

基于 TMS320C5509 的数字内插波束形成器的实现研究

· 论文 ·

杨志兴¹, 尹雪飞¹, 陈克安², 邢超²

(1. 西北工业大学 电子信息学院, 陕西 西安 710072; 2. 西北工业大学 航海学院, 陕西 西安 710072)

【摘要】 针对数字波束形成中高精度定向需要较高采样频率的要求,研究了1种数字内插波束形成技术,并在 TMS320C5509 上予以实现。结合 C55x 系列 DSP 结构的特点,对比分析了 C54x 系列和 C55x 系列循环缓冲区实现的异同,给出了 C55x 上循环缓冲区实现的代码实例及优化说明。最后在软件仿真器上进行了仿真,证实了程序的正确性和数字内插技术的有效性。

【关键词】 数字内插; 波束形成; TMS320C5509; 循环寻址

【中图分类号】 TN911

【文献标识码】 A

Research on Implementation of Digital Interpolation Beamformer Based on TMS320C5509

YANG Zhi-xing¹, YIN Xue-fei¹, CHEN Ke-an², XING Chao²

(1. Engineering of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Engineering of Marine, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

【Abstract】 Considering the needs of higher sampling frequency for high performance, a method of digital interpolation beamforming is analyzed and accomplished in TMS320C5509 DSP. Based on the characters of C55x, the difference of circular addressing between C55x and C54x is analyzed. The concrete code example of circular addressing and optimization specification are presented. The validity of the digital interpolation beamforming method is verified by simulation in the simulator of code composer studio.

【Key words】 digital interpolation; beamforming; TMS320C5509; circular addressing

1 引言

在现代声呐系统中,数字波束形成器的设计是1个很关键的问题。传统的数字波束形成技术采用延时-相加的方法,即各阵元接收声源辐射声波,其输出经 A/D 转换成数字信号,经适当的延时、加权求和就能在期望方向上形成波束。但是,该方法为了把波束精确定向到所选择的方向上,就必须要求较高的采样频率,随之带来的就是 ADC 和输入数据传输及存储等要求的提高以及硬件成本的增加。数字内插技术则可有效解决该问题:它可以在保证延时精度的前提下,将 A/D 采样率降至原来的 1/8~1/4,大大降低了 A/D 转换电路的成本和存储的数据量。因此数字内插技术已被应用于医学成像^[1]、水下声成像^[2]等诸多领域,但硬件实现方面的具体报道则不多见。

TMS320C55x (以下简称 C55x) 系列 DSP 芯片是 TI 公司研制的新一代定点数字信号处理器,它是在 C54x

的基础上发展起来的,并能与 C54x 兼容的 1 个系列。C55x 通过增加功能单元,其综合性能比 C54x 提高了 5 倍,而功耗仅为 C54x 的 1/6。C55x 既吸收了 C54x 功耗低、体积小的优点,又吸收了 C6000 性能高、外部接口连接方便的优点,其性能介于 C54x 和 C6000 之间,适用于耗电省、体积小和处理速度高的场合。笔者以 C55x 系列中比较有代表性芯片-C5509 为例,介绍了数字内插波束形成在其上的完整实现过程。结合 C55x 系列 DSP 结构的特点,对比分析了 C54x 和 C55x 系列循环缓冲区实现的异同,并给出 C55x 循环缓冲区实现的代码实例和程序的优化说明。最后在软件仿真器 (Simulator) 上进行了仿真,证实了程序的正确性和数字内插技术的有效性。

2 数字内插波束形成的设计及仿真

2.1 数字内插波束形成的基本原理

所谓数字内插波束形成,就是利用数字内插的方

法来得到等效采样频率提高的离散信号,然后再用内插后的信号进行波束形成,其原理框图如图 1 所示。

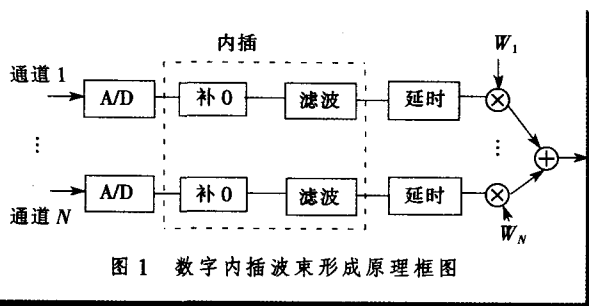


图 1 数字内插波束形成原理框图

从图 1 中可以看出,相对于传统波束形成^[3],数字内插波束形成只是增加了 1 个内插环节。下面重点来介绍插值滤波器的基本原理。

内插过程分为 2 步:首先是对实际采样得到的序列 $x_d(n)$ 进行补 0 处理,即每 2 个相邻样本之间插入 $N-1$ 个零值点后得到 $x_i(n)$ 。内插信号 $x_i(n)$ 和原采样信号 $x_d(n)$ 之间的关系为

$$x_i(n) = x_d(n/N) \quad (1)$$

设 $x_d(n)$, $x_i(n)$ 分别对应的频域表达式为 $X_d(e^{j\omega})$, $X_i(e^{jN\omega})$, 则根据离散信号的时域扩展特性^[4], 得

$$X_i(e^{j\omega}) = X_d(e^{jN\omega}) \quad (2)$$

由式(2)看出:时域的扩展,对应频域的压缩,其时频域的对应和变换关系如图 2 所示,其中左半部分图形表示信号的时域变化,右半部分表示与之对应的频域变化波形。由图 2 所示,实现抽样频率加倍的关键就是低通滤波器的设计。若该滤波器设计不当,极易导致信号畸变等现象的发生,从而导致数字内插波束形成定向结果的失效。

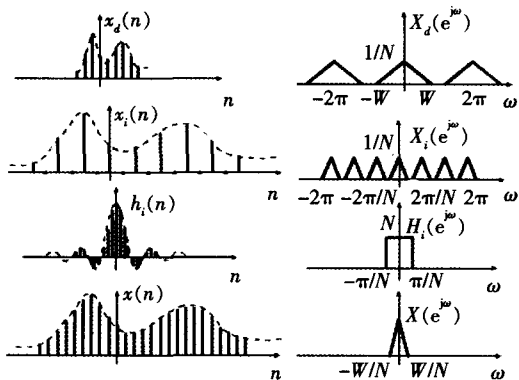


图 2 数字内插示意图

2.2 数字内插波束形成的设计实例

假定窄带信号的中心频率为 2 kHz, 系统采样频率为 50 kHz, 要求实现 4 倍的插值。如前所述, 数字内插波束形成的关键环节就是低通滤波器的设计, 而通常低通滤波器的设计存在 2 种: 无限长单位冲击响应滤波器(IIR)和有限长冲击响应滤波器(FIR), 两者各有优缺点。但由于数字波束形成对各通道的声信号有严格的线性相位要求, 因此笔者选用 FIR 来设计低通滤波器。

2.2.1 滤波器参数的设定

在本设计中, 抽样信号对应的数字频率为 0.08π 。内插信号的频域将压缩到原来的 1/4, 即 0.02π 。因此, 要求低通滤波器的通带应包括 0.02π 。但在具体参数设定时, 由于 FIR 滤波器设计及内插原理本身的限制, 需要注意下面的 2 个问题:

(1) 时域的扩展(内插)对应频率的压缩。这样相比原信号频率成分, 就会出现“新”的频率成分(也称镜像频率)。因此, 在设计低通滤波器时, 应注意不要将镜像频率成分包括在通带范围之内。

(2) 本设计采用 FIR 低通滤波器, 与 IIR 滤波器相比, 在实现相同指标的情况下, FIR 滤波器需要较高的阶数。而阶数的增加必然会增加程序时空上的开销和程序执行中溢出的概率。

基于此及滤波器参数设定步骤^[5], 最终选择的滤波器参数如下:

```
Wp=6*pi/50; %滤波器的通带截至频率
Wst=14*pi/50; %滤波器的阻带起始频率
N=42; %滤波器阶数
```

该低通滤波器的时频域图形如图 3 所示。

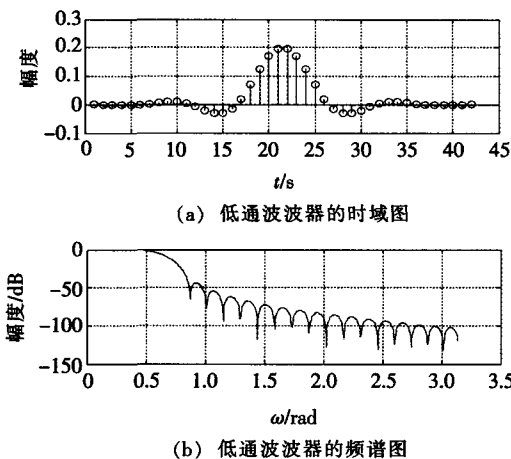


图 3 低通滤波器时频域响应

2.2.2 计算机仿真

在 Matlab 中编程产生 2 kHz, 抽样频率为 50 kHz 的离散信号, 将其进行 4 倍内插滤波后得到的图形如图 4 所示: 其中, 虚线代表内插滤波以后得到的信号, 实线则代表内插之前的原抽样信号。从图 4 中可看出, 在两道黑粗线之间原采样信号为 4 个周期, 内插信号恰为 1 个周期, 从而证明本设计中滤波器的设计较好的实现了 4 倍内插的目的。

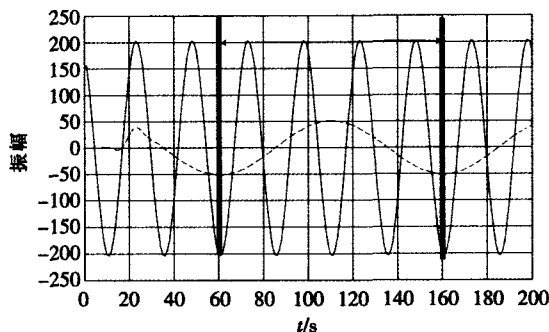


图 4 内插前后信号时域波形的对比

3 数字内插波束形成器在 C5509 的实现

3.1 TMS320C5509 DSP 的特点

TMS320C5509 是 C55x 系列中具有代表性的芯片, 除了引言中所述的特点外, 与 C54x 相比, 其 CPU 在功能单元方面进行了扩展: (1) 增加 2 条总线, 1 条读操作数总线 (BB), 1 条写操作数总线 (FB); (2) 增加 1 个乘累加单元 (MAC), 这就能在单个周期内可以完成 2 bit 的 MAC 运算, 从而可更为高效地完成数字信号出处理中常见的乘累加操作; (3) 增加了 1 个 16 bit 的 ALU, 可完成部分数据运算, 减轻了 D 单元的运算负担; (4) 累加器增至 4 个, 即 $AC_0 \sim AC_3$, 临时寄存器也增至 4 个, 即 $T_0 \sim T_3$ 。另外, 需要说明的是, C55x 的最大特点还在于其强有力的并行特性和方便用户编程的流水线自动保护机制。这些都使得 C55x 系列 DSP 芯片正在成为通信和个人消费领域的主流 DSP 产品。

3.2 程序流程图

笔者采用汇编语言编写了数字内插波束形成的全部功能模块, 包括 DSP 初始化、自动增益控制 (AGC)、模数转换 (AD)、数字内插 (interp)、波束形成 (BF)、显控。流程图如图 5 所示。

3.3 低通滤波器的实现及程序整体优化

通常, FIR 低通滤波器在 DSP 上的实现有 2 种方法^[6]: 线性寻址实现方式和循环寻址实现方式。为了程



图 5 程序流程图

序的高效执行, 低通滤波器的设计普遍采用循环缓冲寻址方式。而循环缓冲区的实现, 大部分关于 DSP 的应用文章^[7-9]又都是以 C54x 系列的 DSP 为例来实现。然而, C55x 系列和 C54x 系列结构上存在着差异, 所以针对 C55x 的特点有必要先来介绍一下 C5509 芯片上循环缓冲区的实现过程。

C5509 上循环缓冲区的设置可包括 3 个部分: 起始地址的设置、循环缓冲区长度的设置和相应寄存器索引值的设定, 这和 C54x 上循环缓冲区的设置要求基本一致。但在具体实现时却存在着如下的差别:

- (1) C55x 不要求像 C54x 那样, 将循环缓冲区设定在内存的特殊空间内^[6];
- (2) C55x 循环缓冲区起始地址的设置包括 2 部分: 主数据页的设定 (辅助寄存器的高 7 bit) 和主数据页内起始地址的设定 (BSA_{xx});
- (3) C55x 循环缓冲的实现要受状态寄存器 (ST2_55) 中相应状态位 (AR_xLC) 的影响。

循环缓冲区实现实例为:

```
AMOV #xn, XAR3
AMOV #xishu, XAR1; 设置循环缓冲区的高位地址
MOV #xishu, BSA01
MOV #xn, BSA23 ; 设置循环缓冲区的起始地址
MOV #42, BK03
MOV #42, BK47 ; 设置循环缓冲区的长度
MOV #0, xishu_ptr
MOV #0, xn_ptr ; 设置辅助寄存器的索引值
```

上面的代码就实现了在内存中为数据和系数开辟 2 个循环缓冲区的目的, 之后再利用 C55x 指令集中的乘累加指令和块循环指令就可高效地完成低通滤波所需要的相关操作。

为实现程序的高效执行, 在程序的汇编代码编写

中, 应注意尽量使用条件执行指令来代替条件跳转指令。条件跳转指令会导致流水线的刷新, 这就会使处于指令流水各阶段的预处理过的指令都要丢弃, 不可避免地会带来延迟; 尽量使用单指令重复(RPT)和本地循环(RPTBLOCAL)来代替块循环(RPTB)。这样不但可加快程序的执行, 而且可减少代码空间和程序执行时的功耗; 尽量使用并行指令, 减少程序的执行周期。

4 CCS 软件仿真和调试

CCS(Code Composer Studio)是 TI 推出的用于开发其 DSP 芯片的集成开发环境, 采用 Windows 风格界面, 集编辑、链接、软件仿真、硬件调试及实时跟踪等功能于一体, 极大地方便了 DSP 程序的设计与开发。

笔者利用 CCS 中集成的软件仿真器对程序进行软件仿真, 来验证程序的正确性。仿真条件: 8 阵元均匀线阵如图 6 所示, 阵元间距 8.5 cm。信号为 2 kHz 的单频信号叠加白噪声, 声速为 340 m/s。规定: 基阵的正前方为 0° 方向, 超前方向对应正入射角度, 滞后方向为负入射角度。

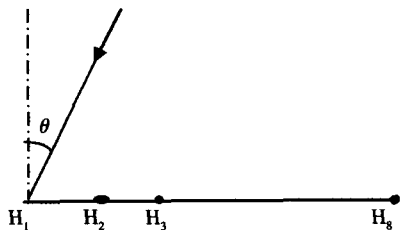


图 6 8 阵元均匀线阵

内插前, 信号的采样频率为 50 kHz, 由信号的入射角度、阵元间距可求得在该采样频率下可获得的同步波束的入射角度 [单位为°]: 73.7, 61.6, 53.1, 46.0, 39.8, 34.0, 28.9, 23.6, 18.7, 13.9, 9.2, 4.6, 0, -4.6, -9.2, -13.9, -18.7, -23.6, -28.7, -34.0, -39.8, -46.0, -53.1, -61.6, -73.7。

这里以 34.0° 和 39.8° 两个波束方向为例, 通过软件仿真器 Simulator 说明内插的效果。当信号从这两个方向中的任意方向入射时, 通过波束形成就可在相应的方向产生最大值。若信号的入射角在两者之间, 由于数字波束的影响必然会在 34.0° 或 39.8° 方向上产生最大值, 这样精度就降低了。而数字内插之后就可获得等效于 200kHz 的采样信号, 此时就可在 34.0° 和 39.8° 之间获得 3 个同步波束入射角 38.3°, 36.8°, 35.4°。很明显, 精度较之于内插前得到了提高。

为了验证这种数字内插的有效性, 文中针对内插以后的数字信号设计了 27 个波束; 其中波束号和入射角度之间的对应关系如表 1 所示。

表 1 波束号和入射角度之间的对应关系

波束号	0	1	2	3	4	5	6
角度/(°)	-57.1	-53.1	-42.8	-39.8	-38.3	-36.8	-35.4
波束号	7	8	9	10	11	12	13
角度/(°)	-26.1	-21.1	-18.7	-13.9	-9.2	-4.5	0
波束号	14	15	16	17	18	19	20
角度/(°)	4.5	9.2	13.9	18.7	21.1	26.1	35.4
波束号	21	22	23	24	25	26	
角度/(°)	36.8	38.3	39.8	42.8	53.1	57.1	

下面通过 Matlab 编程产生相应入射方向的测试数据, 加载进 Simulator 对程序进行仿真, 仿真的结果用 CCS 自带的图形显示工具进行显示。图 7 为 -36.8° 方向入射仿真结果。由于 CCS 图形显示工具的局限性, 图 7 中的横坐标相当于波束号, 而波束号对应的入射角度如表 1 所示, 且图中最大值的标示在 CCS 图形的左下角可见。图 8 为声波从 -39.8° 入射的仿真结果。

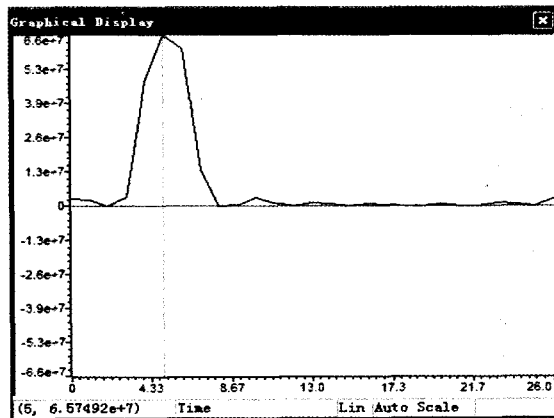


图 7 -36.8° 方向入射仿真结果界面

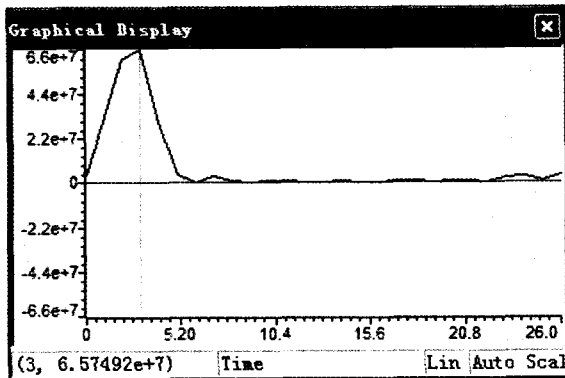


图 8 -36.8° 方向入射仿真结果

5 总结

C55x 系列 DSP 芯片是 TI 公司研制的新一代定点数字信号处理器,它以体积小、功耗低、外部接口丰富、性能高等优点,正成为数字信号处理等诸多领域的主流产品。笔者以 C55x 系列中有代表性的 C5509 为例,给出了数字内插波束形成技术在其上的具体实现,分析了 C55x 系列和 C54x 系列结构上的异同,并针对 C55x 系列循环缓冲区的实现给出了代码实例以及程序的优化说明。最后,在 CCS 中进行了软件仿真和调试,证实了程序的正确性和数字内插的有效性。

参考文献

- [1] 舒淑丽,汤文文. 数字插值波束形成器在医学成像中的应用[J]. 中国医疗器械杂志, 2007, 31(5): 28-30.
- [2] 高鹏, 桑恩方. 数字图像声纳的数据采集与处理系统[J]. 数据采集与处理, 2003, 18(4): 470-474.
- [3] 李启虎. 声纳信号处理引论[M]. 北京: 海洋出版社, 2000: 162-167.
- [4] PRIDHAM R G, MUCCI R A. Digital interpolation beam

forming for low-pass and bandpass signals[J]. Processing of the IEEE, 1979, 61(6): 904-919.

- [5] 程佩青. 数字信号处理教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001: 344-354.
- [6] 邹彦, 唐冬. DSP 原理及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 176-184.
- [7] 胡晓, 万秋玉, 周彤. FIR 数字滤波器的 DSP 实现[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2004, 9(1): 122-124.
- [8] 文玮玮, 董金明. 数字滤波器在定点 DSP 上的实现[J]. 遥测遥控, 2001, 23(1): 36-41.
- [9] 周金治. 基于 Matlab 与 DSP 的 FIR 数字滤波器软硬件实现[J]. 现代电子技术, 2005(17): 17-24.

作者简介

杨志兴, 硕士研究生, 主要研究方向为信号与信息处理;
尹雪飞, 副研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为信号与信息处理;
陈克安, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为有源噪声控制;
邢超, 硕士研究生, 主要研究方向为阵列信号处理。

[责任编辑] 潘浩然

[收稿日期] 2009-07-15

视频格式的转换

在现代的会议室运用当中, 视频信号的使用已非常普遍, 而视频信号的设备也多种多样, 像 CREATOR 快捷的 AV 矩阵就是一种视频信号的切换设备。

视频的不同格式决定了信号在亮度、色度、对比度、锐度、清晰度、最高分辨率等各个方面的表现。从在工程运用当中的视频格式的分析可知, 视频高清晰度质量的级别大致可进行这样的排序: DVI-'RGBHV/VGA-'DHTV-'SDI-'Y, Pb, Pr/Y, R-Y, B-Y-'Y/C S-Video-'Video-'RF。其中, 目前最高级别的当选 DVI 数字视频信号, 但存在只能短距离传输的缺点(有效距离约 5 m), SDI 数字视频具备可编辑和更长距离传输的优点, RGBHV 与 VGA 其实属于同一档次的信号, 只是因信号的组成分量不同而有两种称呼, S-Video 比起 Video(复合视频的简称)在亮度利用率上有明显的提升, 并有效消除了色彩蠕动现象, 射频格式是最低级的信号, 仅在监控和公共电视的范围应用。

工程应用中经常会面临很多信号格式的转换过程, 这些不同格式的信号转换需要遵循那些规则? 最终会产生什么效果的影响? 一般认为: 低级别格式向高级别格式转换有比较明显的质量提升, 比如早期的倍频扫描器或四倍频扫描器, 还有目前流行的智能视频调节器, 都是 Video-RGBHV(复合视频-分量视频)的转换处理, 对于提高信号的质量有很明显的改善。因为这些产品均使用了多比特数字技术, 确保信号质量(清晰度、亮度、信噪比)可进行高度还原。

DVI 数字视频通常会转换成 SDI 或 RGBHV, 转换后原始信号的清晰度有所损失, 但使 DVI 信号实现了长距离传输; VGA 信号转换成 RGBHV 实际效果并没有得到提升, 因为二者同等级别, 但解决了 VGA 信号的同步通用匹配问题, 而且能够进行更长距离的传输。

高级别格式向低级别格式(比如 VGA 转 Video)转换的过程, 无论对原始信号的任何方面, 包括亮度、色度、色彩、对比度、锐度、清晰度、最高分辨率都会造成严重的损失, 这种转换没有任何意义, 但早期具备一定的使用价值, 比如: 把计算机的 VGA 信号转换成 Video 进行磁带录像、电视机电视墙显示, 或者在视像会议中用于“抓图”传输。

天誉创高电子科技有限公司供稿。

www.CREATOR1997.com