

# 基于 FPGA 的线性调频信号脉冲压缩设计

刘少强 姜 军

(中国人民解放军 91336 部队 秦皇岛 066000)

**摘 要:**线性调频信号是现代雷达系统中一种常用的信号形式,通过脉冲压缩处理,可以得到良好的距离和径向分辨率。在研究线性调频信号脉冲压缩基本原理的基础上,得出通过时域匹配滤波、基本运算卷积加法等处理实现信号脉冲压缩的方法,并做了 MATLAB 仿真分析。详细介绍了基于 FPGA 技术的线性调频信号脉冲压缩的设计方法,使用 Xilinx 公司的 XC6VLX240T 芯片和 ISE 开发软件进行硬件系统的实现,并将结果与仿真效果进行对比,验证了硬件实现脉冲压缩的可行性与有效性。

**关键词:**脉冲压缩;线性调频;现场可编程门阵列;信号处理

**中图分类号:** TN958.3   **文献标识码:**A   **国家标准学科分类代码:** 510.1010

## Design of linear frequency modulation signals pulse compression based on FPGA

Liu Shaoqiang Jiang Jun

(Unit 91336 of PLA, Qinhuangdao 066000, China)

**Abstract:** Linear frequency modulation signal is a kind of commonly signal form used in modern radar system, through the pulse compression process, high distance and velocity resolution can be obtained. On the research of the basic principle of pulse compression of LFM signal, obtained a method to realize signal pulse compression processing by using the time matchfilter and convolution operation, and an analysis simulated in MATLAB is given here. Introduces in detail the pulse compression of LFM signal based on FPGA technology, Xilinx company XC6VLX240T chips and develop software ISE is used to realize the hardware system, and to compare the results with the simulation results, demonstrates the reliability and feasibility of realizing pulse compression by hardware.

**Keywords:** pulse compression; linear frequency modulator; FPGA; signal processing

### 1 引言

随着飞行和电子技术的快速发展,对气象雷达的作用距离、测量精度、分辨力等性能指标提出的要求越来越高。其测距精度、距离分辨率主要由信号频率结构决定,为了提高测距精度和距离分辨力,这要求信号有较大的带宽;而测速的精度和测量速度由信号的时间结构决定,为了提高测速精度和速度分辨力,这要求信号有较大的时宽。所以,雷达的理想信号应同时具备大的带宽、时宽,但是在单载频脉冲信号中,二者无法同时存在<sup>[1-3]</sup>。脉冲压缩技术较好地解决了雷达脉冲峰值功率受限和距离分辨率之间的矛盾。

以往通常在 DSP 器件上通过软件编程实现脉冲压缩算法,其缺点是处理速度慢、延时大、效率低。随着现代电

子技术的飞速发展,低功耗、小体积、实时性已成为电子设备的发展趋势<sup>[4]</sup>。

现场可编程门阵列(field-programmable gate array, FPGA),以其高速、并行的工作优势,在数字信号的高速信号处理领域有着广泛的应用<sup>[5]</sup>。FPGA 灵活性强,可根据需要对内部逻辑进行任意改动,容易实现各种雷达算法。采用 FPGA 来实现脉压算法,能够解决脉压系统的体积、功耗和处理能力等问题<sup>[6]</sup>。

本文提出的基于 FPGA 实现的数字脉冲压缩处理器,对线性调频信号做脉压处理,具有良好的动态范围和处理精度。

### 2 理论基础与仿真

#### 2.1 线性调频

线性调频是最早和发展最充分的脉冲压缩技术,信号

产生和处理都比较容易,技术上比较成熟,并且它对多普勒频移具有较强的容忍性。线性调频通过线性频率调制等方式获得较大的时宽频宽积,并在接收时实现脉冲压缩<sup>[7]</sup>。线性调频信号可以表示为:

$$x(t) = A \cdot \text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) \cdot \exp\left[j\left(2\pi f_0 t + \frac{\mu}{2} \cdot \frac{t^2}{\tau}\right)\right] \quad (1)$$

$$\text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) = \begin{cases} 1, & |t/\tau| \geq 1/2 \\ 0, & |t/\tau| < 1/2 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $A$ 为信号幅度, $t$ 为时间, $\tau$ 为脉冲宽度。

信号频率在脉冲宽度 $\tau$ 内,角频率从 $2\pi f_0 - \mu\tau/2$ 变化到 $2\pi f_0 + \mu\tau/2$ 。

## 2.2 脉冲压缩

脉冲压缩可以使雷达在峰值发射功率大大降低的情况下同时获得长脉冲的高能量和短脉冲的分辨率两方面的优点,它较好地解决了雷达脉冲峰值功率受限和距离分辨率之间的矛盾。

理想的脉冲压缩系统需要两个条件:第一,脉冲信号需要有非线性相位谱,即脉冲宽度和频谱宽度的乘积 $B \times T \gg 1$ ,且包络接近于矩形;第二,在系统的接收端通过匹配滤波对信号进行压缩时,信号的频谱特性满足共轭匹配<sup>[8]</sup>。

线性调频信号在幅度谱上近似为一个矩形,在相位谱上近似为二次函数,通过匹配滤波可转变为一次函数,再经过傅里叶逆变换可将该信号转变为具有窄包络的函数(sinc函数)<sup>[9-10]</sup>。

匹配滤波器频率特性为 $H(\omega)$ ,那么根据匹配滤波的条件应该满足下式关系:

$$H(\omega) = K |U_i(\omega)| \exp[-j\phi_i(\omega)] \exp[-j\omega t_{d0}] \quad (3)$$

对脉压输出的频谱进行计算:

$$U_o(t) = \frac{A\Delta\omega}{2\pi} \sqrt{\frac{2\pi \sin[\Delta\omega(t-t_{d0})/2]}{\mu \Delta\omega(t-t_{d0})/2}} \exp[j\omega_0(t-t_{d0})] \quad (4)$$

将 $\Delta\omega = 2\pi B, \mu = \frac{2\pi B}{\tau}, \omega_0 = 2\pi f_0$ 代入,取实部得到最终的时域结果为:

$$U_o(t) = A \sqrt{D} \frac{\sin[\pi B(t-t_{d0})]}{\pi B(t-t_{d0})} \cos 2\pi f_0(t-t_0) \quad (5)$$

输出波形如图1所示。由图1可见,输出信号具有sinc函数的形式;输出有效脉宽比输入缩小 $D$ 倍,也表明输出的功率峰值比输入增大了 $D$ 倍。

## 2.3 理论仿真

设滤波器的输入信号是 $I/Q$ 基带信号,信号带宽为1 MHz,采样率3.125 MHz,脉冲宽度为270  $\mu\text{s}$ ,使用MATLAB软件进行脉压系统仿真,仿真结果如图2所示,3幅波形a、b、c分别是线性调频信号(LFM)波形、脉冲压缩系数、脉冲压缩输出波形。

图2(a)中的线性调频信号波形的频率有着明显的变

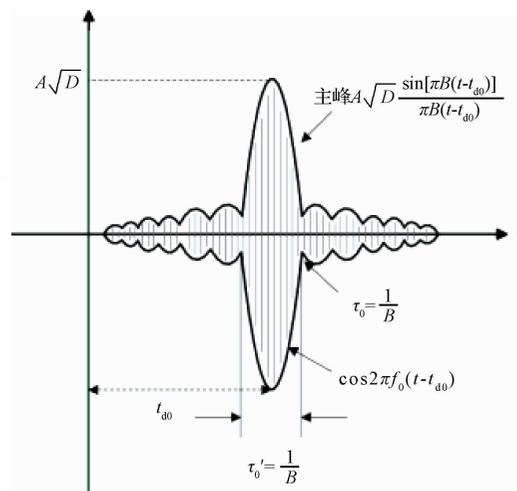


图1 匹配滤波的输出波形

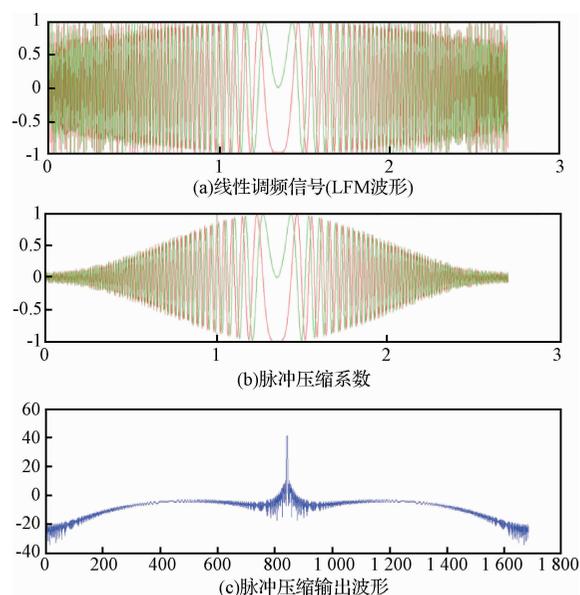


图2 匹配滤波的输出波形

化;图2(b)中的脉冲压缩系数用作FPGA硬件系统中的预设系数,通过写入到IP核中实现脉冲压缩的功能;图2(c)所示为脉冲压缩输出的仿真说明,经过脉冲压缩后输出的波形具有窄脉冲,其主瓣和第一副瓣的幅度比值 $\geq 35$  dB。

## 3 硬件系统与实现

### 3.1 硬件平台

本设计基于FPGA开发平台,使用Xilinx公司的XC6VLX240T作为数字信号处理的核心器件;使用AD(模数转换)和DA(数模转换)芯片,作为数据输入输出的处理器件;并使用光纤接口和PC机进行数据交换。模数转换器AD选用AD9650,该AD为双通道、16位数据传输芯片,最高转换速率为105 MHz;数模转换器DA使用ADI9783,该DA为双通道16位数据传输芯片,采样速率

最高为 500 MSPS;其他电路包括伺服控制等。

信号处理过程:首先在 FPGA 内部,由直接数字频率合成器(DDS)生成线性调频信号(LFM),通过 DA 芯片转换为模拟信号后,经发射机,由天线发射电磁波到目标物;而目标反射的电磁波信号,经由接收机传递给 AD 芯片,进行模数转换后输入到 FPGA 中;在 FPGA 中对信号数据进行抽取、数字下变频(DDC)、脉冲压缩等处理,再送入 PC 机中进行后期的雷达图形处理。信号处理过程如图 3 所示。

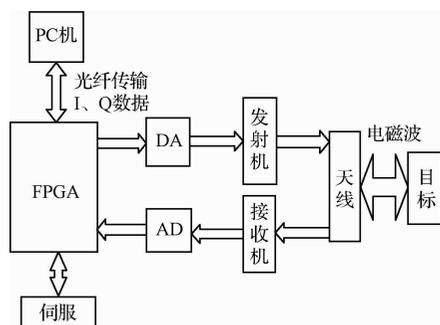


图 3 硬件系统信号处理过程

### 3.2 脉压算法分析及硬件实现

脉冲压缩电路对输入信号(LFM 等)进行匹配滤波,在时域处理时,对输入信号  $x(n)$  以及匹配滤波器的脉冲响应函数  $h(n)$  作卷积运算,得到匹配滤波的响应结果<sup>[11]</sup>,其输入输出的关系可表示为:

$$y = x * h \quad (6)$$

在冲击响应有限的情况下,式(6)可以转换为:

$$y(n) = \sum_{m=0}^{N-1} x(m)h(n-m) \quad (7)$$

通过数字下变频,原信号变成正交的 I、Q 信号并,代入式(7),得到:

$$y(n) = [x_i(n) * h_i(n) - x_q(n) * h_q(n)] + j[x_i(n) * h_q(n) + x_q(n) * h_i(n)] \quad (8)$$

综上所述,进行时域的匹配滤波器共需要 4 组相关运算,而两个信号的卷积通常使用 FIR 滤波器来实现,故需要 4 组 FIR 滤波器并行工作<sup>[12]</sup>,最终输出两路 I、Q 数据。其结构如图 4 所示。

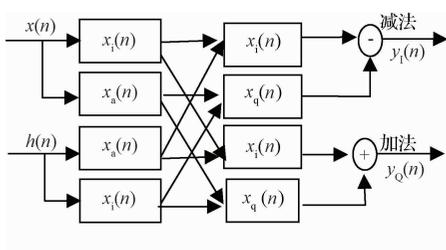


图 4 时域脉压算法结构

在 FPGA 中,调用 Xilinx 公司开发软件 ISE 中自带的 IP 核 FIR compiler 来实现上述算法。其界面如图 5 所示。

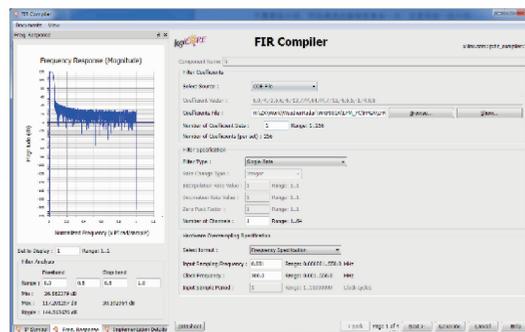
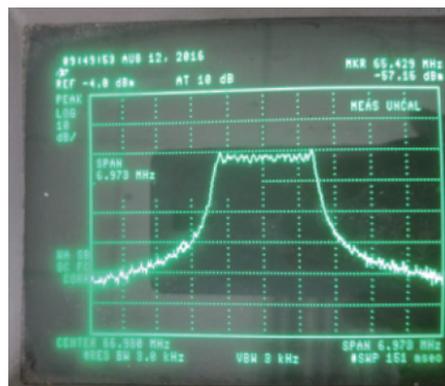


图 5 FIR compiler 界面

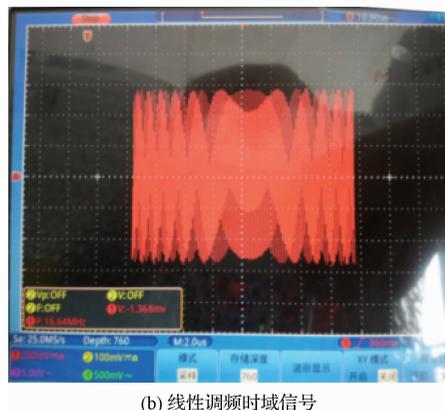
其中,匹配滤波系数的大小根据输入信号的频谱的复共轭进行设置;该滤波系数先由 MATLAB 计算产生<sup>[13]</sup>,将该系数转化为 coe 文件后,存放 FIR compiler IP 核中,硬件系统将按照该预设系数进行匹配滤波工作。

### 4 硬件实现结果与分析

硬件系统的处理器设计是在 Xilinx 开发软件 ISE 上,用 VHDL 语言进行的。目标的回波信号经过 ADC 芯片,传输到 FPGA 中进行处理。输入的回波信号(线性调频信号)由频谱仪和示波器分别测得频域、时域图像,如图 6 所示。



(a) 线性调频频域信号



(b) 线性调频时域信号

图 6 线性调频信号频域信号和时域信号

回波信号经过 DDC 模块后,分为 I、Q 两路数据,作为脉冲压缩模块的输入数据。其时域图如图 7 所示,不

同线型分别代表 I、Q 数据,横坐标表示时间,纵坐标表示幅度。

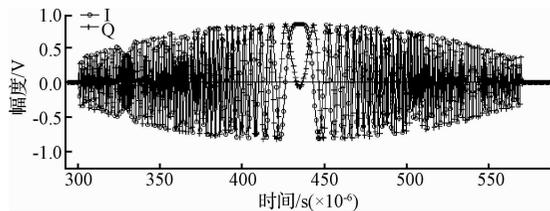


图7 脉压处理输入信号 I、Q

将获得的下变频 I、Q 信号输入到脉冲压缩模块中,按照 3.2 节中所介绍的四组 FIR 滤波器进行相关运算处理,获得脉压处理的结果。使用 PC 软件对 FPGA 中的脉压结果数据进行采集,得到如图 8 所示的波形图,不同线型分别代表 I、Q 数据,横坐标表示时间,纵坐标表示幅度。可以明显看出,脉冲信号得到压缩,主瓣信号明显地高于周围旁瓣的幅度值。经实际计算验证,脉压信号的主副瓣比 $\geq 35$  dB,与仿真结果相同,表明硬件系统设计正确。

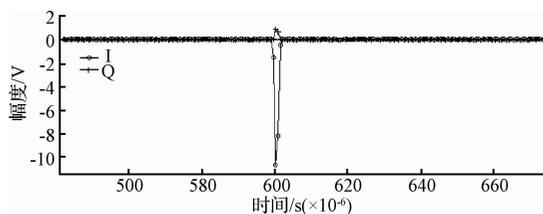


图8 PC 获得脉压处理结果

## 5 结论

本文从理论上对雷达波线性调频信号以及雷达信号脉冲压缩的基本原理进行了阐述和推导;并给出了基于 FPGA 平台的线性调频信号的脉冲压缩的设计思路与具体实现方法,并经计算脉压信号的主副瓣比与 MATLAB 仿真结果相同,具有良好的动态范围和处理精度,验证了系统工作的正确性与有效性。

## 参考文献

- [1] 承德宝. 雷达原理[M]. 北京:国防工业出版社,2008:233-235.
- [2] 张明友,汪学刚. 雷达系统[M]. 北京:电子工业出版社,2006.
- [3] 吴顺春,梅晓春. 雷达信号处理和数据处理技术[M]. 北京:电子工业出版社,2008.
- [4] 丁智泉. 线性调频信号的脉冲压缩系统设计与 FPGA 实现[D]. 成都:电子科技大学,2007:8-12.
- [5] 张德学,张小军,郭华. FPGA 现代数字系统设计及应用[M]. 北京:清华大学出版社,2015.
- [6] 苏斌,刘畅. 基于 FPGA 的脉冲压缩处理器设计与实现[J]. 电子测量技术,2014,37(7):58-61.
- [7] 乔治·斯廷森. 机载雷达导论(第二版)[M]. 电子工业出版社,2005.
- [8] 郑力文,孙晓乐. 线性调频信号数字脉冲压缩技术分析[J]. 现代电子技术,2011,34(1):39-42.
- [9] 何欣远. 数字下变频的 FPGA 技术的研究[D]. 武汉:华中科技大学,2010:20-27.
- [10] 郑新春. 脉冲压缩雷达地杂波模拟与系统实现[J]. 雷达与对抗,2005(1):18-24.
- [11] 王小哲,张金成. 基于 FPGA 的雷达脉冲压缩处理器设计[J]. 现代防御技术,2008,36(6):135-139.
- [12] 郑程. 基于 FPGA 的数字下变频与数字脉冲压缩技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011:40-49.
- [13] 杜勇. 数字滤波器的 MATLAB 与 FPGA 实现[M]. 北京:电子工业出版社,2014.

## 作者简介

刘少强,1986 年出生,学士,助理工程师,主要研究方向为半实物仿真、仪器与测试技术、雷达工程等。

E-mail:andyshao20000@163.com

姜军,1985 年出生,学士,工程师,主要研究方向为雷达工程、仪器与测试技术、智能预测控制等。

E-mail:jiangjun3356@126.com