

基于 STM32 和 FPGA 的可控线性调频信号源的设计

王剑峰, 孙晶华

(哈尔滨工程大学 理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 设计了一种有别于应用直接数字频率合成(DDS)产生线性调频信号, 并且可对信号的起止和幅度进行控制的新型线性调频信号源。该设计通过 STM32 对由 MATLAB 根据线性调频公式计算出数据点后嵌入 FPGA 中的 ROM 所产生的线性调频信号进行起止以及幅度的控制。仿真和实验结果表明, 该设计具有易于实现, 信号参数可时变性高, 信号幅度、相位可预失真等特点。

关键词: 线性调频信号; 信号幅度; STM32; FPGA

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2010)10-0064-04

The design of controllable linear frequency modulation signal source based on STM32 and FPGA

WANG Jian Feng, SUN Jing Hua

(College of Science, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: To design a new linear frequency modulation signal source which is different from the application of direct digital frequency synthesizer(DDS) to produce a linear frequency modulation signal, and can control the starting and ending time and amplitude of the signal. The design controls the starting and ending time and amplitude through the linear frequency modulation signal which are produced by inserting the data points calculated according to the linear frequency modulation formulate with MATLAB in the ROM of the FPGA through STM32. Simulation and experimental results show that the design is easy to implement, time-varying of signal parameters can be high, the amplitude and phase of the signal can be pre-distortion and so on.

Key words: linear frequency modulation signal; amplitude of signal; STM32; FPGA

线性调频信号是一种瞬时频率随时间呈线性变化的信号, 不仅可以获得较大的压缩比, 而且有着良好的距离分辨率和径向速度分辨率。线性调频信号最突出的优点是匹配滤波器对回波信号的多普勒频移不敏感, 即使回波信号有较大的多普勒频移, 原来的匹配滤波器仍能起到脉冲压缩的作用, 从而大大简化信号处理系统。因此它在雷达对抗领域, 作为一种成熟的低截获概率雷达信号, 被广泛应用于各种体制的雷达中。

1 可控线性调频信号源的设计

本设计方案由 STM32、FPGA 配置电路、D/A 转换电路、一阶 RC 有源低通滤波电路、二阶压控电压源

低通滤波电路和信号幅度控制电路组成。可控线性调频信号源的设计框图如图 1 所示。

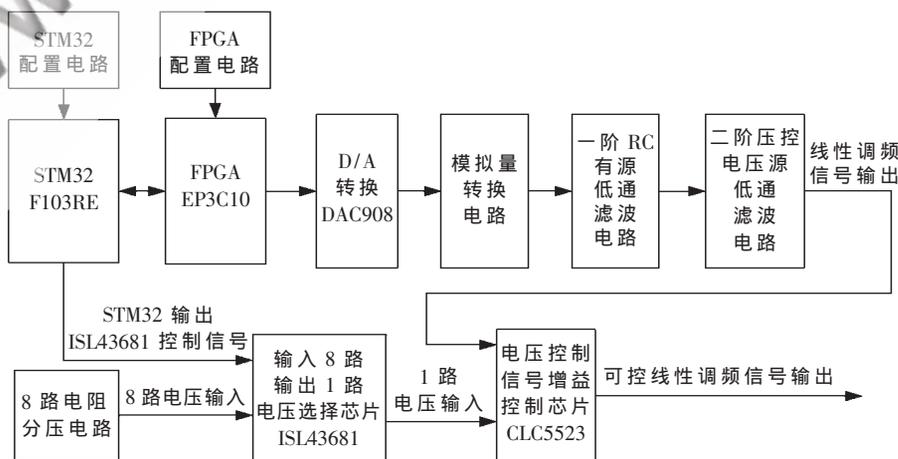


图 1 可控线性调频信号源设计框图

网络与通信 Network and Communication

利用 STM32F103RE(内部具有 ARM 公司的 Cortex-M3 内核的高性能微控制器)在控制方面的强大能力和 FPGA-EP3C10(现场可编程门阵列)在数据传送速度方面的巨大优势以及丰富的 I/O 资源来提升系统整体的工作效率。STM32 首先控制 ISL43681 选择线性调频信号的幅度增益,然后通过触发 FPGA 进行信号的产生和发送。信号经过一阶、二阶低通滤波后,最后由 CLC5523 根据预先选定的幅度增益完成信号的幅度调整。

1.1 线性调频信号的产生

线性调频信号的数学表达式可写表示为^[1]:

$$u(t)=a(t)\cos[2\pi(f_c t+\frac{K}{2}t^2)],t\in[-\frac{T}{2},\frac{T}{2}] \quad (1)$$

其中 f_c 为中心频率; $K=B/T$ 为调频斜率; B 为频率变化范围; T 为脉冲宽度; $a(t)$ 为线性调频矩形脉冲的包络。

式(1)中信号的最高频率为 $f_c+B/2$,根据采样定理,直接对其采样所需的采样频率 f_s 应满足 $f_s \geq 2(f_c+B/2)$ 。

系统线性调频信号产生结构由五部分组成:计数器或地址发生器、线性调频信号数据存储 ROM、FPGA 的标准化硬件描述语言——VHDL 顶层设计^[2]、D/A 转换和低通滤波。信号产生结构图如图 2 所示。

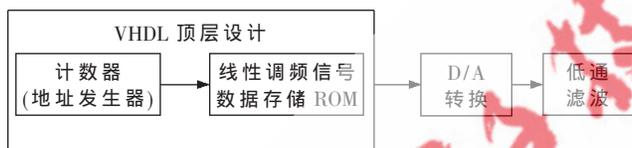


图 2 线性调频信号产生结构图

实际操作流程是根据预先设定的采样频率以及所需信号的带宽、时宽等参数,将线性调频信号的数学表达式用 MATLAB 语言描述,然后计算出构成线性调频信号的数据点,并按采样顺序将 MATLAB 所生成的数据点存储在 FPGA 内的高速存储器 ROM 中。信号产生期间,以地址发生器时钟作为时间基准高速寻址存储器 ROM,从中依次读出线性调频信号数据点进行 D/A 转换,再经过后续一系列低通滤波得到所需的线性调频信号。

1.2 线性调频信号的起止控制

线性调频信号的起始由 STM32 控制,STM32 向 FPGA 发送响应脉冲,当 FPGA 接收到响应脉冲后,FPGA 随即

发送回复脉冲,表示“握手”成功。与此同时,FPGA 开始启动内部的高速存储器 ROM,ROM 依据地址发生器的时钟频率以此按顺序将预先存储在其内部的线性调频信号数据点发送出去,信号的持续时间由 ROM 中的数据点总量和地址发生器时钟频率共同确定。当 ROM 中的数据点全部发送完毕后,ROM 随即停止工作,FPGA 继续等待下一个 STM32 发出的响应脉冲。至此,一次线性调频信号的起止控制过程完毕。用 STM32 控制 FPGA 使得信号收发自如,也加强了信号的隐蔽性和抗干扰性。这里需要注意的是 STM32 发送响应脉冲的间隔一定要大于线性调频信号的总体发送时间,否则将出现信号波形混叠。这部分控制程序由 C 语言和 VHDL 语言相结合编写,图 3 为线性调频信号的起止控制流程图,图 4 为 STM32 触发 FPGA 产生中心频率为 50 kHz、带宽为 30 kHz、脉宽为 0.001 s、采样率为 500 kHz 的线性调频信号时序仿真图。



图 3 线性调频信号的起止控制流程图

1.3 D/A 转换电路

FPGA 输出的是数字量,需要 D/A 转换电路将其变成模拟量才可进行滤波放大等处理。系统选择的 DAC908 是一款电流型高速 D/A 芯片,具有 8 位并行数据输入,转换速率 165 MS/s,数据建立时间仅需 2 ns。由于其输出为电流量,需要转换成电压量才能输出给滤波器使用。D/A 转换电路如图 5 所示。

1.4 低通滤波电路

线性调频信号由 FPGA 产生,FPGA 是数字器件,由

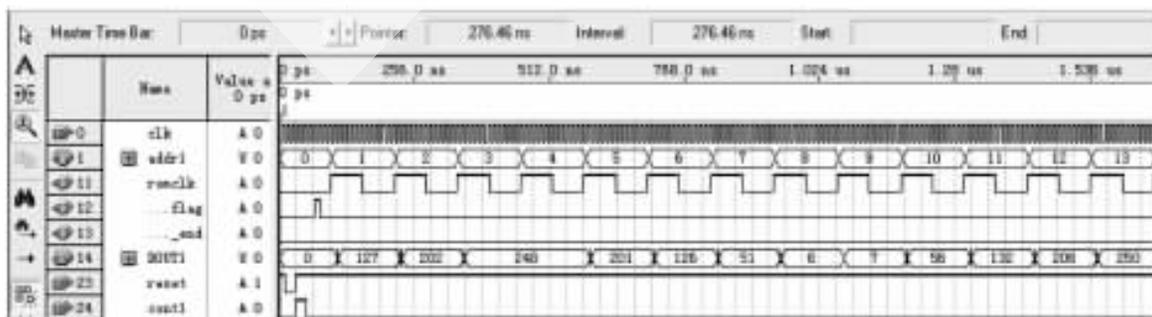


图 4 STM32 触发 FPGA 产生中心频率为 50 kHz、带宽为 30 kHz、脉宽为 0.001 s、采样率为 500 kHz 的线性调频信号时序仿真图

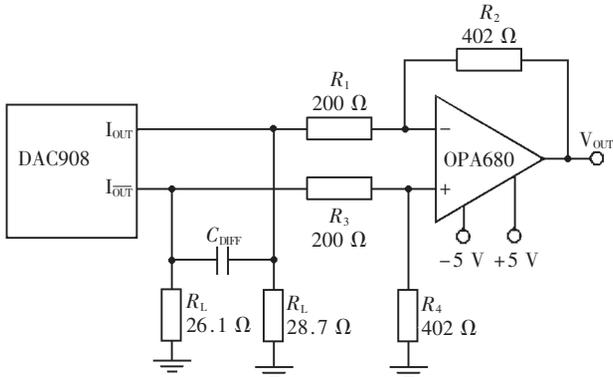


图 5 D/A 转换电路图

于数字量化存在量化误差,会产生很多杂波分量,加之电路中会不可避免地存在各种形式的噪声。所以,需要经过低通滤波电路处理使输出的信号纯和、平滑。系统低通滤波电路主要分为两部分:一阶 RC 有源低通滤波电路和二阶压控电压源低通滤波电路(简称二阶压控电压源 LPF)。其核心二阶压控电压源 LPF 由两节 RC 滤波器和同相放大电路组成,其中同相放大电路实际上就是所谓的压控电压源。二阶电路使输出电压在高频段以更快的速率下降,相比一阶电路大大改善了滤波效果,二阶压控电压源 LPF 的电路如图 6 所示,幅频特性曲线如图 7 所示。

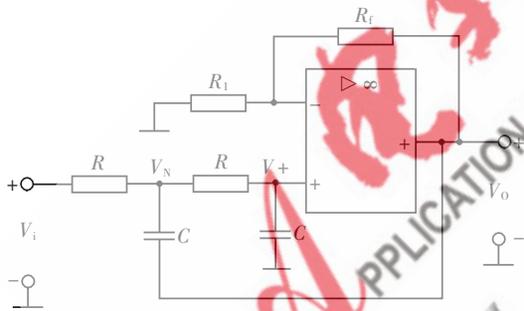


图 6 二阶压控电压源 LPF

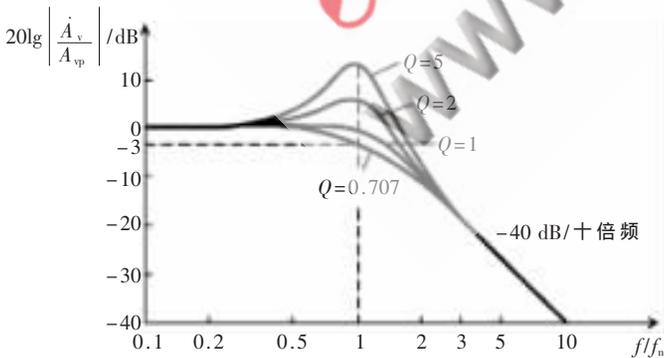


图 7 二阶压控电压源 LPF 幅频特性曲线

(1)二阶压控电压源 LPF 通带增益

当 $f=0$ 时,各电容器可视为开路,通带内的增益为:

$$A_{vp} = 1 + \frac{R_f}{R_1} \quad (2)$$

(2)二阶压控电压源 LPF 传递函数

$$V_o(s) = A_{vp} V_{(+)}(s) \quad (3)$$

$$V_{(+)}(s) = V_N(s) \frac{1}{1 + sCR} \quad (4)$$

$$\frac{V_i(s) - V_N(s)}{R} - [V_N(s) - V_o(s)]sC - \frac{V_N(s) - V_{(+)}(s)}{R} = 0 \quad (5)$$

联立以上三式,求解可得二阶压控电压源 LPF 的传递函数:

$$A_v(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{A_{vp}}{1 + (3 - A_{vp})sCR + (sCR)^2} \quad (6)$$

上式表明,该滤波器的通带增益小于 3,才能保障电路稳定工作。

(3)频率特性

由传递函数可以写出频率响应的表达式:

$$\dot{A}_v = \frac{A_{vp}}{1 - (\frac{f}{f_0})^2 + j(3 - A_{vp})\frac{f}{f_0}} \quad (7)$$

当 $f=f_0$ 时,上式可以化简为:

$$|A_v|_{(f=f_0)} = \frac{A_{vp}}{j(3 - A_{vp})} \quad (8)$$

定义有源滤波器的品质因数 Q 值为 $f=f_0$ 时的电压放大倍数的模与通带增益之比:

$$Q = \frac{1}{3 - A_{vp}} |A_v|_{(f=f_0)} = QA_{vp} \quad (9)$$

根据以上两式得出两点结论:

(1)当 $Q=1$ 时,在 $f=f_0$ 的情况下, $|A_v|_{(f=f_0)} = A_{vp}$,即维持了通带内的电压增益,故滤波效果最佳。这时, $3 - A_{vp} = 1, A_{vp} = 2, R_f = R_1$;

(2)当 $A_{vp} = 3$ 时, Q 将趋于无穷大,意味着该 LPF 将产生自激现象。因此,电路参数必须满足 $A_{vp} < 3, R_f < 2R_1$,且要求元器件参数性能稳定;

系统设定电路参数时使 $Q=1, A_{vp}=2, R_f=R_1$,这时滤波效果最佳,信号波形最理想。

1.5 线性调频信号的幅度控制

线性调频信号幅度控制电路主要由三部分组成:8路电阻分压电路、8路电压选通电路和信号增益控制电路。线性调频信号幅度控制电路的核心是信号增益控制电路,CLC5523 是核心电路的主控芯片,具有带宽较宽(250 MHz)、响应速度快(2 ns)等特点,是一款电压控制的线性增益芯片。芯片的增益控制端电压正常工作在 0~2 V 时,CLC5523 可将输入信号线性地放大 2~100 倍。为使线性调频信号幅度增益可选性丰富,采用 ISL43681 作为 8 路电压选通电路的主控芯片。ISL43681 是一款 8 路输入 1 路输出的、由外部信号控制的高性能电压选通芯片,在使用时芯片前端必须要有可供选择的 8 路电压输入网络。所以,在线性调频信号幅度控制电路中还要有电压输入网络,这部分较易实现,用最简单直接的电阻串联分压即可,但要注意的是分得的电压要在

网络与通信 Network and Communication

0~2 V,且8组电压各不相同。线性调频信号幅度控制电路工作原理:由8路电阻分压电路产生8组电压,在由STM32控制ISL43681选择其中某1路电压输出,CLC5523根据输入电压的大小将由FPGA产生的线性调频信号按线性比例进行幅度放大,信号可有8种不同的幅度选择。

2 线性调频信号的测试结果

为了验证实际得到的线性调频信号的准确性,首先,对所测的信号进行MATLAB仿真。例如,产生中心频率为180 kHz、带宽为20 kHz、脉宽为0.000 2 s、采样率为4 000 kHz的线性调频信号。根据公式,可由MATLAB得到信号仿真图(如图8所示),实际由Tektronix示波器采集到的线性调频信号如图9所示。观察两图可见,波形几乎一致,可知本系统设计是正确可行的。

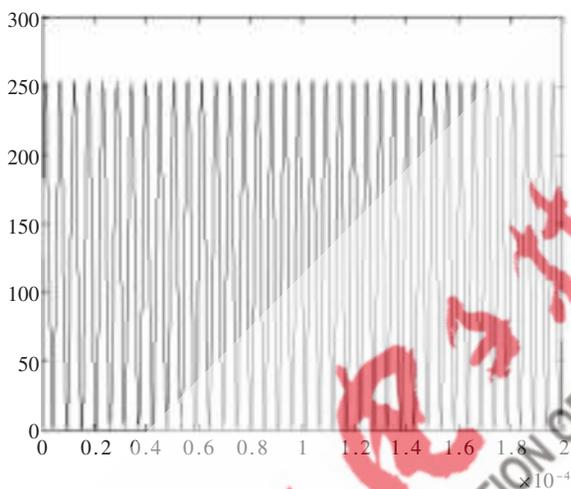


图8 线性调频信号 MATLAB 仿真图



图9 实际线性调频信号图

3 噪声抑制

噪声抑制是保证信号质量的关键技术之一。测试分析发现,对信号造成严重影响的干扰主要来自空间电磁辐射和高速数字部分。对于空间电磁干扰,可通过对整个电路进行屏蔽来减小干扰。对于高速数字干扰,可以采用多层板和微带线设计,另外差分方式传送和接收信号也是抑制共模干扰的有效手段^[3]。此外,在电路设计方面应注意以下几点:

(1)电路布局时,将模拟电路和数字电路合理地分开,电源和地线单独引出,电源供给处汇集到一点。PCB布线时,高频数字信号线采用短线。主要信号线最好集中在PCB板中心,同时电源线尽可能远离高频数字信号线或用地线隔开。其次,可以根据耦合系数来布线,尽量减少干扰耦合;

(2)电路的电源线和地线应尽可能宽,以减小线阻抗,从而减小公共阻抗引起的干扰噪声;

(3)器件最好多选用贴片元件并尽可能缩短元件的引脚长度,以减小元件分布电感的影响;

(4)在 V_{DD} 及 V_{CC} 电源端应尽可能靠近器件接入滤波电容,以缩短开关电流的流通途径,例如用10 μ F铝电解电容和0.1 μ F电容并联接在电源脚上。对于高速数字IC的电源端,可以用钽电解电容代替铝电解电容,因为钽电解电容的对地阻抗要比铝电解电容小得多。

文章提出了一种可对信号的起止和幅度进行控制的新型线性调频信号源。为确保电路性能,在实际制板时采用多层板结构并精心设计了微带线。通过仿真和实验结果验证,充分证明了设计的可行性。对实际应用而言,预失真(灵活的幅相补偿)无疑是一项至关重要的功能,但这恰恰是目前DDS产品所不具备的^[4]。而本设计采用预先存储信号波形的方法却可方便地对信号的幅度和相位进行预失真,从而可以补偿系统畸变的影响。此外,系统还可产生任意波形(包括许多复杂的波形),并可实时改变所需信号的时宽、带宽等各项参数。如果对信号输出速率要求不是特别高,系统还可由STM32将所需线性调频信号的数据点算出,传输给FPGA中的RAM,由RAM将其发出。本设计可方便地产生低、高频线性调频信号,是一种简单实用的新型线性调频信号源。

参考文献

- [1] 祝明波,常文革,梁甸农.采用数字方法实现宽带线性调频信号产生[J].系统工程与电子技术,2000,22(5):94-98.
- [2] 潘松,黄继业.EDA技术与VHDL[M].北京:清华大学出版社,2005:20-32.
- [3] 焦安群,郜丽鹏.线性调频信号源的研制[J].应用科技,2009,36(5):28-32.
- [4] 薛维,付国华,钟耀霞.一种线性调频信号产生器的设计[J].电脑与信息技术,2007,15(3):52-55.

(收稿日期:2010-01-22)

作者简介:

王剑峰,男,1982年生,硕士研究生,主要研究方向:信号检测与处理。

孙晶华,男,1963年生,教授,硕导,主要研究方向:信号检测与处理。