

# 基-2 FFT 在音频分析及输出系统中的应用

高莹 徐进 廖文 刘超

(西安工程大学 西安 710048)

**摘要:**主要介绍了一种将 FFT 算法移植到单片机上运行,通过对数字音频信号进行分析处理,以实现音乐频谱实时显示和声音输出的系统。系统硬件部分主要由声音输入、单片机模数转换、由 LED 组成的点阵单元以及声音信号放大输出等电路组成。利用高性能 STC12C5A60S2 单片机内建的模数转换功能,先将输入的音频信号采样、量化转换为数字信号,再通过软件编程进行 FFT 运算。输出处理结果点亮 LED 点阵,完成频谱显示。LED 的明暗由音乐的频率变化决定。通过 LM386 运放芯片及外围电路将输入的音频信号进行放大后,由喇叭或者外接音箱输出。该设计不但具有较高的实用价值和观赏性,而且硬件电路结构简洁,开发、制作成本低。

**关键词:**单片机;FFT;音乐频谱;数字信号处理;LED 点阵

**中图分类号:** TN65    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** 510.4030

## Application of base-2 FFT in audio analysis and output system

Gao Ying Xu Jin Liao Wen Liu Chao

(Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** This paper mainly introduces a system which transplanted FFT algorithm into MCU to analyze and process the digital audio signal so as to make real-time display and sound output of music spectrum come true. The hardware part of the system consists of audio input, single-chip analog-digital conversion, dot-matrix unit composed of LED and sound signal amplification output circuit. Using high-performance single-chip STC12C5A60S2 comes with A/D conversion function, the first audio signal is converted to digital signals, and then write the program for FFT operation. Output processing results lighting LED matrix and complete spectrum display. The brightness of the LED is determined by the frequency of the music. Amplifying the input audio signal through the LM386 op amp chip and the external circuit, then output it by the speaker or an external speaker. The design not only has a high practical value and ornamental, and hardware circuit structure is simple. Development and production cost low.

**Keywords:** microcontroller; FFT; music spectrum; digital signal processing; LEDs dot matrix

### 1 引言

好的音乐频谱显示器的设计与实现,需要使每一个细节更加精细化。利用 FFT 算法设计和研究音乐频谱对掌握单片机技术、数字信号处理以及相关知识有重要的理论与实际意义。有研究者设计的音乐频谱显示器,采用 8051 为处理核心,还需要外围模数转换电路,不仅电路结构复杂、成本高,而且该单片机处理速度慢,音频显示的实时性较差,大众难以接受。基于此,设计了音频分析与输出系统,采用高性能单片机 STC12C5A60S2 为主控芯片设计频谱显示器,通过采集输入的声音信号,经过单片机

AD 转换,再按照基-2 FFT(离散傅氏变换的快速算法)的蝶形运算以及倒序计算来求模、量化再由 LED 点阵显示频谱,同时由喇叭或者外接音箱播放音乐。从而实现音乐频谱显示和声音输出,不仅可以美化环境,还能增添气氛。

### 2 总体方案设计

时域信号经过变换后在频域下的表示方式,称为频谱。可以将时域信号经过傅里叶变换而得到频谱。变换结果是以振幅和相位为纵轴、频率分量为横轴的图<sup>[1]</sup>。频谱图表示的是一个时域信号包含有哪些频率的波形,也可

以通过频谱图看出各个频率对应波形的大小及其相位等信息<sup>[2-3]</sup>。根据傅里叶分析,声音信号可以分解为若干个正弦波,这些正弦波又包含有多个随时间时刻在变化着的谐波分量。以声音的频率分量为横轴、其振幅为纵轴绘制图形,就得到声音的频谱图像<sup>[4-5]</sup>。

由于该设计需要采集的音频信号是时间域上的连续信号,为模拟量<sup>[6]</sup>。而用单片机进行处理时需要先将输入信号转换成数字信号,因此需要使用模数转换模块<sup>[7-8]</sup>。如若使用普通的8051单片机,则还需另外配置模数转换芯片(如ADC0809),不仅使电路复杂化,而且增加了成本;此外,为了达到音乐频谱显示与音乐播放同步,系统还必须具有较高的实时性,这就需要处理速度更快的主控芯片。

联系到以上两点要求,该设计采用了内置模数转换电路的STC12C5A60S2单片机为主控制器<sup>[9-10]</sup>。该芯片是一款增强型8051单片机,其处理速度比普通8051单片机快数倍,可以使用更高的时钟频率。在该设计中采用的是24 MHz的外置晶振。通过STC12C5A60S2内置的模数转换器对音频信号进行采集、量化,然后通过编写程序执行快速傅里叶变换运算,结合基-2 FFT算法就可以将音频信号各个频率分量在频域上的功率计算出来,最后通过8×15(8行、15列)发光二极管点阵进行实时显示音乐频谱效果。由于设计显示的频点数目较少,该方案与采用DSP或者ARM作为主控制芯片的设计方案相比,不仅电路结构简洁,而且其开发和生产成本较低。

设计该应用系统需要完成硬件电路设计和软件编写等两部分内容。其中硬件电路部分由单片机最小系统、声音信号输入电路、声音信号放大输出电路以及LED点阵等构成,主要元器件有STC12C5A60S2主控芯片、LS74HC573锁存芯片、运算放大器LM386芯片、贴片式发光二极管等。系统整体设计结构原理如图1所示。软件实现部分对应的由main主函数、系统初始化init子程序、发光二极管显示display控制程序以及用于延时的delay子程序等组成,都是基于C语言编写。

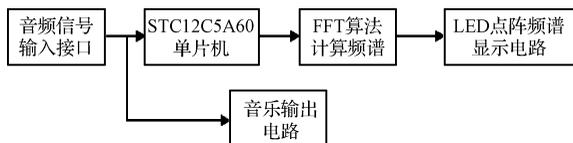


图1 系统整体设计原理

### 2.1 单片机电路部分

在硬件电路设计部分,选用STC12C5A60S2用于信号处理以及算法实现,该单片机具有运行功耗低、处理速度快和效率高等优点。系统的控制程序用Keil软件编写和调试,传输到单片机的存储器中,单片机运行时对音频

输入的信号进行处理并进行FFT算法计算,将处理的结果数据传输给驱动芯片。复位电路与系统开机电路共用,即每次开机时完成复位。

### 2.2 音频输入电路

在系统初始化子程序中将单片机的P1.2和P1.3口配置成模数转换输入功能,在单片机P1.2和P1.3口接入声音信号,通过单片机P1.2和P1.3管脚内部模数转换器电路,再结合设计的程序对输入的信号进行模数转换,将输入的音频信号采样、量化,转换为数字信号,储存到单片机中。单片机的机器时钟由外部24 MHz晶振电路提供<sup>[11]</sup>。运行时可以得到较高的时钟频率,以利于单片机对输入的声音信号的采集和处理以及执行FFT运算。最终以声音频谱的形式输出到发光二极管点阵显示器上显示。

### 2.3 LED点阵显示电路

在该设计中采用8×15(8行、15列)的发光二极管点阵,将处在同一列的贴片式发光二极管采用共阴极的接法将其负极连在一起,同理将处在同一行的发光二极管的阳极相互连接。如图2所示的LED点阵显示控制电路。通过单片机输出的数据,间隔一定时间逐行点亮LED,重复循环<sup>[12]</sup>。由于人的视觉存在视觉暂留现象,在循环点亮的周期达到足够快,即循环频率达到每秒24次以上后,人眼已经分辨不出来LED的亮灭,于是就可以在LED点阵屏上看到音乐频谱的跳动效果了。

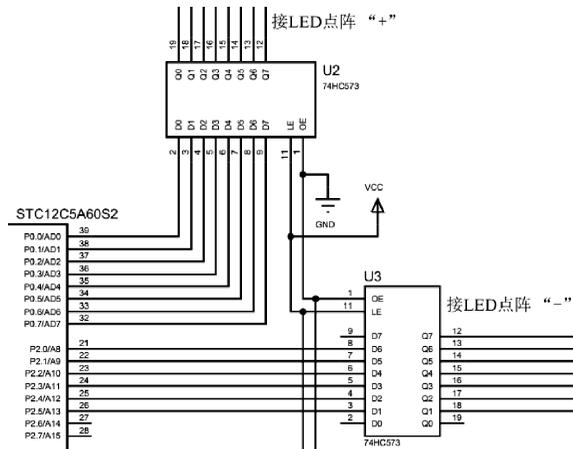


图2 LED点阵控制电路

### 2.4 音频放大输出电路

如图3所示为音频放大输出电路,该部分核心器件为LM386运算放大器芯片,结合外围电路,可以将外部输入的音频信号放大预定的倍数,在其增益引脚之间有电位器以调节增益;增加旁路滤波电容以减少噪声干扰;通过其输出引脚和喇叭播放音乐。设置有3.5 mm耳机接口,可接音箱设备或耳机。

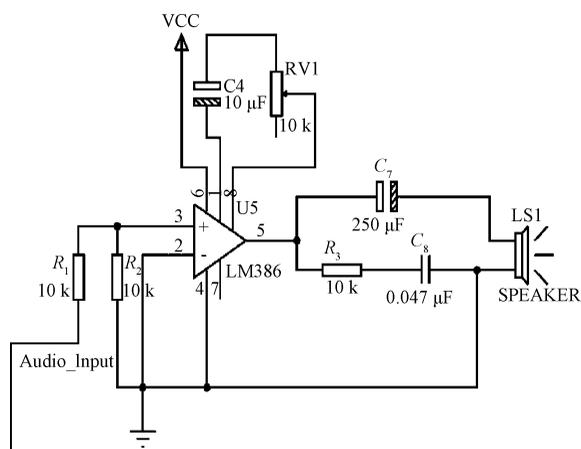


图3 音频放大输出电路

### 3 软件设计

该系统软件部分的核心是AD转换和FFT处理,软件质量的好坏以及执行效率的高低与算法的选取密不可分。如图4所示为软件设计的程序主流程。

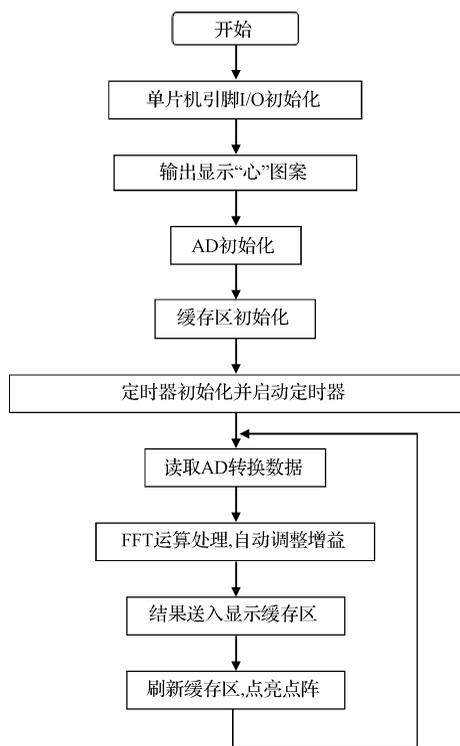


图4 软件部分实现流程

#### 3.1 AD转换程序

程序中给控制寄存器的相应位设定数值控制模数转换速度,当时钟频率  $f_{\text{soc}} = 24 \text{ MHz}$  时,采样时间间隔  $t_d = 540/f_{\text{soc}} = 22.5 \mu\text{s}$ ,采样的信号最高频率分量:

$$f_h = \frac{1}{2t_d} = 22.2 \text{ kHz} \quad (1)$$

输入的声音信号最高频率应该比  $f_h$  低,只有低于

12 kHz才能被感知并采集到<sup>[13]</sup>。信号经过单片机模数转换器的隔点采样之后,  $f_h$  变为:

$$f'_h = \frac{1}{2 \times 2t_d} = 11.1 \text{ kHz} \quad (2)$$

在设计程序时,设定32点的采样点数,在经过单片机执行基-2 FFT变换以后,原输入的音频信号就被转换为16个频率分量之和。在进行对音乐信号采样的过程中,由于当定时器溢出时采样过程会被打断,在设计程序时并不关断定时器1中断,因为定时器1设定的溢出间隔时间较长(不少于5 ms)。所以在每次定时器溢出之前,单片机内的模数转换过程可以完成很多次完整的32点采样。只有在完成连续32个点采样之后,并且采样结果被完全移出时,程序才能继续执行对数据的处理。

#### 3.2 FFT处理

该设计对音乐频谱信号进行处理的方法采用的是按时间抽选(DIT)的基-2 FFT算法。倒位序算法和蝶形算法是基-2 FFT算法的核心运算<sup>[14]</sup>。根据该方法的实现原理,采用FFT运算进行处理、采样后得到的  $N(N = 2^L)$  个点,可以将这些点分成  $M(M = \log_2 N)$  级,每一级都包含有  $\frac{N}{2}$  个蝶形运算。处理过程如图5所示。

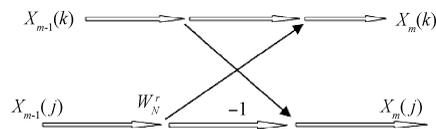


图5 蝶形运算示意

在以上描述的蝶形运算结构中,都要完成以下基本迭代运算:

$$X_m(k) = X_{m-1}(k) + X_{m-1}(j)W_N^r \quad (3)$$

$$X_m(j) = X_{m-1}(k) - X_{m-1}(j)W_N^r \quad (4)$$

以上迭代式(3)和式(4)中,下标  $m$  表示第  $m$  列迭代,  $k, j$  为采样所得数据所在的行。在第  $m$  级蝶形运算当中,每一个蝶形运算的两个节点之间的“距离”都是  $2^{m-1}$ ,每一个蝶形运算结构都是由一次复乘运算和两次复加(减)运算组成。于是,上述迭代运算式(3)和式(4)的第  $m$  级的每一个蝶形计算又可以写成:

$$X_m(k) = X_{m-1}(k) + X_{m-1}(k + 2^{m-1})W_N^r \quad (5)$$

$$X_m(j) = X_{m-1}(k) - X_{m-1}(k + 2^{m-1})W_N^r \quad (6)$$

在此基础上可以推导出  $r$ ,从而确定  $W_N^r$ :首先将以上等式(3)和等式(4)中蝶形运算两个节点中的第一个节点标号值,即  $k$  值,记做  $L$  位二进制数 ( $N = 2^L$ );再用因子  $2^{L-m}$  乘这个二进制数,于是就把这个  $L$  位二进制数左移  $L - m$  位 ( $m$  表示第  $m$  级的运算),用零填充右边空出来的  $L - m$  个位置,就可以得到  $r$  的二进制数;再做进一步计算得到  $W_N^r$ 。

在编写程序的时候,通过3个for循环的嵌套来实现整个  $L$  级的递推过程,  $L(L = \log_2 N)$  级的顺序运算由最外层的for循环控制;第  $m$  级的各个蝶形结构的运算则由

内层的两个for循环控制,其中中间层的for循环控制不同种类即  $r$  不同的蝶形结构运算,而最内层 for 循环控制同一种即  $r$  相同的蝶形结构运算。在以上进行傅里叶运算的过程中使用了左移,数据被放大,因此,在每一次蝶形运算的乘积运算中,为了保证其模为 1,需要将结果右移  $N$  位来抵消这个放大,才能够得到正确的处理结果。采用放大倍数为 2 的整数次幂也是为了能够通过简单的处理来抵消前面对信号的放大。通过简单的右移位操作来替代除法运算,运算时间将大幅度缩短<sup>[15]</sup>。在算法上做如此处理,提高了频谱显示的实时性和准确性。

#### 4 系统测试

部分测试代码如图 6 所示。将代码导入 MATLAB 2014a,取  $N = 16$  执行结果如图 7 所示,与 MATLAB 库函数运算结果比较,通过对比,得到的结果与预期基本一致,验证了 FFT 算法程序的正确性;由于在电脑上 MATLAB 运行环境与实际电路单片机的运行环境不同,无法检验设计的实时性。于是用 Keil  $\mu$ Vision 将程序编译成二进制文件,再在 Proteus8 软件对程序和电路进行仿真测试,导入音频,查看是否能够达到预期效果。经过测试,设计能够显示出预期效果。检查硬件电路无误后,下载程序到单片机中运行。待“心”形图案显示完成后,输入音乐信号,观察到点阵显示的频谱与电脑音乐播放器界面显示的频谱一致。声音输出部分,调节电位器可以改变音量大小和声音质量,系统测试通过,基-2 FFT 方法在音乐频谱分析及输出系统中得到成功应用。

```

/** 【快速傅里叶变换】 **/
void FFT(void)
{
    unsigned int i,j,k,l;
    complex top,bottom,xw;
    Reverse(); // 码位倒序
    for(i=0;i<log2N;i++) /*共log2N级*/
    { //一级蝶形运算
        l=1<<i; //1等于2的i次方
        for(j=0;j<N;j+=2*l) /*每l个蝶形是一组,每级有N/2l组*/
        { //一组蝶形运算
            for(k=0;k<l;k++) /*每组有L个*/
            { //一个蝶形运算
                xw=mul(x[j+k+1],WN[N/(2*l)*k]); // 蝶间距为1
                top=add(x[j+k],xw); //每组的第k个蝶形
                bottom=sub(x[j+k],xw);
                x[j+k]=top;
                x[j+k+1]=bottom;
            }
        }
    }
}

```

图 6 FFT 测试程序

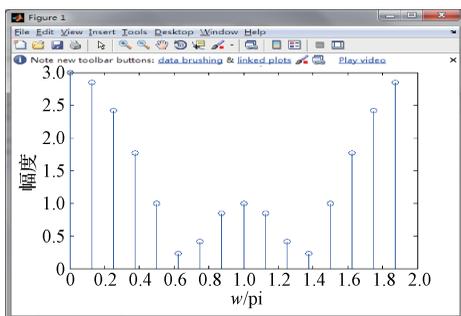


图 7 MATLAB 实现结果

#### 5 结论

通过设计并实现该系统,分析了基-2FFT 算法在音乐频谱分析与输出系统中的应用,针对该设计采用的 STC12C5A60S2 单片机,在设计程序时进行了算法的优化,并详细介绍了该系统各部分的功能和实现过程。通过 Keil 软件仿真检查电路和程序存在的缺陷并完善。该设计既实惠,又能给音乐增添色彩,而且其硬件电路简单、成本低,具有较高的使用价值和观赏性。

#### 参考文献

- [1] 郭连平. 宽带信号频谱分析关键技术研究及系统实现[D]. 成都:电子科技大学,2015.
- [2] 孙英侠,李亚利,宁宇鹏. 频谱分析原理及频谱分析使用技巧[J]. 国外电子测量技术,2014,33(7):76-80.
- [3] 胡宁,徐兵. 基于 LabVIEW 的频谱分析仪的设计[J]. 计算机测量与控制,2013,21(5):1404-1407.
- [4] 徐岩,张晓明,王瑜,等. 基于离散傅里叶变换的频谱分析新方法[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(11):38-43.
- [5] 李逸家. 基于 51 单片机的 LED 点阵音乐频谱显示器[J]. 工业控制计算机,2015,28(4):137-138,140.
- [6] 吴永德,罗萍. 基于增强型 8051 单片机的音乐频谱显示器的设计[J]. 电子世界,2014(13):156.
- [7] 万小波. FFT 算法研究[J]. 科技风,2015(11):39.
- [8] 杜兆胜. 基于 FPGA 的 FFT 处理器设计与实现[J]. 信息通信,2016(3):100-101.
- [9] 柴克谦,何洁,刘超. 基于 51 单片机 LED 点阵屏控制系统设计[J]. 科技致富向导,2015(11):173.
- [10] 姚永平. STC12C5A60S2 系列单片机器件手册[Z]. 2011.
- [11] 伍文平,李永红,张明,等. 基于单片机的 FFT 算法分析与实现[J]. 科学技术与工程,2009,16(9):4803-4805.
- [12] 李彦正. 一种 FFT 蝶形处理器中的乘法器实现[J]. 现代电子技术,2007,30(22):135-137.
- [13] 吴继发,陈特放. 单片机实现音频频谱显示的快速算法研究[J]. 电子设计工程,2009,17(11):70-71.
- [14] 谢宏霖. 基于 IAP15F2K61S2 单片机的多功能音乐频谱的设计[J]. 电子制作,2014(17):8-9.
- [15] 刘海成. 单片机及应用系统设计原理与实践[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2009:78-164.

#### 作者简介

高莹,1991 年出生,硕士研究生。主要研究方向为信号采集与处理及其应用。

E-mail:1258723393@qq.com

徐进,1959 年出生,教授,硕士研究生导师。主要研究方向为智能控制、智能检测、信号与信息处理等。