

音乐频率幅度彩灯指示器的设计与实现*

崔 鸣, 尚 丽

(苏州市职业大学 电子信息工程系, 江苏 苏州 215104)

摘要: 利用 32 位 STM32F103 ARM 和快速傅里叶变换(FFT)算法, 实现了音乐频率幅度彩灯指示器的设计, 该彩灯指示器可以指示不同的频率等级和音量等级。整个系统采用模块化设计, 电路功能实现较好, 只要接入信号就能测量, 无需过多的人为操作。测试结果验证了 FFT 算法的准确性, 进一步证实了所设计的系统对音频信号不同的频段等级和音量等级具有较好的指示效果, 具有较好的实用性。

关键词: STM32F103 单片机; FFT 算法; 音乐信号; 幅度; 频率; LED 灯

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2014)24-0081-03

Design and realization of colored light's indicator of musical frequency and amplitude

Cui Ming, Shang Li

(Department of Electronic Information Engineering, Suzhou Vocational University, Suzhou 215104, China)

Abstract: A colored light's indicator of musical frequency and amplitude is designed in this paper by using the 32-bit STM32F103 ARM single-chip and the fast Fourier transform (FFT) algorithm. This colored light's indicator can denote different classes of frequency and volume of musical signals. The whole system is used by modular design and behaves better function, once the input port receives signals, the system can work by itself without much human interference. Test results testify the accuracy of FFT algorithm, further, the designed system is also proved to behave better indicator effect for different frequency and volume classes of musical signals, and also behaves better practicality.

Key words: STM32F103 signal-chip; FFT algorithm; musical signals; amplitude; frequency; LED light

本文主要讨论了音乐频率幅度彩灯指示器的设计与制作, 设定音量等级为 32 级, 频率等级为 15 级, 每一频率等级下的音量等级又分为 31 级; 以嵌入式单片机 STM32F103 作为主控制核心, 以音乐信号自动增益、电压抬高、真有效值测量、LCD 显示、按键等作为辅助硬件电路; 采用快速傅里叶变换 FFT (Fast Fourier Transform) 理论对音乐信号进行详细的频域分析和处理。在此方案下完成音乐频率幅度彩灯指示器的设计后, 以信号发生器产生的标准正弦波、方波以及手机播放的任意 MP3 音乐 (即音频信号) 作为输入信号进行现场测试, 实验结果验证了设计题目的全部基础和提要求, 具有较好的音乐信号频率等级和幅度等级指示效果。

1 理论分析和计算

1.1 快速傅里叶变换原理

快速傅里叶变换 (FFT) 是 1965 年由 J.W. 库利和 T.W. 图基提出的^[1-3] 计算离散傅里叶变换 (DFT) 的一种快速算法, 其实质是根据离散傅氏变换的奇、偶、虚、实等特性进行改进的一种 DFT 算法。计算有限长信号序列 $x(n)$ 的离散傅里叶变换时, 其正变换式如下所示:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} [x(n)e^{-j\frac{2\pi}{N}nk}] \quad (1)$$

傅里叶反变换公式为:

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} [X(k)e^{j\frac{2\pi}{N}nk}] \quad (2)$$

* 基金项目: 江苏省“青蓝工程”资助项目; 苏州市职业大学创新团队资助项目 (3100125)

应用奇葩

Example of Application

离散信号 $X(k)$ 是一个复数, 具有实部和虚部两部分。根据能量定理(即 Parseval 定理): 一个序列在时域计算的能量与在频域计算的能量是相等的, 即 $\sum_{n=0}^{N-1} |x(n)|^2 =$

$\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |X(k)|^2$, 因此, 可以得到各个频谱对应的功率与在时域测量功率之间的关系。

1.2 功率谱测量方法

对音频信号采样时, 首先要确定采样频率 f_s 。若原始信号频率为 F , 采样点数为 N , 则频率分辨率 $\Delta f = f_s/N$ 。又由于音频信号的频率范围为 50 Hz~10 kHz, 最大频率是 10 kHz, 则根据香农采样定理, 必须保证 $f_s \geq 20$ kHz, 实际应用时一般取 30 kHz~40 kHz。在某一个频率等级上, 选定采样点 N 后, 所需要的采样频率 $f_s = \Delta f \times N$ 。点数越多, 运算量的节约就越大, 这就是 FFT 的优越性。在第 n 个点时所表示的频率为 $f_n = (n-1)f_s/N$ 。对音频信号采样后的各点值, 需用 FFT 原理处理, 得到不同的频率点对应的功率后, 就可以画出其功率谱, 并可以在频域计算其总功率^[2]。

1.3 失真度计算方法

失真度 K_{j0} 是被测信号中各次谐波的总有效值电压与被测信号有效值的百分比, 按照下面公式计算^[2-3]:

$$K_{j0} = \sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2} / U_1 \quad (3)$$

式中 U_2, U_3, \dots, U_n 为各次谐波电压有效值, 即为被测信号中各次谐波的总有效值电压与被测信号中基波的有效值比值。

2 系统硬件设计

2.1 总体设计

所设计系统的总体原理图如图 1 所示。其中, ARM 控制器采用 ST 公司生产的 STM32F103 芯片, 内有 2 个 12 bit 的 A/D 转换器、7 个定时器、9 个通信接口, 最高工作频率 72 MHz, 足以满足设计需求; 音频信号的峰-峰值范围为 0~ V_{\max} , V_{\max} 的大小根据需要设定, 频率范围为 50 Hz~10 kHz。为了避免输入信号过小和保证输入信号的幅值为正, 需要对其进行自动增益和抬高电压预处理, 预处理后的音频信号的峰-峰值范围约为 0~3 V, 然后经过 A/D 采样, 快速傅里叶(FFT)变换, 得到不同的等级的频率和音量, 经过串口输出; 点阵电路大小为 32×64, 采用 AT89S51 单片机对其控制^[4-6]。在 LED 阵列

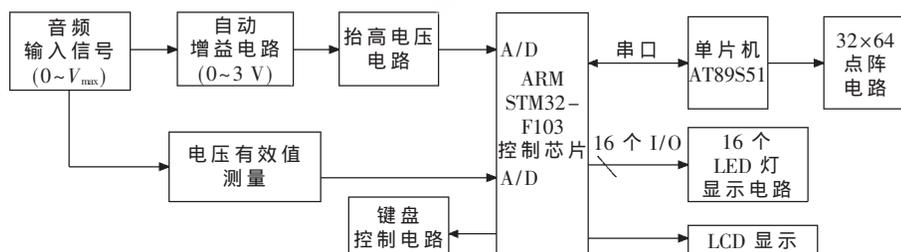


图 1 系统总体设计方案框图

中, 其中前 15 列表示 15 个频率等级, 第 16 列表示总音量等级; 另采用一行 16 个 LED 灯, 用其亮度指示每个频段下音量的强弱。整体电路采用模块化设计, 简单易懂, 易于调试和实现系统要求。

2.2 主要单元电路

采用 STM32F103 ARM 芯片, 配置外部 5 V 的直流电源和晶振电路就可以构成单片机最小控制系统电路, 限于篇幅, 其最小系统电路图忽略, 文中主要介绍关键的硬件单元电路, 即音频信号预处理电路和电压真有效测量电路, 限于篇幅, 仅介绍电路组成及功能, 硬件单元电路图忽略。

2.2.1 音频信号预处理电路

音频信号预处理电路主要包含两个部分: 电压自动增益电路、电压抬高电路。由于输入音频信号的电压范围(峰-峰值)为 0~5 V, 当音频信号电压的峰-峰值比较小时, 信号的幅值较小, 受外界信号干扰大, 容易引起测量不准, 所以要采用放大电路。设计中选用 OP2365 组成三级增益可调的放大电路, 电压增益可调范围分为四档: 10 mV~200 mV, 70 mV~750 mV, 200 mV~2 V 和 300 mV~5 V。当输入音频信号电压值较小时, 就选择增益较大的一档进行调节; 当输入音频信号电压值较大时, 就不需要再对信号放大。另外, 音频信号采样时, 要求输入信号的电压范围不能有负值, 并保证被转换电压的幅值范围在 STM32F103 芯片自带的 A/D 转换器的处理范围内, 这就需要对输入信号电压负值进行抬高处理, 保证信号电压为正值。经过抬高处理后, 正弦信号的负峰值点刚好和横轴相交, 抬高电压值 $v_{tg} = 3.3$ V。

2.2.2 真有效值电压检测电路

交流电压的真有效值是通过电路对输入交流电压进行“平方—求平均值—开平方”的运算而得到的。设计中采用 AD736 和 OP07 组成真有效值电压检测电路。AD736 是经过激光修正的单片精密真有效值 AC/DC 转换器, 准确度较高、频率特性较好。OP07 芯片是一种低噪声、非斩波稳零的双极性运算放大器集成电路, 具有低失调、高开环增益的特性。实际测试中, 该电路测量正弦波电压的综合误差不超过 $\pm 3\%$ 。假设输入信号的峰值为 v_{\max} , 则有效值 $V_m = v_{\max} / \sqrt{2}$, 检测出峰值后, 按照比例进行放大。

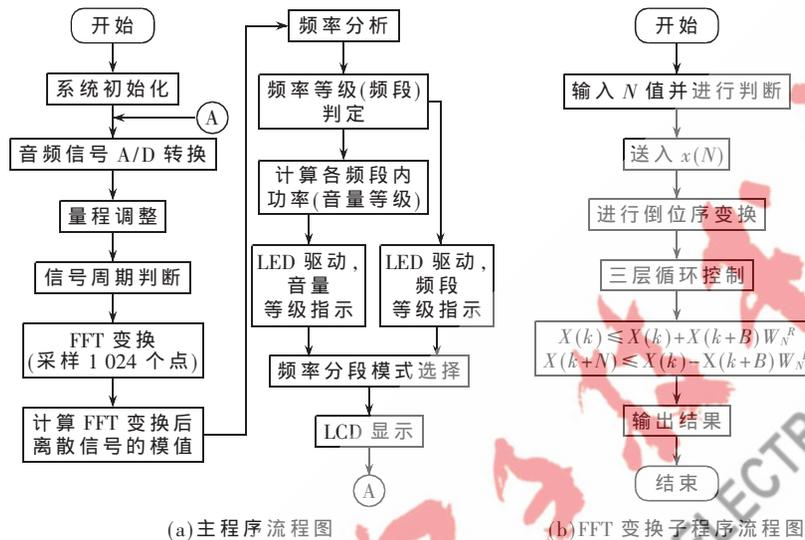
3 系统软件设计

系统软件采用模块化设计, 分为主程序和子程序两大部分。主控制芯片采用 STM32F103, 由于处理器速度较快, 所以采用 C 语言编程, 方便简单。子程序包括 A/D 采样、周期性判断、FFT 变换、延时、LED 驱动、LCD 显示等。系统程序流程图如图 2 所示, 限于篇幅, 文中仅介绍 FFT 变换子

应用奇葩

Example of Application

程序。系统通过模式选择按键进入不同的功能。对频率的指示采用两种频率等级计算方法：线性方法和对数方法。线性方法是在最低频率点和最大频率点之间进行 15 等分,得到各个频率点及其对应的幅度,然后根据这些频点计算出中心频率点及其对应的幅度;对数方式是在最低频率点和最大频率点之间采用对数函数计算 15 个频率等级点及其对应的幅度。同时,系统也采用了按键模式来控制各个频段对应的音量强弱。系统输入信号自动增益的档位、按键模式、对各个频点下的幅度及总的幅度会显示在 LCD 液晶屏上。



(a)主程序流程图

(b)FFT变换子程序流程图

图2 系统程序流程图

4 测试方法与结果分析

测试中,输入信号经过音频输入预处理电路,系统处理的电压在 0~3.3 V 范围内。同时,在硬件系统测试之前,要验证自编的 FFT 算法对信号处理的准确性。

首先任意选择一个 WAV 音频信号进行自编 FFT 程序的测试。测试中借助了 MATLAB 软件中自带的 FFT 子程序,设定一个采用频率,选取不同的采样点 128 和 1 024,应用 MATLAB 进行频谱分析,观察采样点选择不同信号对频域分析的影响,得到的仿真结果如图 3 所示。对其进行信号频谱分析的结果与自编 FFT 程序在 STM32F103 单片机上运行的结果进行数据对比分析,测试数据误差小于 0.1%,频谱图形状几乎与 MATLAB 仿真波形一致,证实了自编 FFT 算法的正确性。

结合仿真分析结果,对系统选定的采样频率为 $f_s = 23.81$ kHz,采样点数为 1 024,又知输入信号的最大频率为 10 kHz,则测定的采样频率 $f_s > 20$ kHz,满足香农采样定理,故 f_s 选定符合理论分析结果。在此采样频率下,最小采样频点为 23.25 Hz,最大采样频点为 10.74 kHz,分别采用线性方法和对数方法实现频率分析和处理。

然后采用方波和不同频率的正弦波作为输入信号,对 FFT 变换结果进行量化,根据能量定理,检验各频率点对应的功率值;同时观察最大幅值在数组的位置 P ,

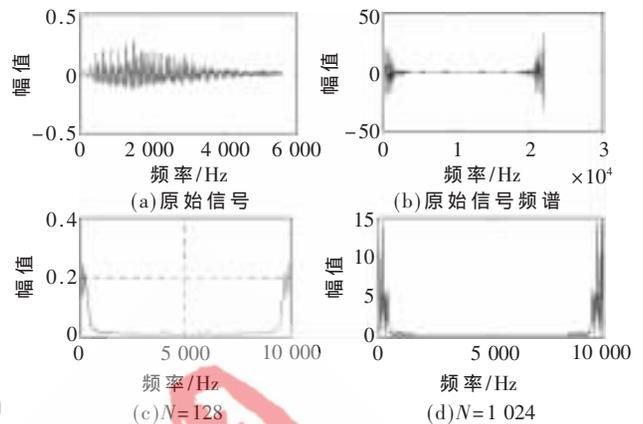


图3 音频信号的 MATLAB 仿真图形

以及被测信号频率 f 、采样频率 f_s 、采样点数 N (测试中取 $N=1024$) 之间的关系是否满足公式 $f=(f_s/N) \times P$ 。对系统运行得到的频谱分析数据与采用 MATLAB 软件进行 FFT 分析的结果进行对比,观测到两种方法在相同频点处信号的幅度和功率数据变化不大,由此验证了所设计的 STM32F103 单片机系统进行信号频域分析的准确性。

最后,任意选择手机播放的男声、女声演唱的 MP3 歌曲作为输入信号进行测试,观测播放时 15 个频率等级、每一个频率等级下 31 个等级的音量强弱的 LED 指示情况以及 32 个总音量等级的 LED 指示情况,观察音乐幅度、频率的 LED 指示效果,根据运行情况进行程序调试,同时观测 LCD 显示的最大 4 个功率(即幅度值)所在的频率点以及总功率并记录数据。

以正弦信号作为输入信号的总功率测量和单个频率分量测量得到的结果分别如表 1 和表 2 所示,测试结果表明测试数据和用电脑模拟的结果很接近。

应用 STM32F103 ARM 最小控制系统和快速傅里叶变换(FFT)算法,并结合 LED 点阵技术,本文设计并实现了一个音乐频率幅度彩灯指示器。系统的硬件电路采用模块化设计,各模块之间串口少,调试方便;音频输入信号预处理电路具有自动增益和电压抬高功能,频率等级分析方法分为线性均分和对数处理两种,可以通过按键进行方法选择,同时频率等级的大小由 LED 灯的个数指示,且指示结果较准确;每一频段的大小及该频段下音量的强弱和所有频段下的总音量强弱都能由 LED 灯的亮度变化进行指示。分别采用标准方波信号和正弦信号进行测试,同时借助 MATLAB 的 FFT 分析结果,验证了自编 FFT 算法在 STM32F103 单片机系统中运行的准确性,然后应用任意音频输入信号进行测试,测试结果实现了比赛题目的基础要求和提高要求,证实了所设计的音乐频率幅度指示器具有较好的频率等级和音量

欢迎网上投稿 www.pcachina.com 87

表 1 输入信号的总功率测量

输入信号	频率/Hz	幅度/mVpp	测量时域总幅度	测量频域总幅度	理论值	估算误差/%
正弦波	1 000	200	4 617	4 619	4 616	<2
	5 000	400	7 447	7 443	7 446	<2
音频信号	80~10 000	20~5 000	7 830	7 610	—	<5
			1 803	1 777	—	<5

表 2 单个频率分量测量

输入信号	频率/Hz(理论值)	峰-峰值/mVpp	最大功率频点/Hz	最大功率频点幅值	次大功率频点/Hz	次大功率频点幅值
正弦波	500	200	506	2 674	520	1 937
正弦波	1 000	200	1 001	4 102	1 103	3 255
正弦波	5 000	400	5 004	4 097	4 007	1 028
正弦波	10 000	100	10 004	2 036	9 767	22

等级指示效果,而且整个系统的设计方案与实现都具有重要的理论研究意义和实用意义。

参考文献

- [1] 周围,姚丽娜.基于 FFT 变换的快速信道估计算法[J].重庆邮电大学学报,2010,22(5):551-554.
- [2] 邓小平,张贤,谭书伟,等.基于 FFT 算法的音频信号分析仪[EB/OL].(2011-03-15).[2011-06-05].http://www.paper.edu.cn.
- [3] 王平,江华丽,郑孔华,等.基于单片机的音频信号分析仪的设计[J].现代电子技术,2009(19):122-124.
- [4] 周杰英,陈晓帆,王涛,等.点阵 LED 多功能动态显示实

验系统设计[J].实验室研究与探索,2010,29(9):36-40.

[5] 张立科.单片机典型外围器件及应用实例[M].北京:人民邮电出版社,2006.

[6] 吴国伟.嵌入式操作系统原理及应用开发[M].北京:北京航空航天大学出版社,2007.

(收稿日期:2011-08-16)

作者简介:

崔鸣,男,1972年生,工程师,主要研究方向:数字通信信号处理。

尚丽,女,1972年生,副教授,高级工程师,工学博士,主要研究方向:人工智能和数字图像处理。