

数字脉压时域与频域处理方法的对比研究

贺志明* 黄巍 向敬成

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

【摘要】 雷达信号数字脉冲压缩处理主要采用时域和频域两种方法来实现。在专用DSP芯片大量用于数字脉冲压缩系统的同时,高性能的通用DSP芯片将使系统更加灵活。该文讨论了采用专用DSP芯片的数字脉冲压缩时域处理系统与频域处理系统,较完整地进行了实时系统测试,并通过计算机仿真,结合最新发展的通用DSP技术,对两种处理方法作出了较为全面的分析与比较。

关键词 脉冲压缩; 时域处理; 频域处理; 专用DSP; 通用DSP

中图分类号 TN958.3; TN951

Contradistinction Research Between the Digital Pulse Compression Time-domain and Frequency-domain Processing Method

He Zhiming Huang Wei Xiang Jingcheng

(College of Electronic Engineering, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract Radar signal digital pulse compression processing can be realized mostly by time-domain and frequency-domain methods. The special-purpose DSP chips have been used for the digital pulse compression processing systems widely. At the same time, the general-purpose DSP of high performance will make systems design more agile. The digital pulse compression time-domain processing system and frequency-domain processing system with the special-purpose DSP chips have been developed. On the basis of the real-time testing results obtained and through computer simulating, we made relatively overall analysis and comparison between these two methods, using the current technology of the general-purpose DSP.

Key words pulse compression; time-domain processing; frequency-domain processing; special-purpose DSP; general-purpose DSP

脉冲压缩技术的实现是指雷达通过发射机发射宽脉冲调频信号,而接收信号经处理后获得窄脉冲的过程,较好地解决了雷达脉冲峰值功率受限与距离分辨率之间的矛盾。同时,宽脉冲的应用可使多普勒系统的分辨率得到提高。由于压缩是对已知发射信号的回波作相关处理,故还具备较高的抗干扰性。

随着数字技术和大规模集成电路技术的飞速发展,数字脉冲压缩技术以其性能稳定、抗干扰能力强、控制方式灵活和硬件系统更小型化等优点,逐渐取代早期的模拟脉压技术,成为现代雷达脉冲压缩系统的发展趋势。

初期的数字脉压研究多通过FIR滤波器,采用时域处理方法来实现,随着高性能FFT专用器件

2001年12月25日收稿

* 男 29岁 在职博士生 讲师

的问世,更多地使用数字脉压的频域处理方法。但在一些小时宽带宽积(TB)信号的脉压系统中,由于时域处理具备设计方法成熟、实现简单、成本较低廉等优势,所以仍在使用。针对不同的应用要求,本文将采用这两种不同的方法,分别讨论数字脉压时域处理系统与频域处理系统,并通过计算机仿真和结合实际系统,进行较深入的对比研究。

1 数字脉冲压缩的两种方法

数字脉冲压缩技术应用数字信号处理方法完成相关匹配滤波,通常用时域处理和频域处理两种方法实现这一过程。用数字有限冲击响应(FIR)实现的脉冲压缩时域处理过程如图1所示;用快速傅里叶变换(FFT)实现的脉冲压缩频域处理过程如图2所示。

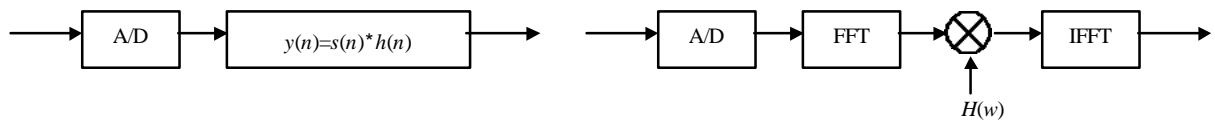


图1 时域处理

图2 频域处理

时域处理是直接对雷达回波信号进行卷积运算,其公式如下

$$y(n) = s(n) * h(n) \quad (1)$$

式中 $s(n)$ 为A/D采样之后的回波信号; $h(n)$ 为匹配滤波器的冲激响应; $y(n)$ 为脉压输出。

频域处理则是先用FFT计算出数字回波信号的频谱 $S(w)$,再将其与匹配滤波器的频响 $H(w)$ 相乘,最后进行快速傅里叶反变换(IFFT),得到脉压结果。整个过程如下

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

由数字信号处理基本理论可知,时域的两个信号的卷积相当于频域的乘积,所以,两种实现方法的本质一致。在实用中,这两种方法中究竟哪一种速度快,取决于输入序列的性质,诸如实的还是复的,非零域及对称性等。通常情况下,由于FFT算法固有的快速特点,频域实现比直接时域卷积运算更快。

在实际应用中,时域处理通常由横向滤波器来实现,常用的主要有IMSA100、PDSP16256等。在已经完成的时域脉冲压缩处理的硬件系统中,采用的就是将4片32级横向滤波器——A100级联而成128级FIR链,其最大可实现压缩比即为128。如果考虑附加旁瓣抑制处理,其实际可达到压缩比将有所减小。在脉冲压缩的频域处理中,通常选用专用FFT芯片(如PDSP16510、A41102、TMS2310等)来完成FFT及IFFT运算,其相乘运算由专用乘法器(如GA3806复数乘法器等)完成。近年来,随着高性能通用数字信号处理(DSP)芯片的问世,已开始越来越多地利用编程,以软件实现FFT、乘法运算及IFFT的全过程。在我们已经完成的频域脉冲压缩处理的硬件系统中,采用的是用两片专用FFT器件PDSP16510分别进行FFT和IFFT运算。

2 主要性能对比分析

2.1 两种方法计算机仿真结果的比较

通过计算机仿真,本文对带宽为5 MHz、时宽为19 μs 的LFM信号进行了时域和频域的脉冲压缩处理,并为了抑制旁瓣,均采取了Hamming窗加权及频谱修正的相同措施,其仿真结果如图3和图4所示,图中的压缩比为95,多普勒频移 $f_d = 40 \text{ kHz}$ 。

从图3和图4可以看出,频域处理方法得到的脉压主副比(RMS)指标高出时域方法4 dB以上,但时域处理方法得到的信噪比(SNR)损失要略小于频域方法,而多普勒频移(f_d)对两种方法的影响基本上一致。

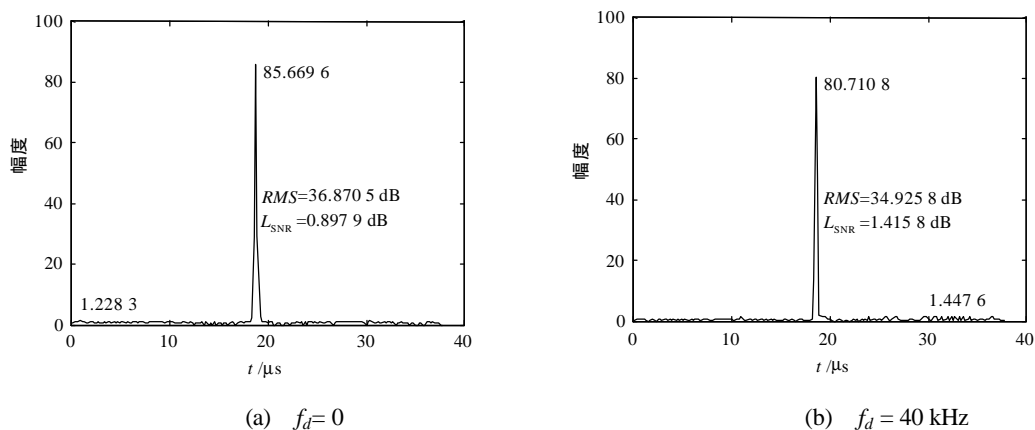


图3 数字脉压时域处理仿真结果

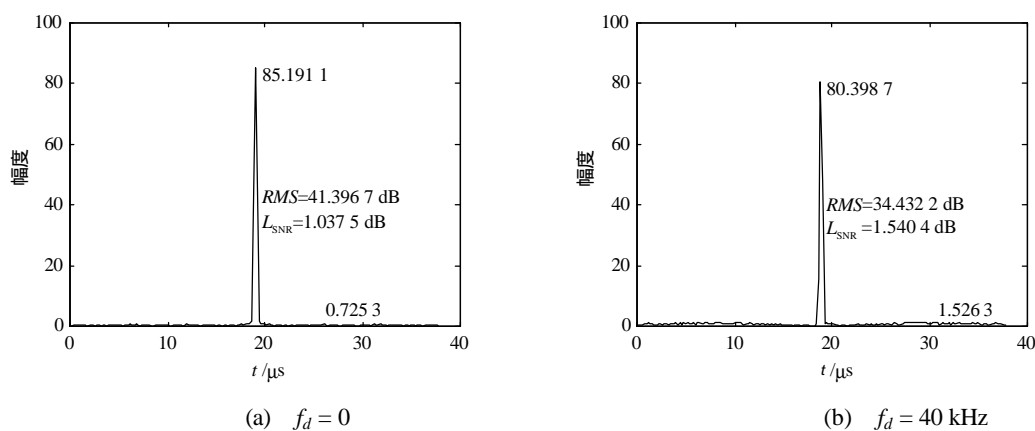


图4 数字脉压频域处理仿真结果

2.2 两种方法实际系统测试结果的比较

通过对所完成硬件系统的实际测试,本文得到对带宽为5 MHz、时宽为19 μs 的LFM信号进行脉压处理后的实测结果(所有结果均为数字示波器输出打印波形)如图5和图6所示。

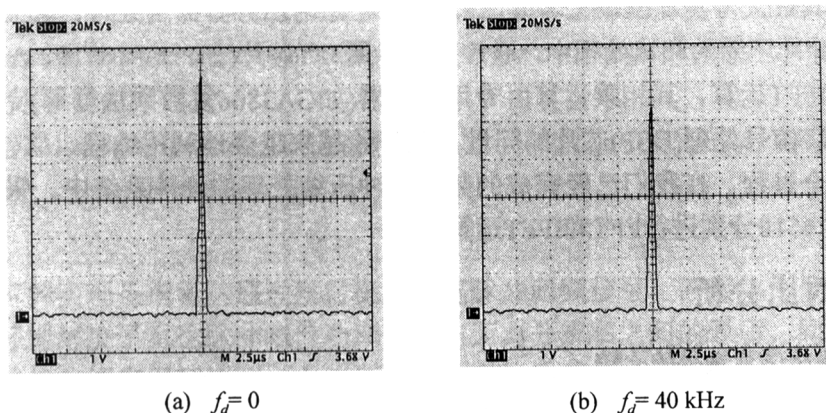


图5 数字脉压时域处理硬件系统实测结果

从实测结果可以看到,图5中脉压输出波形的副瓣比图6中的略高,由实测波形计算出,在 TB 值为95的情况下:采用时域处理系统,当多普勒频移 f_d 为0时,其脉压主副比为36.30 dB,当 f_d 为40 kHz时,其脉压主副比为33.95 dB;采用频域处理系统,当 f_d 为0时, $RMS = 38.92$ dB,当 f_d 为40 kHz时, $RMS = 34.28$ dB。时域处理的脉压主副比低于频域处理结果。将图5、图6与图3、图4的计

算机仿真结果作进一步比较, 系统实测结果比计算机仿真指标略低, 这是由实际系统误差引起的。但从两种方法的对比分析来看, 实时系统的测试结果与计算机仿真得到的结果一致。

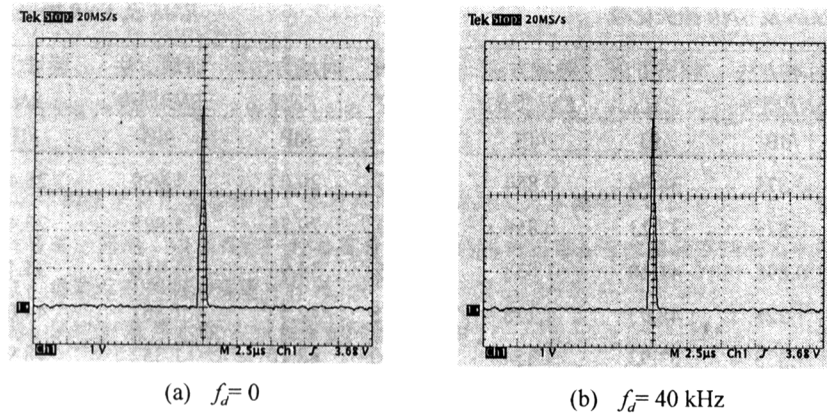


图 6 数字脉压频域处理硬件系统实测结果

2.3 采用通用 DSP 进行数字脉压处理时两种方法的选择

由于通用 DSP 软件化及灵活性的特点, 在当前设计和开发的数字脉冲压缩系统中, 已越来越多地使用它取代原来的专用 DSP 芯片, 这样可以省去大量的硬件工作, 而更多地通过软件编程来实现。现在用的较多的通用 DSP 芯片是 AD 公司的 ADSP21160 系列和 TI 公司的 TMS320C6000 系列。在采用通用 DSP 芯片完成脉压处理的软件设计之前, 同样要对使用何种处理方法(频域方法或时域方法)作出选择, 需要从处理能力(运算速度)和处理效果两方面加以权衡。

在图 1 所示的时域方法中, 长度为 N 的序列 $s(n)$ 与同样长度的序列 $h(n)$ 作匹配滤波, 考虑到 $s(n)$ 和 $h(n)$ 均为复序列, 由式(1)可以判断其运算所需实乘加次数为 $4N^2$; 在图 2 所示的频域方法中, 对 $s(n)$ 和 $h(n)$ 分别作 L 点 FFT 变换, 其乘积(复乘)再作一次 L 点的 IFFT 运算, 考虑到可以预先计算好加权系数的 FFT, 这部分 FFT 运算时间可省略, 故整个过程共需 2 次 L 点 FFT 时间再加上 $4L$ 次实乘加时间。假设通用 DSP 完成一次 L 点 FFT 时间为 T_{LFFT} , 完成一次实乘加时间为 T_M , 则从运算速度上考虑, 当下式成立时, 可采用频域方法实现数字脉压, 反之, 应考虑采用时域卷积的方法

$$4N^2T_M > 2T_{LFFT} + 4LT_M \quad (3)$$

即

$$N > \sqrt{\frac{2T_{LFFT} + 4LT_M}{4T_M}} \quad (4)$$

以通用 DSP 芯片 PDSP21160 为例, 其主频为 100 MHz, 则 T_M 为 $0.01 \mu\text{s}$, 取 L 为 1 024 点, 该 DSP 芯片作 1 024 点 FFT 运算所需时间 $T_{1024FFT}$ 为 $90 \mu\text{s}$, 由此可以推算出, 对于通用 DSP 芯片 PDSP21160, 如果序列长度 $N > 75$, 即脉压信号的时宽带宽积 $TB > 75$, 则采用频域方法(作 1 024 点 FFT 和 IFFT 运算)在运算速度上优于时域卷积方法; 反之, 可选择时域方法完成脉压。当然, 在调整频域处理 FFT 和 IFFT 点数的情况下, 这个比较标准也应作相应调整。如当分别作 256 点、4 096 点和 16 384 点 FFT 时, 运算所需时间分别为 $18 \mu\text{s}$ 、 $432 \mu\text{s}$ 和 $2 016 \mu\text{s}$, 其对应的临界 N 值也分别为 34、160 和 342。

一般器件手册中仅给出 1 024 点基-4 FFT 运算时间的标称值(Remark), 其余点数 FFT 运算时间的估计可利用

$$T_{LFFT} = \frac{T_{1024FFT} L \log_2 L}{1024 \times 10} \quad (5)$$

通过计算机仿真, 本文对不同时宽的 LFM 信号均采用 Hamming 窗加权并作频谱修正, 进行旁瓣抑制处理, 可以得到两种方法的脉压主副比(RMS)及信噪比(SNR)损失的比较结果如表 1 和表 2 所示。

其中, 带宽均为5 MHz, 表1的 $f_d = 0$ 时的情况, 表2的 $f_d = 40$ kHz。

表1 两种处理方法对应不同 TB 值的
 RMS 及 SNR 损失比较

TB 值	时域方法 RMS /dB	时域方法 SNR 损失 /dB	频域方法 RMS /dB	频域方法 SNR 损失 /dB
45	32.29	0.875	34.96	0.854
60	34.07	0.879	37.23	0.856
95	36.87	0.898	41.40	1.038
245	42.57	1.325	48.93	1.178
500	48.42	1.335	53.93	1.354

表2 两种处理方法对应不同 TB 值的
 RMS 及 SNR 损失比较

TB 值	时域方法 RMS /dB	时域方法 SNR 损失 /dB	频域方法 RMS /dB	频域方法 SNR 损失 /dB
45	29.07	1.999	28.41	2.029
60	29.75	2.885	28.45	2.950
95	34.93	1.416	34.43	1.540
245	42.52	1.361	44.09	1.212
500	48.10	1.352	48.98	1.368

从上面表中可以看出, 相同时宽带宽积(TB)的信号脉压, 采用频域方法比采用时域方法所得脉压主副比(RMS)高2 dB以上, TB 值越大, 这种优势也越大, 这是由于进行旁瓣抑制的频谱修正对于频域方法有更好的改善; 而由失配引起的信噪比(SNR)损失则相差不大。另外, 对于小 TB 值, 多普勒频移 f_d 对时域方法脉压结果的影响较小, 而在大 TB 值的情况下, 两种方法受多普勒频移 f_d 的影响趋于一致, 这是由LFM信号所特有的良好的多普勒特性所决定。

3 结 论

综上所述, 时域方法和频域方法均是实现雷达信号脉冲压缩处理的有效途径, 可根据实际情况(如工程需要、系统规模、现有器件等)选择最佳的处理方法。

在本文讨论的专用DSP系统中, 针对小 TB 值(带宽 $B=5$ MHz, 时宽 $T<19$ μ s)的信号, 设计横向滤波器IMSA100级联系统, 采用时域方法实现脉压。其特点是电路设计较简单, 测试方便, 实现技术相对成熟。但是, 对于大 TB 值, 由于现有横向滤波器阶数的限制, 需要更多芯片的级联, 这无疑增大了系统规模、成本及不稳定因素。为了解决这一问题, 可以利用发展较快的FPGA技术设计更高阶数的横向滤波器, 也可以采用频域处理的方法。同时采用频域方法, 结合专用FFT器件PDSP16510, 完成多波形脉压处理, 得到了优于时域方法的较好效果。

随着高速高性能通用DSP芯片的不断发展, 通过软件编程来实现雷达信号的脉冲压缩处理已成为趋势。在时域与频域处理方法之间作出合理选择, 并选用合适的通用DSP芯片, 对新一代数字脉冲压缩系统的高效设计及实现具有重要的意义。

参 考 文 献

- 1 向敬成, 张明友. 雷达系统. 北京: 电子工业出版社, 2001
- 2 刘松强. 数字信号处理系统及其应用. 北京: 清华大学出版社, 1996
- 3 苏 涛, 吴顺君, 廖晓群. 高性能数字信号处理器与高速实时信号处理. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000
- 4 美国模拟器件公司. ADSP-21160器件手册. Norwood, Massachusetts, U.S.A, 1998
- 5 杨 斌, 武剑辉, 向敬成. 基于谱修正的旁瓣抑制数字滤波器设计技术. 系统工程与电子技术. 2000, 22(9): 90-94
- 6 武剑辉. 多波形频域数字脉冲压缩系统的研究: [博士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2001