

单片机实现音频频谱显示的快速算法研究

吴继发, 陈特放

(中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要:基于单片机 SST89V58RD2 的特性, 提出一种切实可行的快速傅里叶变换算法实现音频信号频谱显示的设计方案。该方案硬件电路设计简单、成本低, 并具有较高的实用价值。

关键词: 频谱显示; 音频; 单片机; 快速傅里叶变换(FFT)

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文件编号: 1674-6236(2009)11-0070-02

Fast algorithm research of audio spectrum display based on single-chip computer

WU Ji-fa, CHEN Te-fang

(School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: A design scheme of practicable fast fourier transform algorithm for audio spectrum display based on SST89V58RD2 single-chip computer is presented in this paper. This design scheme features simple hardware circuit design, low cost and it has a high practical value.

Key words: spectrum display; audio; single-chip computer; Fast Fourier Transform(FFT)

1 引言

在家庭影院、卡拉 OK 等音响系统中, 实时显示音乐信号的频谱将为音响系统增添不少色彩。目前实际生产的音响系统产品, 大多采用以下两种方法实现音频频谱显示: 一是利用硬件滤波器和 A/D 转换器; 二是利用 DSP 处理频谱显示。前者实现简单, 但硬件成本高, 后者软件和硬件实现都较复杂。这里针对单片机 RAM 资源少、运算速度慢的特点, 提出一种切实可行的快速傅里叶变换算法实现频谱显示。

2 系统整体设计及原理

该系统设计由单片机 SST89V58RD2、音频数据采样电路、A/D 转换电路、频谱显示电路等部分组成。图 1 为系统整体设计原理框图。



图 1 系统整体设计原理框图

该系统从功能上可划分成 3 部分: (1) 音频数据采集电路实现模拟音频信号的采样保持和量化处理, 包括音频采样电路和 A/D 转换电路; (2) 频谱显示电路实现模拟音频信号频谱的分段显示, 它将音频信号频谱划分成 14 段, 每段按照 14 级量化, 由 VFD 显示器件显示; (3) 主控制器采用 SST89V58RD2 单片机, 在完成系统其他控制任务的前提下, 充分利用单片机剩余计算资源, 采用优化 FFT 算法计算音频信号频谱, 并将计算结果输出到频谱显示电路。

收稿日期: 2009-05-15

稿件编号: 200905039

作者简介: 吴继发(1983-), 男, 湖北黄冈人, 硕士研究生。研究方向: 嵌入式系统及其应用。

3 音频信号的采集和预处理

3.1 采样频率

根据香农采样定理, 一般采样频率至少应为所采样音频信号最高频率的 2 倍。由于人耳能够感受的频率为 20 Hz~20 kHz, 所以理论上采样频率最高取 40 kHz。目前工业上广泛采用的采样频率大致有 3 种^[1]: 44 kHz、16 bit 的声音称作 CD 音质; 22 kHz、16 bit 的声音效果近似于立体声广播(FM Stereo), 称作广播音质; 11 kHz、8 bit 的声音称作电话音质。本文为提高频谱计算的精度, 拟采用 40 kHz 的采样频率和 8 Bit 的数据位长。

3.2 样本大小

采样频率确定后, 还需确定样本值, 即完成一次 FFT 运算所需的采样点数。根据数字信号处理的基本原理^[2], 假设采样频率为 F_s , 采样点数为 N , 则 FFT 运算后, 第 n 点所表示的频率为: $F_n = [(n-1) \times F_s] / N (1 \leq n \leq N)$ 。若要精确到 Hz, 则需采样长度为 $(1/f)s$ 的信号。提高频率分辨率, 需增加采样点数, 但这在一些实际应用中是不现实的, 则采用有频率细分法, 即采样比较短时间的信号, 然后在后面补充一定数量的 0, 使其长度达到所需的点数, 再作 FFT, 这在一定程度上能够提高频率分辨率。由于该系统是将音频信号频谱划分成 14 段显示, 因此采用 16 点 FFT 运算, 去掉第 1 点和第 16 点的结果即可。

3.3 音频数据采集电路

A/D 转换器选用 TLC549, 它具有 8 位转换结果, 差分基准电压输入, 3 线数据串行输出接口, 转换时间最大达 17 μs ,

每秒访问和转换次数达到 40 000 次,全部非校准误差为 ± 0.5 LSB,低功耗,最大为 15 mW。因此,该器件完全满足系统 40 kHz 采样频率的要求。

图 2 为系统音频数据采集电路。音频信号来源于 CD 或 DVD 碟机输出的音乐信号,因而基本无噪音,考虑到音频信号是交流信号,电压范围在 ± 0.1 V 之间,而 TLC549 的输入必须是直流的,电压范围为 0~5 V,所以还需整流和放大的预处理过程。A/D 转换后得到 8 位数字值音频幅值的 8 位数字量。

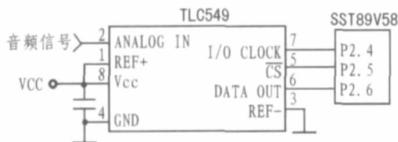


图 2 系统音频数据采集电路

4 音频频谱算法

音频频谱值的计算采用快速傅里叶算法 FFT (Fast Fourier Transform)^[3],为了提高显示器的刷新频率,系统每隔 10 ms 读取 16 次 A/D 转换值,得到 16 点实数序列,紧接着完成 16 点 FFT 运算得到 16 点复数序列。

4.1 倒位序及其优化算法

基 2-FFT 算法将原始数据倒位序存储,但运算后的结果则按正常顺序输出。原始采样数据放在数组 float dataIm[16] 中,dataIm[0]存放第 1 次读取的 A/D 转换值,dataIm[1]存放第 2 次读取的 A/D 转换值,以此类推,可见第 $n(n=(b_3b_2b_1b_0)_2)$ 次读取的 A/D 转换值存放在 dataIm[n]中。倒序操作后采样数据存储在 float dataRe[16]中,原来第 n 次读取的 A/D 转换值存放在 dataIm[n] ($n=(b_0b_1b_2b_3)_2$)中。根据样本大小在系统代码段中建立倒序表数组,采用查表方式实现快速倒序操作,与移位操作等方法相比,可明显提高运算速度。

4.2 蝶形运算及其优化算法

根据基 2-FFT 算法^[4], N 点 FFT 运算可以分成 $\log_2 N$ 级,每一级都有 $N/2$ 个蝶形运算,如图 3 所示。



图 3 蝶形运算

蝶形运算公式的推导过程如下:

$$X(k) = X'(k) + X'(k+b)W_N^P \quad (1)$$

$$X(k+b) = X'(k) - X'(k+b)W_N^P \quad (2)$$

式中, $W_N^P = \cos(2\pi P/N) - j\sin(2\pi P/N)$ 。

将式(1)化简成实部和虚部的形式,得到:

$$X_R(k) = X_R'(k) + X_R'(k+b)\cos(2\pi P/N) + X_I'(k+b)\sin(2\pi P/N) \quad (3)$$

$$X_I(k) = X_I'(k) - X_R'(k+b)\sin(2\pi P/N) + X_I'(k+b)\cos(2\pi P/N) \quad (4)$$

同理,式(2)化简得到:

$$X_R(k+b) = X_R'(k) - X_R'(k+b)\cos(2\pi P/N) - X_I'(k+b)\sin(2\pi P/N) \quad (5)$$

$$X_I(k+b) = X_I'(k) + X_R'(k+b)\sin(2\pi P/N) - X_I'(k+b)\cos(2\pi P/N) \quad (6)$$

可见每个蝶形运算的输出都是由其输入值与某一正弦函数和余弦函数的乘积累加得到的。由式(3)~式(6)编制正

弦和余弦表,每次做蝶形运算时可查表加快运算速度。

基 2-FFT 算法的基本思想是用 3 层循环完成全部 N 点 FFT 运算:(1)最里层循环处理单独的一个蝶形运算,采用查表方法实现乘法运算;(2)中间层循环完成每一级的 $N/2$ 个蝶形运算;(3)最外层循环完成 $\log_2 N$ 级蝶形运算。

由此可看出:在每一级中,最里层循环完成 $N/2^L$ 个蝶形运算;中间层循环控制最里层循环进行 2^L-1 次运算。因此,中间层循环完成时,共进行 $2^{L-1} \times N/2^L = N/2$ 个蝶形运算。实际上最里层和中间层循环完成了第 L 级计算,最外层则最终完成 $\log_2 N$ 级蝶形运算。

需要加以说明的数据是:(1)在第 L 级中,每个蝶形的两个输入端相距 $b=2^{L-1}$ 个点;(2)同一乘数对应着相邻间隔为 2^L 个点的 $N/2^L$ 个蝶形;(3)第 L 级的 2^{L-1} 个蝶形因子 W_N^P 中的 P ,可表示为 $P=j \times 2^{5-L}$,其中 $j=0,1,2,\dots,(2^{L-1}-1)$ 。

完成 16 点 FFT 运算的 RAM 需求量是 128 字节,而单片机 SST89V58RD2 的 RAM 共 1 K 字节;显示器每 10 ms 刷新一次,而单片机 SST89V58RD2 的时钟频率是 40 MHz,完成一次 16 点 FFT 运算实际所需时间不到 6 ms,因此该系统完全满足 FFT 运算的时间复杂度和空间复杂度要求。

5 频谱值在 VFD 上的显示

系统要求将音频信号频谱划分成 14 段,每段按 14 级量化,再使用 VFD 显示器显示,因此对于 FFT 运算结果还要作一定转换才能输出到显示器。第 n 点的 FFT 运算结果是复数,实部是 dataRe[n],虚部是 dataIm[j]。该点的模值除以 $2/N$ 就是对应该频率下信号的幅度(对于第 1 个点则是除以 N);该点的相位即是对应该频率下信号的相位。最后的结果保存在 dataRe[j]中,因为音频信号频谱被划分成 14 段,所以 dataRe[0]和 dataRe[15]的值应该舍去。同时,dataRe[j]可能不是整数,而 VFD 显示器要求每个频段按照 14 级量化,因此还需将 dataRe[j]的值量化成 0~14 整数,最后输出到 VFD 电路上显示。

6 结束语

讨论了单片机实现音响系统频谱显示的快速傅里叶变换算法,针对 SST89V58RD2 单片机进行算法优化,并详细描述系统的实现方法,结果证明该方法具有可行性。

参考文献:

- [1] 郑君里.信号与系统[M].2 版.北京:高等教育出版社,2000.
- [2] 程佩青.数字信号处理教程[M].北京:清华大学出版社,2001.
- [3] 陈怀琛.数字信号处理教程[M].北京:电子工业出版社,2004.
- [4] H F Lo, M D Shieh, C M Wu. Design of an efficient FFT processor for DAB system[J]. IEEE International symposium on circuits and system, 2001(4):654-657.