

文章编号:1004-9037(2012)06-0747-07

基于TMS320VC5509A的数字化指向性扬声器

赵洪亮 王婷婷 冯国金 孙 珂

(山东科技大学信息与电气工程学院,青岛,266590)

摘要:本系统以16位定点DSP芯片TMS320VC5509A(VC5509A)为核心设计并实现了一个数字化指向性扬声器。系统主要由TMS320VC5509A、模数转换器、数模转换器、超声功率放大器和超声换能器阵列等模块组成。采用近似开方补偿减小非线性失真,采用带动态载波的双边带调制算法进行幅度调制,所有的信号处理算法都在一片TMS320VC5509A上实现。使用双采样率和乒乓缓存结构,减小了系统计算量并便于复杂算法的实现。本设计方案具有性能高、成本低、开发效率高、便于维护和升级等优点。

关键词:扬声器;双边带调制;动态载波

中图分类号:TN64

文献标识码:A

Digital Directional Loudspeaker Based on TMS320VC5509A

Zhao Hongliang, Wang Tingting, Feng Guojin, Sun Ke

(College of Information and Electrical Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, 266590, China)

Abstract: A kind of digital audiobeam loudspeaker is designed and implemented based on the 16-bit DSP chip TMS320VC5509A. The loud speaker system is composed of TMS320VC5509A, A/D converter, D/A converter, ultrasonic power amplifier and ultrasonic sensor array, etc. Approximate square root method is used to reduce the nonlinear distortion, and double side modulation with dynamic carrier algorithm is adopted to modulate the amplitude. All algorithms are implemented on a single chip TMS320VC5509A. The usage of double sampling and ping-pong structure can reduce the computation, thus providing more time for the realization of complex algorithms. The design has the advantages of excellent performance, low cost, high efficiency and easy maintenance and upgrade.

Key words: loudspeaker; double-sideband modulation (DSB); dynamic carrier

引 言

指向性扬声器又名参量阵扬声器、音频聚光灯等,是一种可以产生高指向性声音的新型扬声器。传统扬声器发出的声音是发散式的,即从扬声器发出的声音会向各个方向传播;而指向性扬声器突破了传统扬声器直接产生声波的理念,如同聚光灯发出的灯光一样,指向性扬声器发出的声波可沿预定的方向传播。指向性扬声器具有广阔的应用前景:利用其声音传播的高指向性特点,可以把声音控制在一定区域内而不对周围环境产生噪声污染,可广泛应用于汽车、飞机、餐厅、游戏室、多国会议等需要私人声音空间的场合;指向性扬声器还可以把大

功率的声能集中在一束波瓣很小的波束内向远方发射,甚至可以产生次声透过障碍物作用于敌方,是一种高效、深具震撼力的新型武器系统。

根据 Westervelt 提出的参量声学阵理论^[1],指向性扬声器的基本工作原理为:把音频信号调制在一个超声载波信号上,通过超声换能器发射出去;由于空气的非线性声学效应,在传播过程中声波中的音频信号会自解调出来,从而被人耳直接听到;由于超声传播的超指向性,从而使得解调后的音频信号也具有了高指向性。

信号处理是实现指向性扬声器的关键技术。早期人们主要致力于指向性扬声器信号处理理论的研究,在系统实现上主要是采用模拟电路,存在调试不方便、稳定性差、开发周期过长等问题^[2]。2004

年, 南洋理工大学的 Karnapi 等人开发了基于 FP-GA 的指向性扬声器系统^[3]。后来, 山东科技大学、浙江大学和电子科技大学等分别采用不同型号的浮点 DSP 芯片进行了有关开发^[4-7]。

与浮点 DSP 处理器相比, 定点 DSP 处理器具有功耗低、成本低等显著优点。本文以 TI 公司的 16 位定点 DSP 芯片 TMS320VC5509A 为核心制作了一个指向性扬声器, 在传统双边带调制方法的基础上加入开方运算补偿环节, 并采用了动态载波调制算法, 固定调制比以得到较好的音质。系统具有精度高、实时性好、成本低、便于算法快速实现等优点。

1 数字化指向性扬声器设计方案

1.1 工作原理

图 1 给出了数字化指向性扬声器的系统框图, 该系统由 TMS320VC5509A、模数转换器 (Analog digital converter, ADC)、数模转换器 (Digital analog converter, DAC)、超声功率放大器和超声换能器阵列等 5 个模块组成。其工作原理为: 首先, 音频输入信号经 ADC 转换为数字信号, TMS320VC5509A 对数字化后的信号做开方补偿等信号预处理运算后, 将其与 40 kHz 的高频载波信号进行动态载波调制, 然后通过 DAC 转换为模拟信号输出。超声功率放大器对 DAC 输出信号进行功率放大, 驱动超声换能器阵列发射出一束超声波信号。由于空气的非线性声学效应, 载有音频信号的超声波在传播过程中能够将音频信号自解调出来, 从而被人耳听到。借助超声波的指向性, 解调出来的音频信号也就实现了指向性传播。

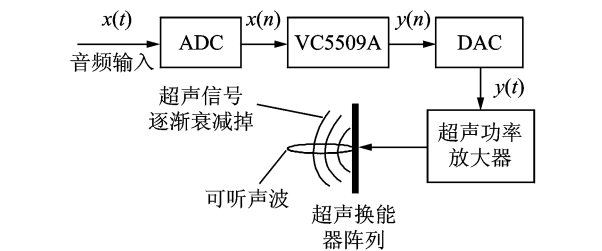


图 1 数字化指向性扬声器系统

1.2 系统指标

本系统达到的各项性能指标如表 1 所示。

表 1 指向性扬声器主要技术指标

项目	数值
功率/W	200
超声换能器数目	90
波束扩散角度/(°)	<10
频率范围/Hz	400~2 000
发射距离/m	>30
声压级/dB	>70
载波信号频率/Hz	40 000

1.3 系统算法

1.3.1 基本理论

Berktag 在 1965 年提出的公式对参量阵远场轴线上的可听声声压给出了定量描述^[8], 在指向性扬声器的发展史上具有里程碑式的意义。Berktag 远场解归纳一下就是: 参量阵列在空气中自解调形成的指向性声波束与换能器阵列激励信号的包络平方对时间的两次偏微分成正比, 即

$$p(t) = \kappa \frac{\partial^2}{\partial t^2} E^2(t) \tag{1}$$

式中: $E(t)$ 为换能器阵列激励信号的包络。 κ 为比例系数, 与空气密度、吸收系数、非线性系数、声速、超声换能器阵列面积、声压观测点、与声源的距离等因子有关。

1.3.2 常规双边带调制

预处理算法主要有两种基本方法: 双边带调制 (Double-sideband modulation, DSB)、单边带调制 (Single-sideband modulation, SSB)。其中 DSB 方法更为简单, 便于采用开方方法进行信号补偿。常规 DSB 方法的结构见图 2。

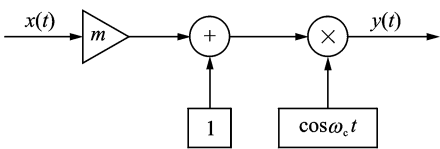


图 2 常规双边带调制

图 2 中所示, 宽频输入信号: $x(t) = \sum_{i=1}^n a_i \cos \omega_i t$, 其中 ω_i 为第 i 个频率成分的角频率, a_i 表示第 i 个频率成分的幅值。已调输出信号: $y(t) = [1 + m x(t)] \cos \omega_c t$, 其中 ω_c 为载波信号的角频率, m 为调制比, $0 \leq m \leq 1$ 。包络的平方为 $E^2(t) = [1 + m x(t)]^2$, 代入 Berktag 远场解式 (1), 可得到解调后的声压为

$$p(t) = -\kappa m \sum_{i=1}^n a_i \omega_i^2 \cos \omega_i t - 2\kappa m^2 \sum_{i=1}^n a_i^2 \omega_i^2 \cos 2\omega_i t - \frac{1}{2} \kappa m^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n a_i a_j [(\omega_i + \omega_j)^2 \cos(\omega_i + \omega_j)t + (\omega_i - \omega_j)^2 \cos(\omega_i - \omega_j)t] \tag{2}$$

式 (2) 中第 2, 3 项为非线性失真 (包括谐波失真和互调失真) 部分, 均与 m^2 成正比, 该失真是由于 Berktag 远场解中平方运算造成的。一般可通过减小调制比 m 值来改善指向性扬声器的音质, 但在减小 m 值的同时, 有用信号的幅度也会衰减, 指向

性扬声器的转换效率将会降低,为了消除此失真的影响,需要在对音频信号进行幅度调制之前先进行预补偿。

1.3.3 带动态载波的近似开方补偿双边带调制算法

根据前面的分析可知,Berktag 远场解中的平方运算会造成非线性失真,这可以通过开方运算来补偿。单纯从数学上看,开方运算很简单;但是从信号处理角度看,对信号进行开方相当于使该信号通过一个非线性系统,这会造成频谱的扩散,理论上要求超声换能器具有无限的带宽。在现实中,无限带宽的超声换能器是不可实现的,实际采用的超声换能器只有大约 6 kHz 的带宽,使得开方后的信号高频部分无法通过。因此,在实际问题中考虑采用近似开方补偿。

又由于音频信号是时变的,动态范围很大,倘若简单采用图 2 所示的双边带调制方法,容易造成以下两个问题:(1)在输入音频信号很小时,仍然有很强的超声信号输出,这不仅浪费能量而且会对人体有害;(2)容易产生调制比太小或过调制的情况,调制比小时,指向性扬声器的转换效率将会降低;过调制时,解调信号存在严重失真。因而需要根据输入信号的幅值,来动态改变载波信号的幅值,即采用动态载波调制的方法。

基于以上两点考虑,采用带动态载波的近似开方补偿双边带调制方法,算法框图如图 3 所示。图中将输入信号分为两个分支,一个分支做归一化,乘以调制比 m 后,加 1 将信号抬起,再进行近似开方补偿得到 $x_1(t)$;另一分支求取最大值,并做低通滤波后,乘以 40 kHz 载波信号得到 $x_2(t)$;然后两个分支信号 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 相乘得到动态载波调制后的信号 $y(t)$ 。在求取最大值和归一化运算时,需要截取一帧数据,倘若帧长选取不合适,将会引入干扰噪声。根据语音信号的短时平稳特性,选取一帧数据的长度为 10 ms。

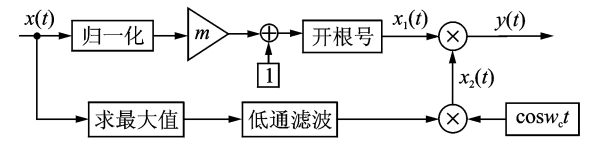


图 3 带动态载波的近似开方补偿双边带调制算法框图

对于定点 DSP 芯片 TMS320VC5509A 来讲,没有设置硬件开方电路,处理器不支持开方运算指令。本设计采用泰勒级数展开方法实现开方运算,

只取泰勒级数的前 5 项,如式(3)所示。式(3)所示的近似开方算法只需要 5 次乘法和 5 次加法,同时便于编程实现,只需要执行 5 次乘加运算循环操作即可,提高了开方运算在 DSP 上的实现速度。

$$y(n)=\sqrt{1+x(n)}\approx b_0+x(n)[b_1+x(n)[b_2+x(n)[b_3+x(n)[b_4+b_5x(n)]]]]$$

(3)

1.3.4 载波信号产生

载波信号的产生方法有很多,为了便于在 DSP 上实现,本文采用递归方法,其结构见图 4。其中 f_c 为载波频率, F_{sc} 为高频采样频率, $y_c(n)$ 为载波信号。这种方法只需要 2 个存储单元和 3 次乘法计算,主要优点是计算量小、计算简便、速度快,适用于实时信号处理。

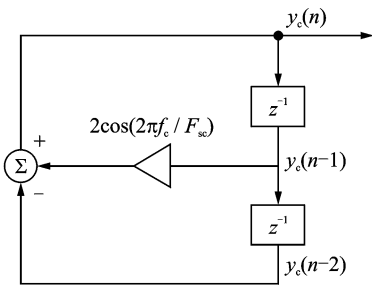


图 4 采用递归方法产生载波信号

2 系统硬件和软件设计

由图 1 可知,本系统主要由 TMS320VC5509A, ADC, DAC, 超声功率放大器和超声换能器阵列等 5 个主要部分组成。其中,TMS320VC5509A, ADC 和 DAC 共同组成了信号处理模块。

2.1 信号处理模块

信号处理模块的原理框图见图 5,由 TMS320VC5509A 最小系统模块、A/D 模块和 D/A 模块等部分组成。C55X 提供多通道缓冲串口 (Multi-channel buffered serial ports, MCBSP), TMS320VC5509A 设有 3 个 MCBSP。I²C 为内部集成电路模块,GPIO 为通用 I/O 口。其中,A/D 模块采用 TLV320AIC23B 实现,通过 TMS320VC5509A 的 I²C 接口和 McBSP1 连接;D/A 模块采用 DAC8831,通过 TMS320VC5509A 的 McBSP2 接口连接。

TMS320VC5509A 是 TI 公司推出的一款高性能、低功耗、低系统成本的 16 位定点 DSP 处理器^[9],其最高工作频率可达 200 MHz。TMS320VC5509A 最小系统模块以 TMS320VC5509A 芯片为核心,为保证其工作,还添加了电源电路、时钟

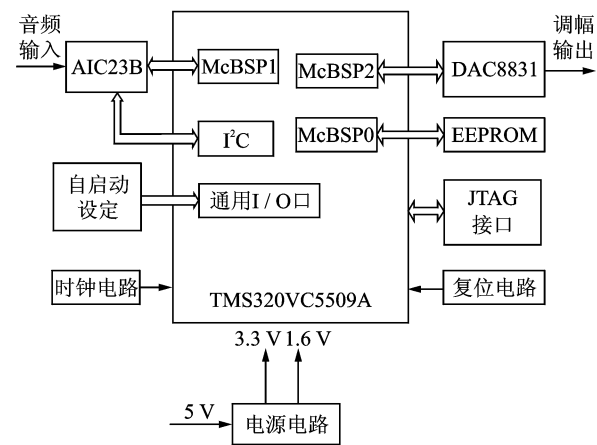


图5 信号处理模块的原理

电路、EEPROM、复位电路、JTAG 接口和自启动设定电路等。本系统采用TI 公司低压差线性稳压器TPS76D301 电源芯片提供3.3 V 和1.6 V 电压；通过McBSP0 扩展了一片容量为256 Kb 的EEPROM 芯片AT25256,用于实现掉电存储程序；需要注意的是,为使TMS320VC5509A 掉电后通过EEPROM 引导装载程序代码,需要设置GPIO[3:0]的值为0011b。

A/D 模块用于采集音频信号,本设计采用TI 公司的低功耗、高性能音频编解码芯片TLV320AIC23B (AIC23B) 来实现这一功能。AIC23B 采用了先进的Sigma-Delta 过采样技术,可以在8~96 kHz 的频率范围内提供16 位、20 位、24 位和32 位的采样。在采样率为48 kHz 的情况下,ADC 的信噪比能够达到90 dB,从而可在小型低功耗设计中实现高保真信号采集^[10]。

D/A 模块用于将DSP 处理完毕的数字信号转换为模拟信号输出。由于载波信号的频率为40 kHz,调制的音频信号最高频率为2 kHz,为满足奈奎斯特采样定律,D/A 转换器的采样率应大于84 kHz,为输出具有较好的波形,采样率应该还要提高些。采用TI 公司的16 位分辨率D/A 转换器DAC8831,其采样率最高可达1 MHz^[11],能够满足需求。该芯片采用+5 V 单电源供电,本设计采用低温漂、高精度、低噪声电压基准芯片REF5030 为其参考电压信号,配合外部运算放大器,能够输出±3 V 双极性电压信号。

2.2 超声功放模块

功率放大器用于将调幅信号进行功率放大以驱动超声换能器阵列。由于信号的中心频率为40 kHz,而普通音频功放的频响范围20 Hz~20

kHz,因此需设计专门的功率放大电路。本设计采用了一个D 类功放模块,采用±30 V 电源供电。该功放模块的频率响应范围为20 Hz~150 kHz,通频带增益为30.5 dB,并且具有延时启动和过载保护等功能。当负载为4 Ω 时,最大输出功率可达250 W。

2.3 超声换能器阵列

超声换能器阵列用于将电信号转化为超声信号,由多个超声换能器按照一定的规律排列构成。图6 为指向性扬声器的实物图,上方即为超声换能器阵列。该阵列由90 个超声换能器紧密排列构成,采用了广东奥迪威公司生产的T/R40-16 型开放式超声换能器,中心频率为40 kHz。

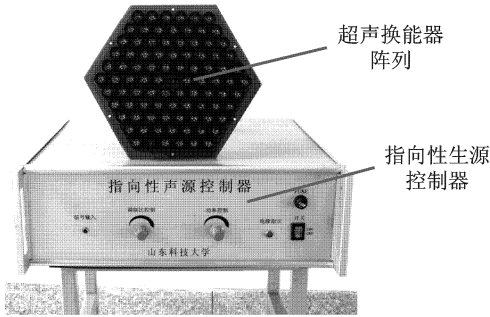


图6 换能器阵列设计实物

2.4 系统主要程序流程图

TMS320VC5509A 主要完成AD 采集、DSP 信号处理和DA 输出等操作。本系统输入信号为音频,而输出信号为超声,所以在系统中使用了双采样率,以减小系统的计算量。其中,AD 采样率为32 kHz,DA 采样率为320 kHz。进行AD 采集和DA 输出的常规思路是采用中断定时的方式来实现,但是由于DSP 在中断时,CPU 会进行众多的压栈和出栈操作,耗费大量时间。倘若以中断的形式来操作ADC 和DAC,那么留给信号处理运算的时间就会微乎其微。考虑到AD 采集和DA 输出只是进行简单的数据搬移,不涉及复杂的运算,所以本设计采用DMA 实现数据的搬移。当搬移完一帧数据后再触发中断,大大减少了中断次数,为信号处理运算节省了宝贵的时间。

图7 给出了信号处理流程图。其中,AD 采集通过定时器0 溢出触发DMA0 通道来完成,DA 输出是通过定时器1 溢出触发DMA1 通道来完成。

AD 采集的流程为:首先,TMS320VC5509A 通过McBSP1 接收AIC23B 转换完的数据,然后通过DMA0 通道搬移到内部数据缓冲区。当缓冲区存满后,即触发中断,让CPU 处理接收到的数据。

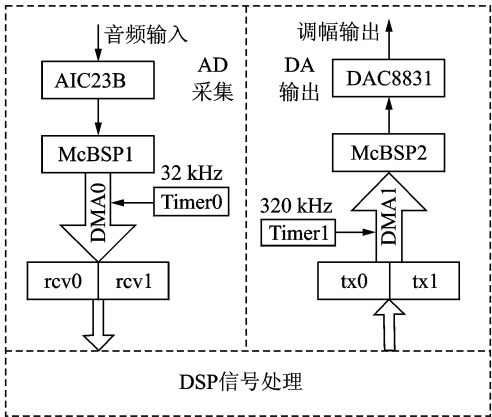


图 7 信号处理流程图

为保证采集数据的连续性,构建了两个接收缓冲区 rcv0 和 rcv1,形成一种“乒乓结构”。即当 DMA0 向 rcv0 搬移数据时,CPU 处理 rcv1 缓冲区的数据;当 DMA0 向 rcv1 搬移数据时,CPU 处理 rcv0 缓冲区的数据。这样就保证了 A/D 数据读取和信号处理运算的并行操作。

同样,D/A 数据输出也采用 DMA 搬移和“乒乓结构”来实现。CPU 将调制后的数据存储在发送缓冲区 tx0 和 tx1 内,DMA1 会搬移缓冲区的数据到 McBSP2 的发送寄存器,然后通过 SPI 总线传送给 DAC8831 进行 D/A 转换,最后输出模拟量的调幅信号。

3 系统测试与验证

3.1 实验测试系统

理想条件下,指向性扬声器的实验测试应在全消声实验室中进行,但限于实验条件,本测试在普通实验室内进行。测试时考虑并采取措施尽可能降低普通实验室中声反射、背景噪声等不利因素的影响。实验测试系统主要由计算机、SpectraLAB 软件、USB 声卡、传声器和声信号调理器组成。其工作过程为:传声器采集指向性扬声器发射出的音频信号,经声信号调理器处理后,送入 USB 声卡进行数据采集,使用 SpectraLAB 软件记录采集到的信号;然后通过 Matlab 分析软件对采集到的信号做频谱分析。测试时,传声器位于超声换能器阵列正前方约 2.5 m 的位置。

3.2 测试结果验证

本次测试主要是对指向性扬声器在空气中自解调后的音频信号进行频谱分析。图8 为近似开方

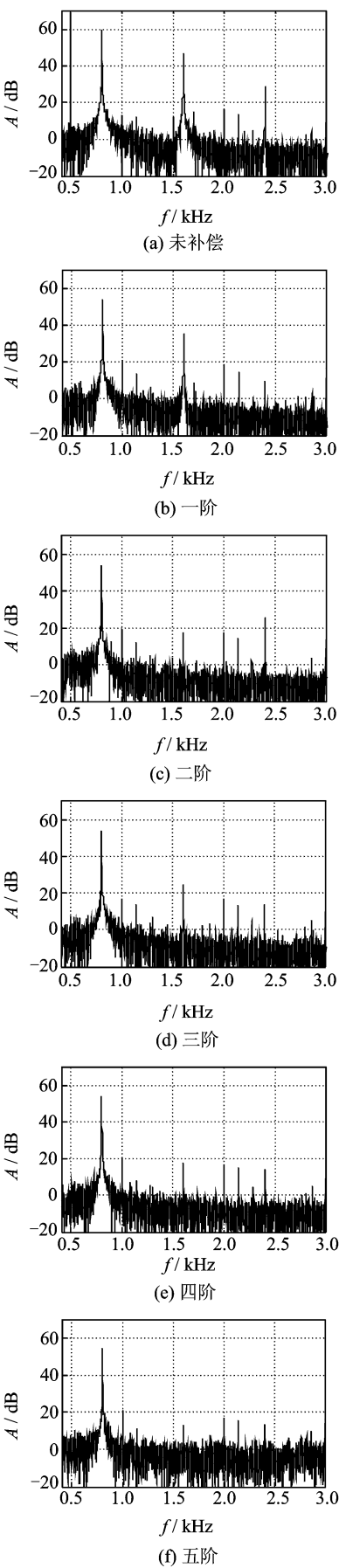


图 8 近似开方补偿双边带调制的测试频谱图

补偿双边带调制的测试频谱图,其中,测试信号采用 800 Hz 单频声,调制比设为 $m=0.8$ 。

通过实验测试图 8 可明显看出,开方补偿对提高信号音质起着重要的作用,随着近似开方阶数的增加,谐波分量越小,信号非线性失真越小,声音音质越好。当采用五级近似开方时,谐波分量已经很小,达到了预期的效果。

4 系统关键设计

系统的关键技术如下:

(1) 系统硬件采用 16 位定点 TMS320VC5509A DSP 处理器为核心设计制作,所有的信号处理算法都在一片 DSP 芯片上实现。充分利用了 TMS320VC5509A 的片上资源和 TI 公司提供的 DSPLIB 库函数^[12],可以灵活实现复杂的数字信号处理算法,具有高性能、低成本、便于算法升级等优点。相对于传统的模拟系统,该系统能够精确生成载波信号,调试方便,具有较高的稳定性、可靠性和精度。

(2) 双边带调制采用近似开方运算减小非线性失真,近似开方运算采用乘累加方法,计算量小,同时便于编程实现。

(3) 采用动态载波调制算法,一方面避免了调制比过小或过调制的情况,降低了大动态范围信号可能造成的失真,改善了音质;另一方面,降低了系统平均功耗,换能器发出的热量也相应减少,降低了对材料及工艺的要求,从而降低系统成本。

(4) 系统使用双采样率。系统输入和输出信号频率范围不同,采集到的输入信号为音频信号,而载波信号和调制后的输出信号为超声频率信号,所以在系统中使用两个采样频率。A/D 输入和动态载波处理采样率为 32 kHz,载波信号生成、幅度调制和 D/A 输出采样率设为 320 kHz,减小系统的计算量,在使用复杂信号处理算法时仍然能保证系统的实时性。

(5) 系统采用乒乓缓存结构,DMA 专门负责数据存储,将数据搬移到缓冲区,CPU 则负责切换缓冲区并处理缓冲区内的数据,使得数据的采集和信号处理能够同时进行,这样 DMA 和 CPU 就实现了一种“乒乓”切换操作,为 DSP 处理信号提供更多的时间,从而能够发挥最佳性能,便于复杂信号处理算法的实现。

5 结束语

本文以 TMS320VC5509A 处理器为核心设计了一个数字化的指向性扬声器,实现了对音频信号的定向传播,将动态载波调制、近似开方补偿、载波信号发生器等在内的一整套信号处理算法全部在一片 TMS320VC5509A 上实时实现。系统具有精度高、成本低、便于维护和升级等优点。采用双边带调制方法,经过空气自解调后得到的信号除了存在非线性失真外还存在一定的幅度失真,有效消除该失真也是改善音质的重要环节。理论上采用双积分法便可消除,但考虑到超声换能器的带宽有限,因此探索更有效的方法是下一步研究的课题。

参考文献:

- [1] Westervelt P J. Parametric acoustic array[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1963, 35 (4): 535-537.
- [2] 姬培峰. 指向性声源的理论与实验研究[D]. 青岛: 山东科技大学信息与电气工程学院, 2005.
Ji Peifeng. The research on the theory and the experiment of the directional speaker [D]. Qingdao: College of Information and Electrical Engineering, Shandong University of Science and Technology, 2005.
- [3] Karnapi F A, Gan W S, Chong Y K. FPGA implementation of parametric loudspeaker system[J]. Microprocessors and Microsystems, 2004, 28 (5/6): 261-272.
- [4] 赵洪亮, 朱海生, 孙西瑞. 基于 TMS320VC33 的指向性扬声器的设计[J]. 山东科技大学学报, 2008, 27 (6): 72-75.
Zhang Hongliang, Zhu Haisheng, Sun Xirui. Design of directional loudspeaker based on TMS320VC33 [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology, 2008, 27(6): 72-75.
- [5] 陈敏, 徐雨梅, 黄大贵, 等. 声频定向扬声器的研究进展[J]. 电声技术, 2006(11): 17-22.
Chen Min, Xu Limei, Huang Dagui, et al. Progress on audio directional loudspeaker research[J]. Audio Engineering, 2006(11): 17-22.
- [6] 周荣冠. 参量阵扬声器系统的超声发射阵指向性研究[J]. 电声技术, 2009, 33(4): 33-36.
Zhou Rongguan. Research on directivity of ultrasonic emitter for parametric array loudspeaker system [J]. Audio Engineering, 2009, 33(4): 33-36.

[7] Liu Shanmei, Yao Wei, Meng Jun, et al. Hardware design of signal processing for a novel audio beam loudspeaker based on DSP[C]//IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. [S. l.]: IEEE, 2006:1570-1573.

[8] Berkta y H O. Possible exploitation of nonlinear acoustics in underwater transmitting applications[J]. Journal of Sound and Vibration, 1965, 2 (4): 435-461.

[9] 赵洪亮,卜凡亮,黄鹤松等. TMS320C55xDSP 应用系统设计[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2010. Zhao Hongliang, Bu Fanliang, Huang Hesong, et al. The design of TMS320C55xDSP application system[M]. Beijing: Beihang University Press, 2010.

[10] Texas Instruments Company. TLV320AIC23B stereo audio CODEC, 8-to 96-kHz, with integrated

headphone amplifier[S]. Texas, America: Texas Instrument Incorporation, 2004.

[11] Texas Instruments Company. DAC8831 16-bit, ultra-low power, voltage output digital-to-analog converters[S]. Texas, America: Texas Instrument Incorporation, 2007.

[12] Texas Instruments Company. TMS320C55x DSP library programmer's reference[S]. Texas, America: Texas Instrument Incorporation, 2009.

作者简介:赵洪亮(1964-),男,教授,研究方向:DSP 技术与系统、声学信号处理、检测监控技术及系统等,E-mail: zhl6401@126.com;王婷婷(1987-),女,硕士研究生,研究方向:声学信号与信息处理;冯国金(1987-),男,硕士研究生,研究方向:检测技术、信号处理;孙轲(1989-),男,本科生,研究方向:检测技术与自动化装置。