

文章编号:1005—0523(2005)02—0111—04

CORDIC 算法和 FPGA 在线性脉冲数字压缩系统中的应用

龚小年, 张兴敢

(南京大学 电子科学与工程系, 江苏 南京 210093)

摘要:脉冲压缩技术是为了提高雷达的发现距离的同时又保证高的距离分辨率. 脉冲压缩信号种类繁多, 线性调频信号由于其突出优点在脉冲压缩系统中应用最为广泛. 本文从脉冲压缩基本理论出发, 介绍了线性脉冲数字压缩系统, 重点阐述了 CORDIC 算法和 FPGA 在数字脉压系统中的应用, 最后给出了实际完成的数字脉压系统相应实验结果.

关 键 词:CORDIC 算法;FPGA;脉冲压缩

中图分类号:TM392.3

文献标识码:A

1 引 言

随着现代武器和飞行器的发展,对雷达的作用距离、距离分辨率等性能提出了越来越高的要求. 根据雷达信号理论,作用距离和距离分辨力之间存在着不可调和的矛盾,脉冲压缩技术有效地解决了这一矛盾.许多学者对脉压信号波形设计进行了较为深入的研究,提出了种类繁多的脉冲压缩信号.其中以线性调频信号的应用最为广泛.线性调频(LFM)信号是一种瞬时频率随时间呈线性变化的信号.它突出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.

1 脉冲的原理

脉冲压缩是采用大时宽一带宽积的脉压信号,在接收端用匹配滤波器对回波信号进行处理,将宽脉冲压缩为窄脉冲;这样既提高了雷达的作用距离,又保证了高的距离分辨率.脉冲压缩是通过接收的调频信号 $s(t)$ 与匹配滤波器的脉冲响应 h

(t)求卷积的方法来实现.数字脉压系统中首先对调频回波进行量化得到离散的调频信号 $s(n)$;数字脉压过程即通过对回波序列 $s(n)$ 与匹配滤波器的脉冲响应序列 $h(n)$ 求卷积实现.匹配滤波器的输出为:

$$y(n)=s(n)*h(n)=\sum_{i=0}^{n-1}s(i)h(n-i) \quad (1)$$

依据式(1)的实现方法叫做时域相关法;根据傅里叶变换理论,时域卷积等效于频域相乘.因此式(1)可以采用快速傅里叶变换(FFT)及反变换(IFFT)在频域内实现,称为频域 FFT 法,用公式(3)表示为:

$$y(n)=\text{IFFT}\{\text{FFT}[s(n)]\cdot\text{FFT}[h(n)]\} \quad (2)$$

时域相关法和频域 FFT 法均在脉冲系统中得到了广泛的应用.时域相关法的优势在于当数字相关器的运算速度可达到 A/D 的采样速度,则整个系统可以实时的进行脉压处理;输入信号的长度不受滤波器阶数的限制;其缺点是运算量大.频域 FFT 法比时域相关法大大减少了运算量,从而降低了硬件的要求,本实验中采用频域 FFT 法.

2 数字脉冲压缩系统

脉冲压缩系统分为脉压信号产生和脉压信号处理两部分,早期的脉冲压缩系统工程实现采用模拟方法.近年来,随着数字技术和大规模集成电路技术的飞速发展,采用数字技术实现脉冲压缩越来越显示出优越性,数字化的脉冲压缩系统具有稳定、受干扰小、工作方式灵活多样和易于控制的优点,是脉压系统的发展趋势.

线性脉冲数字压缩系统的框图如图(1),系统采用 I、Q 双通道处理,可避免约 3dB 的系统处理损失.回波信号经过抽样送 A/D 转换成数字信号,然后由数字滤波器进行低通滤波和抽取滤波,进行匹配滤波和加权处理、平方求模后,经 D/A 输出压缩波形.系统由数字下变频器(DDC)和匹配滤波组成;DDC 由本地振荡器(NCO)、混频器、低通滤波器和抽取器组成;低通滤波器采用 FIR 滤波器.

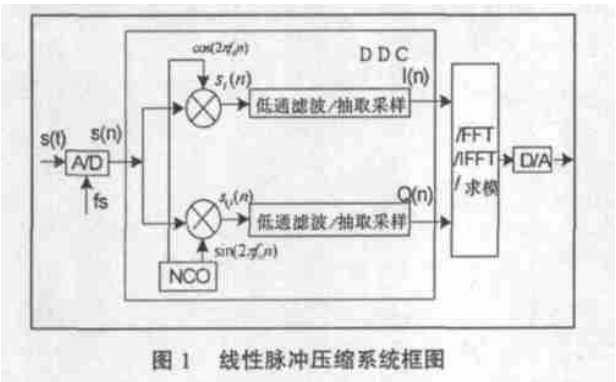


图 1 线性脉冲压缩系统框图

3 CORDIC 算法在系统中的应用

CORDIC(Coordinate Rotation Digital Computer)算法是 J· D V older 于 1959 年提出的,目前已经做了理论上的扩展.CORDIC 算法的基础是在直线坐标、圆坐标和双曲线坐标系统中作坐标旋转,计算何种函数就选取三种坐标系的一种来进行旋转计算,这些坐标系均采用 m 参数来表征,表 1 中给顶了三种模式旋转角度的选择.

表 1

坐标系	参数 m	夹角 θ_k	半径因子 k_i
圆坐标	$m=1$	$\arctan \alpha_i$	$(1+\alpha_i^2)^{1/2}$
直线坐标	$m=0$	α_i	1
双曲线坐标	$m=-1$	$\operatorname{arctanh} \alpha_i$	$(1-\alpha_i^2)^{1/2}$

CORDIC 算法可表示为:

$$\begin{bmatrix} X_{k+1} \\ Y_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & m\theta_k \alpha_k \\ m\theta_k \alpha_k & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_k \\ Y_k \end{bmatrix}$$
$$Z_{k+1} = Z_k + \theta_k \alpha_k \tag{3}$$

在每次迭代中,CORDIC 算法执行映射,其中两个旋转方向是 $Z_k \rightarrow$ 和 $Y_k \rightarrow 0$.

基于以上 CORDIC 计算原理可知 CORDIC 算法能够应用于大多数数字信号处理领域中,在线性调频数字脉冲压缩系统中 CORDIC 算法主要有两大应用:一是产生 sin/cos 信号;二是实行 FFT/IFFT 变换.

系统中需要实时地提供给 I、Q 信号一对正交信号,传统的实现方法是采用查表、多项式展开或近似的方法.这些方法在速度、精度、简单性和高效方面不能兼顾.用 CORDIC 算法实现的产生正弦和余弦值能很好的兼顾这几个方面.而且由于 CORDIC 采用迭代运算,可以通过一些方法来优化设计并提高其速度.

在设计中根据精度的要求,实际采用的是由 16 级 CORDC 运算单元组成的流水线结构如图(2);流水线结构具有数据通道 X, Y, Z;在每一级的(X, Y)计算中,只需要移位和加/减法简单的操作,每一个 Z 级完成 $\arctan(2^{-i})$ 的加或减法运算.第一级的初始值 (X_0, Y_0) 为 $X = 1/K, Y = 0$. 其中 $k = \prod_{i=1}^{16} \sqrt{1+2^{-2i}} = 1.64676$,为预先计算值.

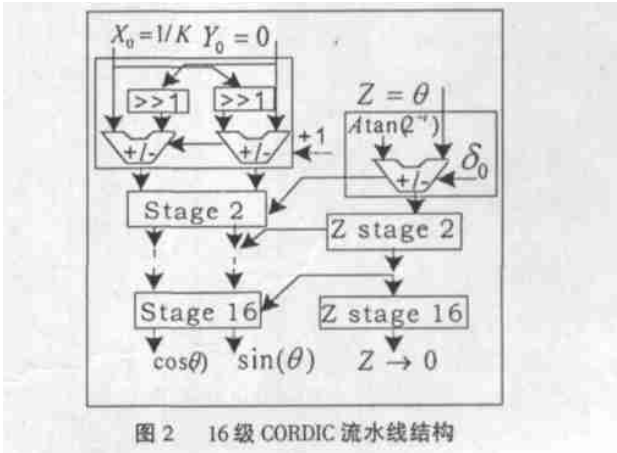


图 2 16 级 CORDIC 流水线结构

CORDIC 算法实现 FFT/IFFT 变换.考虑到基 2—FFT 算法结构简单但运算量大,系统中采用时间抽取(DIT)基 4—FFT 变换.序列 $x(n), n=0 \dots N-1$ 的 DFT 变换为 $X(K) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{kn} \quad k \in [0 \dots N-1]$ $\tag{4}$

基 4 的 DIT—FFT 算法是将输入序列 $x(n)$ 分成

如下四个子序列:

$$x_m(i) = x(4i + m) \quad (0 \leq m \leq 3, 0 \leq i \leq \frac{N}{4} - 1) \quad (5)$$

假设他们的 $\frac{N}{4}$ 点的 DFT 为 $X_m(r)$, 于是(5)式可以表示为:

$$X(K) \big|_{K=s\frac{N}{4}+r} = X(S \cdot \frac{N}{4} + r) = \sum_{m=0}^3 W_N^{m(s\frac{N}{4}+r)} \cdot x_m(r) \quad (0 \leq K \leq N-1, 0 \leq r \leq \frac{N}{4}-1, 0 \leq S \leq 3) \quad (6)$$

展开(7)式,用矩阵的形式可表示为:

$$\begin{Bmatrix} X(r) \\ X(r+\frac{N}{4}) \\ X(r+\frac{N}{2}) \\ X(r+\frac{3N}{4}) \\ x_0(r) \cdot W_{Nn}^0 \\ x_1(r) \cdot W_N \\ x_2(r) \cdot W_N^{2r} \\ x_3(r) \cdot W_N^{3r} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -j & -1 & j \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & j & -1 & -j \end{bmatrix} \quad (7)$$

由(8)式可知一个基4的蝶形运算单元可以看作是输入序列乘以旋转因子 W_N^{mr} 后,再与一个固定矩阵相乘.输入序列与旋转因子 W_N^{mr} 相乘的运算是一个复数乘法.利用 CORDIC 算法可以将序列与旋转因子的乘法分解为简单的移位和相加运算.旋转因子 $W_N^{mr} = \exp(-2j\pi mr/N)$, 可以看作是某一向量旋转 $\theta = -2\pi mr/N$ 度.根据上面介绍的 CORDIC 思想,把这一角度 θ 的旋转分成若干步骤进行.每次旋转 θ_n , 同时把 θ 减掉一个 θ_n , 然后根据 θ 的正负符号来确定下一步旋转角 θ_n 的正负,依次循环,直到 θ 趋于0,则该向量旋转了 θ 度.同样 IFFT 算法也可以根据类似方法实现.

4 FPGA 的应用和实验结果

FFT 运算一般有专用芯片,专用芯片虽然运算效率高,但是灵活性差;采用 FPGA 技术,在算法和处理方式上具有很高的灵活性,可以实现多种不同的算法.FPGA 在大规模复杂计算方面确实有很大的缺陷,但是随着分布式计算(Distributed Arithmetic, DA)的应用使得这种现象有所改观.DA 是一项重要

的 FPGA 技术,它的优点在于它使用的是查找表而不是乘法-累加器,因此计算的速度较快.此外,FPGA 在硬件上具有很强的稳定性,在软件上具有可编程的特点,可以根据不同的系统要求,采用不同的结构来完成相应的功能,具有很强的灵活性,便于进行系统功能扩展和性能升级.

实验中采用零中频线性调频信号,时宽为 $T = 50 \times 10^{-6}$ s,带宽为 $B = 8$ MHz,采样速率为 $f_s = 20$ MHz.线性调频信号经匹配滤波器后的输出脉冲具有 $\text{sinc}(t)$ 函数型包络,其最大副瓣电平为主瓣电平的一13.2dB,如图(4).在多目标环境中,旁瓣会淹没附近较小目标的信号,引起目标丢失;为了提高分辨多目标的能力,一般采用加权技术;但是采用加权技术会牺牲一定的信噪比.实验中采用余弦平方 $\cos^2(\frac{\pi f}{B})$ 窗函数进行加权,加权后脉冲压缩频谱如图(5).

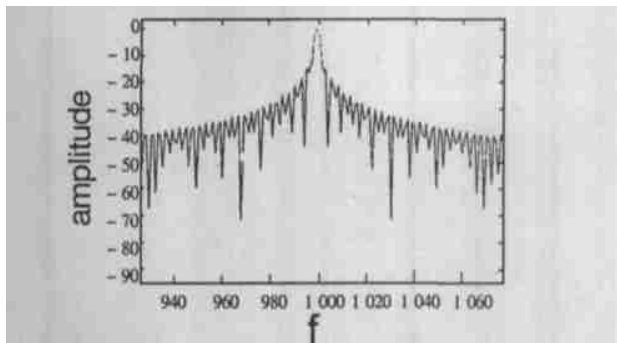


图4 匹配滤波输出谱

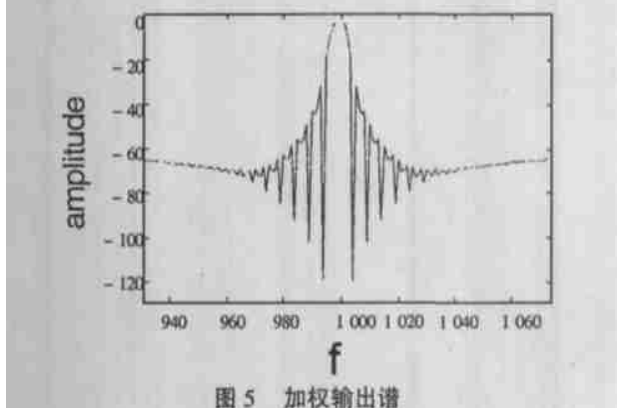


图5 加权输出谱

参考文献:

- [1] 张欣.扩频通信数字基带信号处理算法及其VLSI实现[M].北京:科学出版社,2004.
- [2] Uwe Meyer-Baese (著).刘凌,胡永生(译).数字信号处理的FPGA实现[M].北京:清华大学出版社,2003.
- [3] Banerjee Ayan, Sundar Dhar, Anindya, Banerjee Swapna. FPGA Arealization of a CORDIC based FFT processor for biomedical

signal processing. Microprocessors and Microsystems, 2001, 25 (3). [4] 禹卫东, 朱兆达. 小TB 线性调频数字脉压研究[D].

**Application of CORDIC Algorithm and FPGA in Digital
Pulse Compression System of LFM Signal**

GONG Xiao-nian, ZHANG Xing-gan

(Department of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: Pulse compression system is widely used in order to improve both distance and resolution in Radar system. This paper describes the fundamental theory of pulse compression and realization of digital pulse compression system; Especially, it is in accord with specific application of FPGA and CORDIC Algorithm in digital pulse compression system.
Key words: CORDIC Algorithm; FPGA; pulse compression