

# 基于 FPGA 的非线性调频信号脉冲压缩的实现

徐 飞, 陈建春, 李滢昕

(西安电子科技大学 电子工程学院, 陕西 西安 710071)

**摘要** 非线性调频信号在信号设计时即考虑到脉冲压缩信号距离旁瓣的抑制, 无需在硬件实现中添加加权网络抑制距离旁瓣。文中介绍了非线性调频信号的设计方法, 通过 Matlab 仿真验证了不同设计方法的非线性调频信号的脉冲压缩性能。并在 FPGA 仿真环境下实现了带宽 30 MHz, 采样率为 100 MHz, 输入信号量化位数为 16 bit, 时长为 10.24  $\mu\text{s}$  的线性及非线性调频信号的脉冲压缩。

**关键词** FPGA; 非线性调频信号; 脉冲压缩

中图分类号 TN79 文献标识码 A 文章编号 1007-7820(2014)09-106-03

## Implementation of Non-linear Frequency Modulation Signals Pulse Compression Based on FPGA

XU Fei, CHEN Jianchun, LI Yingxin

(School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract** Non-linear Frequency Modulation Signals in the signal design that takes into account distance side-lobe suppression of pulse compression signals, weighted networks without adding hardware implementations to suppression distance sidelobe. The design of non-linear frequency modulation signals is introduced, and the pulse compression signal performance of different design methods for non-linear frequency modulation signals is simulated. A bandwidth of 30 MHz at a sampling rate of 100 MHz is achieved with 16 bit input signal quantization, 10.24  $\mu\text{s}$  length of the linear and nonlinear frequency modulation signal compression in the FGPA simulation environment.

**Keywords** FPGA; non-linear frequency modulation signals; pulse compression

随着现代电子技术和飞行技术的发展,对雷达的作用距离、分辨能力、测量精度和单值性等性能指标提出越来越高的要求,因此雷达信号形式的选择和信号处理的方式起着重要作用。在脉冲压缩技术中,雷达所使用的发射信号波形的设计,是决定脉冲压缩性能的关键。非线性调频信号(NLFM)的频率随着时间做非线性变化,NLFM 相当于将线性调频信号(LFM)所引入的加权网络的作用转移分配在发射系统和接收系统中,所以无需再用加权网络,而只需改变发射信号的频谱和匹配滤波器的传递函数,因此,NLFM 可直接进行匹配滤波即可得到较低的旁瓣而无需加权处理,从而避免了 LFM 引入加权所带来的信噪比损失问题<sup>[1]</sup>。

### 1 非线性调频信号的设计

NLFM 信号的设计主要有两种方法,本文中主要研究的是窗函数反求法<sup>[2]</sup>。假设 NLFM 信号  $s(t) = a(t)\exp[j\theta t]$  的频谱为  $S(\omega)$ ,对应的匹配滤波器传递函数为  $S^*(\omega)$ ,则脉压输出信号  $y(t)$  的频谱为

$$F[y(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} y(t) \exp(-j\omega t) dt = S^*(\omega)S(\omega) = |S(\omega)|^2 \quad (1)$$

如果选择某种窗函数  $W(\omega)$  作为脉压输出信号的频谱,那么也就确定了脉压输出信号,同时保证了脉压输出有足够低的旁瓣电平。

根据逗留相位原理有<sup>[3]</sup>

$$\theta''(\omega) \approx -\frac{|S^2(\omega)|}{a^2(t)} \quad (2)$$

假设发射信号的包络为矩形。即  $a(t) = 1(0 \leq t \leq T)$ ,根据信号功率谱  $|S(f)|^2$  和所选定的某种窗函数  $W(f)$  来设计信号,由式(1)可得

$$\theta''(\omega) = -2\pi |S^2(f)| = -2\pi W(f) \quad (3)$$

由式(3)可得 NLFM 信号的群延时  $T(f)$  为

$$T(f) = -\theta'(f)/2\pi = K_T \int_{-\infty}^f W(x) dx \quad (4)$$

其中,  $K_T$  为常数。

对式(4)求反函数,可求得 NLFM 信号的调频函数  $f(t)$

$$f(t) = T^{-1}(f) \quad (5)$$

对于简单的函数是容易求出其反函数的,但对于解析式复杂的函数来说,求其反函数需借助数值分析的方法。

以 Hamming 窗为例,其函数表达式为<sup>[4]</sup>

收稿日期: 2014-01-01

作者简介: 徐飞(1988—),男,硕士研究生。研究方向: 软件无线电。E-mail: honkyi@sina.com

$$W(f) = 0.54 + 0.46 \cos(2\pi f/B) \quad (6)$$

由式(5)和式(6)可得

$$T(f) = 0.54kf + (0.27kB/\pi) \sin(2\pi f/B), \quad -B/2 \leq f \leq B/2 \quad (7)$$

令  $T(f)|_{f=B/2} = T/2$ , 则常数  $K_T = (T/B)/0.54$ , 代入式(7)得

$$T(f) = (T/B)f + (0.426T/\pi) \sin(2\pi f/B), \quad -B/2 \leq f \leq B/2 \quad (8)$$

这种方法得到的信号调频斜率为 S 形曲线, 因此这种 NLFM 信号也称作 S 形 NLFM 信号。

## 2 匹配滤波的实现

匹配滤波的实现方法分为频域与时域处理两种方法。时域求解, 随着大时宽的信号匹配时, 由于输入离散信号的点数增多, 不仅硬件资源需求较大, 并且需要逐级延时, 导致数据增长, 计算时间也会显著增加。频域求解就是将卷积转换为频域的相乘, 并利用逆傅里叶变换, 将频域相乘的结果再转化时域解<sup>[5]</sup>。由于本通常应用中时宽带宽较大, 因此需要采用频域方法进行求解, 且目前数字逻辑器件处理 FFT 的速度大幅加快, 频域求解法得到广泛的应用<sup>[6]</sup>。其数学表达式如下

$$Y(f) = S(f) \times H(f) \quad (9)$$

其中,  $Y(f)$  为脉冲压缩信号的傅里叶变换;  $S(f)$  为雷达系统接收到的信号的傅里叶变换;  $H(f)$  为匹配滤波器的傅里叶变换。将  $Y(f)$  经傅里叶逆变换, 即可得到脉冲压缩信号  $y(t)$ , 如式(10)所示

$$y(t) = F^{-1}[Y(f)] \quad (10)$$

## 3 仿真验证

设计采用 Xilinx FPGA 自带的 IP 核实现 FFT 算法, 该 IP 核可实现定点复数和浮点复数的 FFT 变换或 IFFT 变换, 变换长度可达到  $N = 2^m$ ,  $m = 3 \sim 16$ , 数据精度可达到  $b_x = 8 \sim 34$  位, 旋转因子精度可以达到  $b_w = 8 \sim 34$  位<sup>[7]</sup>。且在 FFT 核运行期间, 可改变变换长度和每级蝶形运算的截断位数, 此 IP 核有 4 种实现结构, 文中采用定点流水线结构来实现 FFT 和 IFFT。FFT 的启动由复位信号控制, 由于复数乘法器输出无延时, 所以 IFFT 的启动由 FFT 的变化完成标志信号 (done) 控制, 完成 IFFT 的启动。

为节省资源, 设计通过 Matlab 仿真预先得出匹配滤波器的 FFT 变换结果, 存储在 ROM 中, 为保证 FFT 数据与匹配滤波器系数同时送入复数乘法器, FFT 核输出数据索引值 (addr) 需要加一级寄存器延时之后作为 ROM 输出数据的地址<sup>[8]</sup>, 输出数据  $H'(f)$  送入复数乘法器。FPGA 实现框图如图 1 所示。

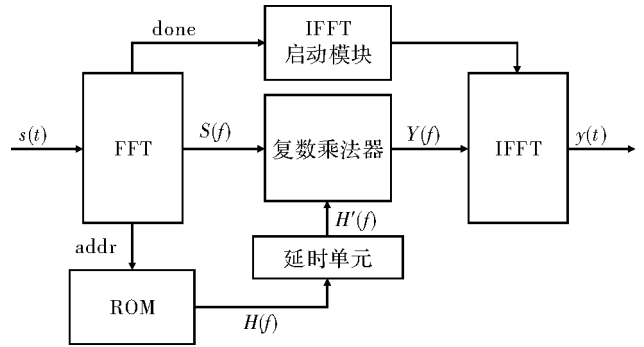


图 1 FPGA 实现框图

分别设计了一个带宽 30 MHz、时长为 10.24  $\mu\text{s}$  的线性调频回波信号和一个基于 Hamming 窗的非线性调频回波信号, 采样率为 100 MHz, 输入信号量化位数为 16 bit, 在 FPGA 仿真环境下, 分别对其进行仿真。

图 2 和图 3 分别为非线性调频回波信号和线性调频回波信号在 FPGA 仿真环境下的仿真结果。由于整个设计均采用流水线结构经行串行处理, 所以可满足实时处理的需求, 其输入输出数据的延时为 74.089  $\mu\text{s}$ , 将其仿真数据读入到 Matlab 中对其进行取模比较, 在取模后的结果中可以看出, 非线性调频回波信号经过脉冲压缩后主副瓣比可达 -40.39 dB。此外, NLFM 的脉冲压缩无需加权处理, 从而避免了 LFM 引入加权所带来的信噪比损失。

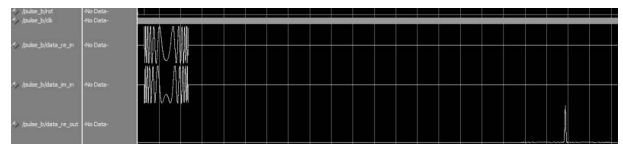


图 2 非线性调频信号 FPGA 仿真环境结果

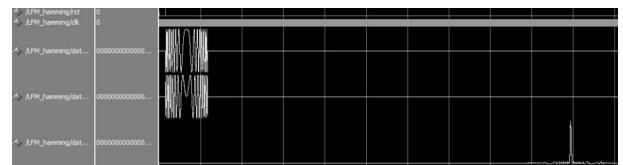


图 3 线性调频信号 FPGA 仿真环境结果

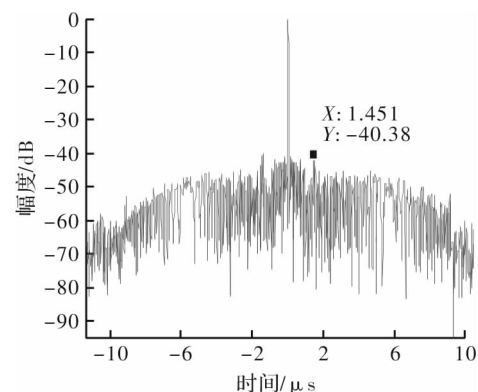


图 4 线性调频信号加权脉冲压缩仿真取模结果

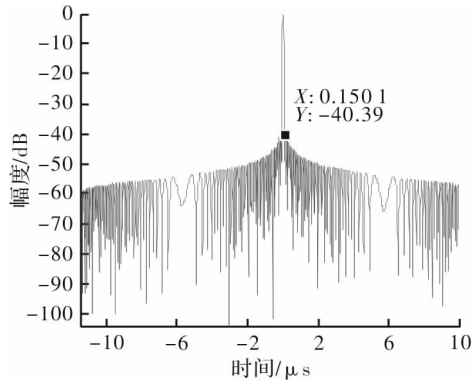


图5 非线性调频信号脉冲压缩仿真取模结果

## 4 结束语

本文使用FPGA仿真环境Modelsim仿真并实现了非线性调频信号的脉冲压缩算法。采用非线性调频信号无需加权处理即可得到较高的主副瓣比,因而避免了LFM引入加权所带来的信噪比损失问题<sup>[8-9]</sup>。随着FPGA技术和非线性调频信号设计方法的发展,非线性调频信号的良好脉冲压缩效果和FPGA实现的灵活

(上接第105页)

## 3 结束语

文中所设计的线性温度补偿电路,主要针对锂电池冲电芯片,尤其是大电流线性充电芯片所引起的发热问题,设计出不影响其正常工作的线性过温保护电路。同时本文所设计的电路对工艺的依赖性较弱,具有较强的适用性。此外,线性的过温保护,不仅对外部环境的调节能力较强,且对电池和芯片均具有良好的保护,因此能够增加其的使用寿命。

## 参考文献

- [1] KAN L, PHILIP K T MOK, SAI K L. A low-voltage CMOS low-dropout regulator with enhanced loop response [M]. USA: IEEE, 2008.
- [2] WANG CHUACHIN, POMING LEE, WU CHIFENG, et al. Fundamental theory and applications [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2003, 50(9): 911-920.

性也将得到广泛应用。

## 参考文献

- [1] 张良. 一种NLFM脉压波形的优化设计方法[J]. 现代雷达, 1994(5): 27-34.
- [2] 彭志刚, 杨志国, 彭世蕤. 一种非线性调频信号数字脉压性能分析[J]. 空军预警学院学报, 2003, 17(3): 51-53.
- [3] 林茂庸, 柯有安. 雷达信号理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1984.
- [4] 汪堃. 基于FPGA的脉冲压缩系统研究与实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- [5] 潘琳. 基于FPGA的雷达脉冲压缩系统的研究与实现[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [6] 刘霜. 基于FPGA的软件雷达脉压处理器的实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [7] 戴小燕. 目标识别雷达频域脉冲压缩技术FPGA设计研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
- [8] 章蕾, 许述文, 刘韬. 基于FRFT的非线性调频信号检测[J]. 电子科技, 2010, 23(2): 68-71.
- [9] 姜玮华, 刘波, 邢孟道. 基于FPGA雷达成像方位脉冲压缩系统的设计[J]. 电子科技, 2009, 22(10): 36-39.

- [3] 卢一鑫, 李院院. 两种低功耗新型过温保护电路的设计[J]. 现代电子技术, 2012, 35(18): 159-161.
- [4] 田楠, 张国俊. 一种带过温过流过压保护的LDO设计[J]. 微电子学与计机, 2013(4): 139-142.
- [5] KUSH G, HAESEUNG L. A high-swing, CMOS telescopic operational amplifier [J]. IEEE Journal of Solid-state Circuits, 2010, 35(1): 129.
- [6] 谭传武, 陈卫兵, 邹豪杰, 等. 电源管理芯片中过热保护电路设计[J]. 湖南工业大学学报, 2009, 23(5): 31-34.
- [7] 毕查德·拉扎维. 模拟CMOS集成电路设计[M]. 陈贵灿, 译. 西安: 西安交通大学出版社, 2003.
- [8] 覃贤芳, 唐宁, 杨盛波. 可用于音频功放的过温保护电路设计[J]. 电子科技, 2009, 22(10): 7-9, 35.
- [9] 蔡小祥, 张雨河, 王会影, 等. 一种基于电流比较的新型过温保护电路[J]. 微电子学, 2012, 42(1): 58-62.
- [10] 吕连国, 方健, 张波, 等. 一种新型双稳态过温保护电路[J]. 电子科技大学学报, 2007, 36(1): 50-52.