

线性调频脉冲发声系统的设计

廉德钦^{1,2}, 何常德^{1,2}, 苗 静¹, 杜春晖², 宛克敬¹, 薛晨阳^{1,2}

(1. 中北大学 电子测试国家重点实验室, 山西 太原 030051;

2. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051)

摘 要:介绍了线性调频脉冲压缩原理及一种基于脉冲压缩技术的线性调频信号发声系统,该系统包括电路系统,计算机控制程序和发射装置。电路系统使用信号发生器件、单片机及模拟开关来产生周期性线性调频信号。计算机控制程序采用微软基础类库(MFC)窗口程序,通过串口控制单片机。使用压电声音发射器发声,并做了线性调频声音发射、接收实验,对接收的信号进行了脉冲压缩。

关键词:脉冲压缩;线性调频;信号发生器;模拟开关;微软基础类库(MFC)

中图分类号:TN552

文献标识码:A

Design of Chirp Modulated Pulse Sound Producing System

LIAN Deqin^{1,2}, HE Changde^{1,2}, MIAO Jing¹, DU Chunhui², YUAN Kejing¹, XUE Chengyang^{1,2}

(1. North University of China, National Key Lab. of Electronic Measurement Technology, Taiyuan 030051, China;

2. Key Lab. of Instrumentation Science & Dynamic Measurement of Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: The chirp pulse compression technique and a new chirp pulse sound producing system based on pulse compression technique are introduced. This system includes circuit, controlling program of computer and sound produce device. In the circuit systems, signal generator, MCU and analog switch are used to produce periodic liner modulated signal. Computer controlling program is adapted in MFC window program. MCU is controlled through serial interface. Piezoelectric sound generator is used to produce sound. Experiments on liner modulate signal producing and receiving are carried out. At last, pulse compression technique is use to compress the receiving signal.

Key words: pulse compression; chirp modulation; signal generator; analog switch; MFC

0 引言

脉冲压缩技术因有效地解决了作用距离和距离分辨率的矛盾,在雷达和声呐测距领域有广泛的应用。脉冲压缩使用线性调频信号(LFM)可提高测距的作用距离和分辨率,且 LFM 产生和处理简单,因而最先得到应用^[1]。线性调频信号有脉冲函数式的非线性相位谱,可获得较大的压缩比,有良好距离分辨率和径向速度分辨率。线性调频信号最大的优点是匹配滤波器对回波信号的多普勒频移不敏感,无论多大的多普勒频移,原来的匹配滤波器仍能起脉冲压缩的作用,这将降低信号处理系统的复杂性^[2-3]。

在线性调频脉冲压缩技术的应用中,线性调频的信号源的设计是重要的一环,现在最广泛应用的是直接数字式频率合成(DDS)技术。由于 DDS 技

术需要数模转换电路输出模拟信号,必然导致信号有很多阶梯,带来大量的杂乱谱线^[4]。虽然滤波器能滤掉不需要的杂波,但由于调频系统频率不恒定,调频信号势必受到滤波的影响。因此,本文使用 MAX038 信号发生芯片,设计了线性调频信号发生系统,用于发射线性调频声信号。

1 线性调频脉冲压缩原理

脉冲压缩技术应用中通常选择线性调频信号作为发射信号,接收时通常采用匹配滤波来实现脉冲的压缩。线性调频信号^[2,5-6]为

$$s(t) = A \text{rect}(t/\tau) \exp[2\pi(f_0 t \pm Kt^2/2)] \quad (1)$$

式中: A 为幅度; τ 为脉冲宽度; f_0 为载频; $K = B/\tau$ 为频率变化率, B 为带宽; $\text{rect}(t/\tau)$ 为矩形函数,其表达式为

收稿日期:2012-01-11

基金项目:国际科技合作基金资助项目(2010DFB10480)

作者简介:廉德钦(1986-),男,山西运城人,硕士生,主要从事水声成像算法的实现与超声水声传感器的设计与制造的研究。薛晨阳(1971-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事新型微米纳米器件、微纳测试技术、固体光谱学与超声成像的研究。

$$\text{rect}(t/\tau) = \begin{cases} 1 & -T \leq t \leq T \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中 T 为脉冲宽度的一半。

脉冲压缩实质是对信号进行匹配滤波, 信号 $s(t)$ 的匹配滤波器的时域脉冲响应为 $h(t) = s^*(-t)$, 即 $s(t)$ 为共轭函数。 $s(t)$ 经过系统 $h(t)$ 得到输出信号 $s_0(t)$ ^[1,5-6], 则有

$$s_0(t) = s(t) \times h(t) = T \frac{\sin \pi K T (1 - \frac{|t|}{T}) t}{\pi K T t} \cdot \text{rect}\left(\frac{t}{2T}\right) e^{j2\pi f_c t} \quad (3)$$

$s_0(t)$ 即为 LFM 脉冲信号经匹配滤波器得到的输出, 它是一个固定载频 f_c 的信号。当 $|t| \leq T$ 时, 包络近似为辛克函数:

$$s_0(t) = T \text{Sa}(\pi B t) \text{rect}[t/(2T)] \quad (4)$$

图 1 为匹配滤波后的辛克函数绘出的图形, 由图可知, 脉冲的实际时间为 $2T$, 但实际分辨间隔小于 $2T$, 提高了距离分辨率。

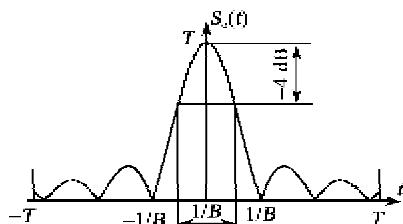


图 1 辛克函数

2 线性调频发声电路的设计

线性调频系统主要利用信号发生芯片 MAX038 实现波形发生, 单片机控制发射的波形、中心频率、调频范围, 单片机同时负责与计算机通信。信号发生通常采用数模转换器 (DAC) 与数字信号处理 (DSP) 结合控制产生不同的波形, 但由于 DAC 信号不连续, 较高位变动时易产生尖峰, 严重影响信号质量。MAX038 的频率范围为 $0.1 \text{ Hz} \sim 20 \text{ MHz}$ ^[7-8], 工作频率范围大, 为了得到较光滑的信号和较好的线性调频性能, 所以采用 MAX038。图 2 为线性调频电路的结构图。

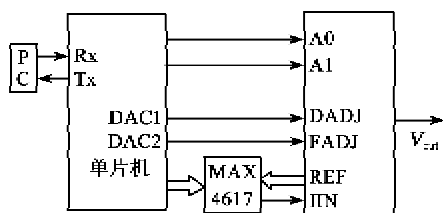


图 2 线性调频发声电路

MAX038 的 A0、A1 引脚控制波形, 分别为三角波、正弦波和方波, 单片机选用 2 个通用引脚控制 A0、A1 的电位。引脚 FADJ 输入电压为 $-2.4 \sim 2.4 \text{ V}$, 调节电压改变频率, FADJ 可快速变化, 调制信号的频率。DAC 为数模转换电路, 需要一个引脚 DREF 提供一个参考电压 V_{ref} , 输出电压范围为 $0 \sim V_{\text{ref}}$, 由于信号有阶梯存在, 所以需要有一个滤波器对 DAC 输出的数据滤波。单片机使用一个 DAC 数模转换电路输出一个电压控制 FADJ 和 DADJ 引脚的电位。MAX038 引脚 DADJ 控制占空比, DADJ 引脚输入电压为 $-2.4 \sim 2.4 \text{ V}$ 。单片机使用另外一个 DAC 数模转换器, 控制波形的占空比。REF 引脚输出 2.5 V 的参考电压, IIN 输入电流决定信号发生器的工作频率。使用模拟开关 MAX4617 控制电流的输入, MAX4617 是 8 选 1 模拟开关, 7 个引脚上各连接不同的电阻与 REF 连接, 另外一个断开, 输出引脚与 IIN 连接, 模拟开关有 3 个引脚用来控制 8 个引脚的其中 1 个与输出接通, 用来选择不同的频率区间。单片机用串口与计算机通信, 由于单片机的串口信号仅有 3.3 V , 计算机串口的电压为 15 V , 所以需要芯片 MAX232 连接计算机串口与单片机串口。MAX038 输出信号经过功率放大电路与发生器相连。

3 软件设计

软件设计包括单片机固件程序设计和上位机控制程序设计。单片机固件程序负责接收计算机的命令, 并执行相关任务。上位机负责与用户互动, 把用户想要执行的操作转化为单片机固件识别的命令。

固件使用串口接收命令, 当计算机发出命令, 串口会产生一个中断, 单片机跳转到串口中断处理程序来接收相关命令, 根据命令修改相关参数, 执行完中断处理程序, 单片机会跳转回中断点。每次执行完中断处理程序, 单片机根据参数的变化, 读取相关的指令, 然后修改参数。使用 switch 语句, 分别执行相关操作。执行的操作包括: 波形控制、频率设置、占空比设置、频率的调制。单片机的 2 个引脚与 MAX038 的波形控制引脚相连接, 通过设置单片机引脚的电位, 控制产生相应的波形。频率和占空比设置都需要 DAC 来输出一定大小的电压, DAC 有一个 REF 引脚提供一个参考电压, 设其为 2.4 V , DAC 输出电压为 $0 \sim 2.4 \text{ V}$ 。DAC 是一个 12 位数模转换器, 固件程序根据需要的频率和占空比计算

DAC 设置的数据,从而控制频率和占空比。单片机需要 3 个引脚控制 MAX4617,通过设置 3 个引脚的电位控制 REF 引脚和 IIN 之间的电阻,控制基频率。

计算机控制程序采用 MFC 窗口程序,如图 3 所示,窗口上设置波形控制按钮,频率、占空比设置按钮,调频设置按钮,还有频率编辑框,占空比编辑框,调频范围编辑框和调频信号频率编辑框。单机设置按钮,计算机会发出相关的命令给单片机。通信命令需要一个固定的格式,防止固件程序识别错误。串口每次仅能发出一个字符,调频时需要命令和数据,数据很可能与命令混淆,所以制定一个规则与计算机通信。

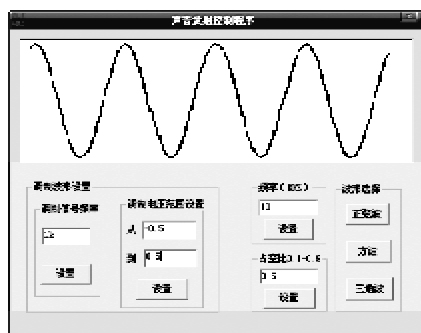


图 3 计算机控制程序界面

图 4 为计算机与单片机通信指令格式。由图可知,计算机发出命令前先发出一个字节,大小为 0xFF,标志计算机需发出命令,然后再发一个字节标志命令,一个字节可定义 128 个不同的命令,命令后面跟数据。设置波形时后面不需要跟数据,设置频率和占空比时后面跟 2 个字节数据,用来设置 12 位 DAC,设置调频时后面跟 6 个字节,前 2 个字节用来传递调制信号频率,后面 4 个字节用来传递信号的调制频率范围。



图 4 计算机与单片机通信指令格式

4 测试

为了验证本系统的可靠性,对系统发出的线性调频信号作测试。信号的基频率为 8 kHz,在线性电压的调频下产生 3~8 kHz 的调频信号。图 5 为调频后信号和调制三角波。由图可知,输出信号波形较好,具有较好的线性调频特性。

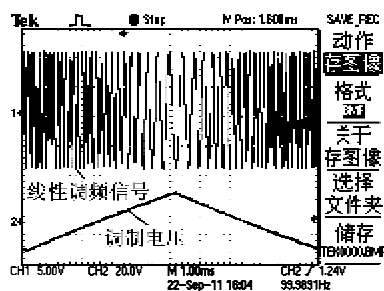


图 5 调频后信号和调制三角波

脉冲压缩技术在雷达成像中有较好的应用,但由于声音传感器、发射器接收和发射强度都与信号频率有关,等幅度的电信号发射强度和等幅度的声信号的接收强度均随频率变化。这是脉冲压缩技术在声学领域的应用的限制,所以选择宽频的声音发射器和声音接收来验证脉冲压缩。选择宽频的声音发射器和电容式声音传感器作为接收器。接收的信号如图 6 所示。

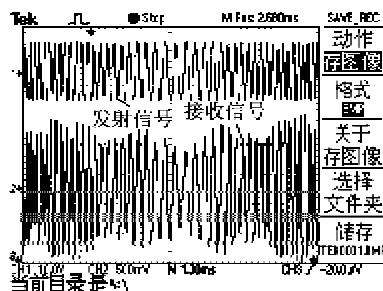


图 6 调频后信号与采集信号

调制信号的频率范围为 3~6 kHz,接收到 1 个周期的调制信号,从 6 kHz 调到 3 kHz,再调回 6 kHz 需要 10 ms,可知载频 f_0 为 3 kHz,频率变化率 K 为 60 000/s²,从而根据式(1)可计算出相应的匹配滤波函数,匹配滤波函数与接收信号做卷积,得出时域函数,如图 7 所示。压缩后的脉冲宽度为 2 ms,与原脉冲的宽度 10 ms 相比有较大的压缩比,提高了距离向的分辨率,提高了信号的强度。

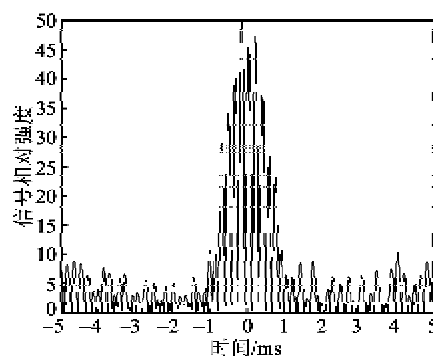


图 7 采集信号匹配滤波

5 结束语

线性调频信号最广泛的应用是直接数字式频率合成(DDS)技术,由于 DDS 技术需要数模转换电路输出模拟信号,必然导致信号有很多阶梯,带来大量的杂乱谱线,因此,本文设计了一种基于脉冲压缩技术的线性调频发声系统,解决调频信号的产生和接收。调频系统主要使用信号发生器芯片 MAX038,并用单片机控制调频和波形,通过实验验证了信号发生系统能输出稳定的、调频线性度较好的波形,较 DDS 的波形发生器来说,信号光滑,无毛刺噪声。系统输出信号频率范围为 0.1 Hz~20 MHz,频率范围宽。并使用了电容式声音传感器接收信号,由于传感器灵敏度跟频率有关,所以测到的信号并不是等幅度的,但通过匹配滤波,不影响其距离分辨率。实验证实该系统能发射出质量较高的线性调频信号,能完成声成像和测距的声音发射任务。

参考文献:

- [1] 李建立,刘纪元,焦学峰.脉冲压缩技术在水声测深中的应用[J].电子测量技术,2009,32(11):112-114.
LI Jianli, LIU Jiyuan, JIAO Xuefeng. Application of pulse compression technology in measurement of the depth using underwater acoustic[J]. Electronic Measurement Technology, 2009, 32(11): 112-114.
- [2] 杨建.脉冲压缩技术原理及 FPGA 实现[J].现代电子技术,2010,20(331):17-19.
YANG Jian. Principle of pulse compression and FPGA implementation [J]. Modern Electronics Technique, 2010, 20(331): 17-19.
- [3] 王剑峰,孙晶华.基于 dsPIC 和 FPGA 的可控线性调频信号源设计[J].电子信息对抗技术,2010,25(4):77-81.
WANG Jianfeng, SUN Jinghua. Design of controllable linear frequency modulation signal source based on dsPIC and FPGA [J]. Electronic Warfare, 2010, 25(4): 77-81.
- [4] 章小梅,姜茂仁,费元春.基于 DDS 的宽带线性调频源中椭圆低通滤波器设计[J].青岛大学学报,2006,21(3):46-49.
ZHANG Xiaomei, JIANG Maoren, FEI Chunyuan. Elliptic low-pass filter design based the DDS broadband chirp source[J]. Journal of Qingdao University, 2006, 21(3): 46-49.
- [5] SAQIB E, AMIR S M. Muhammad junaid mughal real time implementation of digital LFM pulse compression technique over acoustic waveguides[J]. International Journal of Engineering & Technology, 2010, 10(4): 22-25.
- [6] MICHAEL L, OELZE. Bandwidth and resolution enhancement through pulse compression[J]. Ieee Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics, and Frequency Control, 2007, 54(4): 768-781.
- [7] 黄庆彩,祖静,裴东兴.基于 MAX038 的函数信号发生器的设计[J].仪器仪表学报,2004,25(4):311-322.
HUANG Qingcai, ZU Jing, PEI Dongxing. Signal generator design with integrated circuit MAX038[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(4): 311-322.
- [8] 鲍祖尚.基于 MAX038 的信号发生器设计[J].中南林业科技大学学报,2010,30(7):181-184.
BAO Zushang. Design of signal generator based on MAX038[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2010, 30(7): 181-184.

欢迎订阅《压电与声光》杂志