随着数字技术的不断发展,直接数字式频率合成器技术将会得到不断的完善。本文以FPGA控制器为核心,利用当前使用广泛的DDS技术,可输出高分辨力、低杂散、捷变频的多通道信号,配置灵活、方便,结构清晰,若需满足其他频段信号的一些特殊要求,只需改变一些电路参数及控制电路的软件即可,可用于各种多载波通信系统。

参考文献:

- [1] Tierney J, Rader C, Gold B. A Digital Frequency Synthesizer[J]. IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics, 1971, 19(1): 48-57.
- [2] 潘松, 黄继业. EDA技术与VHDL[M]. 北京:清华大学出版社, 2005. (PAN Song, HUANG Jiye. EDA technology and VHDL[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.)
- [3] Bonfanti A, Amorosa F, Samori C, et al. A DDS-Based PLL for 2.4-GHz Frequency Synthesis[J]. IEEE Trans. on Circuits and Systems, 2003, 50(12): 1007-1010.
- [4] 许慧波, 张厥胜. DDS-直接数字式频率合成器综述[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 1989. (XU Huibo, ZHANG Juesheng. Review of Direct Digital Synthesizer[M]. Xi'an: Xidian University Press, 1989.)
- [5] Jin Fengjie. Use of DSP and DDS technique in radar signal generator[C]// Proceeding ICSP'04. Beijing: [s.n.], 2004, 3: 1950-1952.

- [6] Analog Devices. AD9910 datasheet[R]. 2007.
- [7] 徐晓东,王西锋. 基于高速 DDS 芯片的宽带低杂散信号产生器的设计与实现[J]. 雷达与对抗, 2007(4):32-35. (XU Xiaodong,WANG Xifeng. The design and implementation of a fast DDS chip based wide-band,low-stray signal generator[J]. Radar & Ecm, 2007(4):32-35.
- [8] 胡茂海,叶江峰,严俊,等. 基于 FPGA 的实时峰均比抑制算法[J]. 信息与电子工程, 2010,8(5):565-568,593. (HU Mao hai,YE Jiangfeng,YAN Jun,et al. A Realtime PAPR Reduction Algorithm Based on FPGA[J]. Information and Electronic Engineering, 2010,8(5):565-568,593.)

作者简介:



胡茂海(1982-),男,四川省遂宁市人,研究实习员,主要从事数字信号处理研究工作.
email:humaohai2001@sina.com.

蒋鸿宇(1982-),男,四川省绵阳市人,在读博士研究生,主要从事高速率数字采集、通信信号处理相关研究.

严俊(1981-),男,四川省绵阳市人,研究实习员,主要从事数字信号处理研究工作.

文豪(1982-),男,四川省绵阳市人,助理研究员,主要从事数字信号处理研究工作.

富艳琴(1984-),女,甘肃省武威市人,研究实习员,主要从事数字信号处理研究工作.

(上接第 71 页)

5 结论

本文介绍的基于双环X波段低相噪锁相式频率合成器技术,在满足小频率步进、低杂散的情况下,绝对相位噪声达到 ≤ -100 dBc/Hz@1 kHz。其双环技术具有一定先进性与通用性,该技术实现的频率合成器可以满足系统对高质量信号源的要求,具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 白居易. 低噪声频率合成[D]. 西安:西安交通大学,1995.
- [2] 高树亭,高峰,徐盛旺,等. 合成频率源工程分析与设计[M]. 北京:兵器工业出版社,2008.
- [3] 万天才. 频率合成器技术发展动态[J]. 微电子学,2004,34(4):366-370.

作者简介:



杨光(1976-),男,四川省遂宁市人,硕士,研究方向为频率合成器及相关产品.

杨杰(1969-),男,四川省绵阳市人,本科,研究方向为微波技术.

蒋国琼(1978-),女,四川省广安市人,本科,研究方向为数字信号处理.email:guoqiong.jiang@changhong.com.

宋焯曦(1985-),男,四川省乐山市人,硕士,研究方向为频率合成器及相关产品.