

IIR 滤波器在 DTMF 信号检测与识别中的研究

宋贵科 林晓焕 麻焕成 贾丽云

(西安工程大学电子信息学院 西安 710048)

摘要:根据戈泽尔算法的推导 DTF 可以看作是一个二阶 IIR 滤波器的零状态响应。利用 IIR 滤波器与戈泽尔算法相结合的方法来提高双音多频信号检测的准确性和稳定性,以期解决信号检测对专用解码芯片的依赖。研究中使戈泽尔序列分别通过 IIR 滤波器和通用滤波器,对比二者的输出结果。结果表明,IIR 滤波器与戈泽尔算法相结合有助于提高双音多频信号检测的准确性和稳定性。通过 DTMF 信号检测的 MATLAB 的仿真,证明了将带有 IIR 滤波器的戈泽尔算法移植到 DSP 硬件上能够解决对专用解码芯片的依赖。

关键词:DTMF 信号;戈泽尔;IIR 滤波器;MATLAB

中图分类号: TN912 **文献标识码:**A **国家标准学科分类代码:** 510.4040

IIR filter research in DTMF signal detection and identification

Song Guike Lin Xiaohuan Ma Huancheng Jia Liyun

(Electronics and Information College, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: According to the derivation of the DTF Goertzel, algorithm can be regarded as a zero state response of the two order IIR filter. In order to solve the dependence on special decoding chip of signal detection, it can be combined the IIR filter with the Goertzel algorithm to improve the accuracy and stability of DTMF signal detection. Goertzel sequence respectively through by IIR filter and universal filter, then compare the two outputs. The results show that the combination of IIR filter and the Goertzel contribute to improve the accuracy and stability of DTMF signal detection. Through the simulation of Matlab, it can be concluded that the Goertzel with IIR filter is transplanted to the DSP hardware can solve the dependence on special decoder chip.

Keywords: DTMF signal;Goertzel;IIR filter;MATLAB

1 引言

双音多频(dual tone multi frequency, DTMF)信号产生起初是为了代替电话机的脉冲拨号而使用的,DTMF 信号由一个高频信号和一个低频信号编码而成。它最早是由美国贝尔公司作为注册商标而在商业领域中使用,DTMF 信号的产生解决了脉冲拨号不稳定、传输速率慢和抗干扰能力差的特性,这样就使 DTMF 信号的使用扩展开来。DTMF 信号起先主要用于打电话时电话机的拨号和使用手机的其他功能,如播放语音信箱、查看邮件、阅读短信等。DTMF 信号具有稳定性强、抗干扰性强等优点,但它是在硬件的基础上实现的。DTMF 信号的稳定性强就需要在编码时符合规定的标准,信号具有足够的强度和不能混入杂音,DTMF 信号的抗干扰能力强主要是

它由两个特定的音频组成,在接收时能很好的与其他信号区别开来^[1-3]。可是在遇到语音、音乐等其他杂音干扰时就会出现一定的误差,因此信号中总是或多或少的有杂音。虽然利用戈泽尔算法能够很好的检测和鉴别,但是还是不同程度的参杂有杂音。现在 DTMF 信号的产生和去除杂音多依赖于专用的发生和去杂音芯片,但这些芯片是固化的程序或纯硬件,使用灵活性差,遇到语音、音乐等其他杂音干扰时就会出现一定的误差,而又不能改变其特性。因此 DTMF 信号的检测和识别只依靠专用芯片不是一个好的选择。随着科技的发展将来的生活和工作将会越来越智能化、信息化、数字化,从而对于双音多频信号中的杂音,可以使用数字滤波器进行滤除干扰。

2 DTMF 信号的产生

双音多频信号是基于两个二阶数字正弦振荡器产生的,图1中包含了两个正弦波振荡器,一个振荡器是用于产生列频对应的高频,一个振荡器是用于产生行频对应的低频^[1]。DTMF 信号总共有 16 种频率,就是数字 0~9 和 *、#、A、B、C、D 分别对应的频率,它有 4 个低频和 4 个高频通过矩阵键盘的方式相对应的产生^[4-6],如表 1 所示。

表 1 数字或功能键组合表

| 行频/Hz | 列频/Hz | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 209 | 1 336 | 1 477 | 1 633 |
| 697 | 1 | 2 | 3 | A |
| 770 | 4 | 5 | 6 | B |
| 852 | 7 | 8 | 9 | C |
| 941 | * | 0 | # | D |

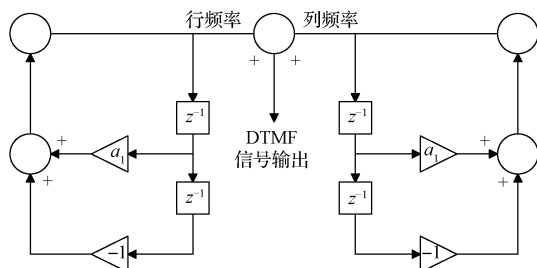


图 1 二阶正弦波数字振荡器

图 1 对应的二阶正弦波振荡器的函数为:

$$H(z) = \frac{b_0}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \quad (1)$$

该函数有两个共轭点在单位圆上。而 $b_0 = A \sin \omega_0$, $a_1 = -2 \cos \omega_0, a_2 = -1$ 。

该函数的复数共轭点为 $p_{1,2} = e^{\pm j\omega_0}$, 其函数的脉冲响应:

$$h(n) = \sin((n+1)\omega) \cdot u(n) \quad (2)$$

函数的差分式为:

$$y(n) = -a_1 y(n-1) - a_2 y(n-2) + b_0 \delta_n \quad (3)$$

它的初值应是 $y(-1) = y(-2) = 0$ 。通常为了方便会设置一些初始值代替一些不好处理的数据作为处理对象,如 δ 脉冲。使 $y(-1) = 0, y(-2) = -A \sin \omega_0$, 而 $\omega_0 = \frac{2\pi f_0}{f_s}, f_0$ 是要生成的信号的频率, f_s 是采样频率, 通过奈奎斯特定律证明当采样频率的最大值不超过 4 000 Hz 时, 信号就能通过设置采样率来进行恢复。经过几个初始值的初始化后就得到了图 1 所示的正弦波数字振荡器的模型。正弦波振荡器的数学差分方程为^[3]:

$$y(n) = a_1 y(n-1) - a_2 y(n-2) \quad (4)$$

式中: $a_1 = 2 \cos \omega_0, a_2 = -1$ 。初始值设置为 $y(-1) = 0$,

$y(-2) = A \sin \omega_0$, A 为一个常数, 代表 \sin 函数的幅度值的大小。

3 戈泽尔的原理

DTMF 检测是通过检测双音多频信号中的行频和列频的能量来判断按键信息, 可以通过快速傅里叶变换来实现检测, 但 DTMF 信号只与 8 个音频相关, FFT 算法是成块检测, 而戈泽尔算法只要检测其 8 个基频的能量即可^[7-9]。根据 CCITT 规定频率的偏差要控制在 $\pm 1.5\%$ 内, 要在 8 000 Hz 的采样频率下检测 DTMF 信号中 8 个基频的信号且保证偏差在范围内则需要 205 个采样点。

由于只需要 8 个频率, 因此使用 DFT 算法更效:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{kn} \quad (5)$$

k 值是相对应于表 1 中的 8 个频率值, 通过 Goertzel 算法能快速的算出它的离散傅里叶变换的系数, 对应于每个 k 值 Goertzel 算法能看作是一个用于频率匹配的滤波器^[10-11], 如图 2 所示。

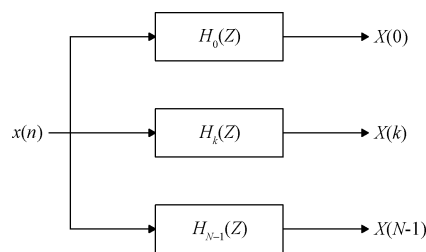


图 2 戈泽尔算法流程

图中 $H_k(k)$ 是第 k 个频率对应的传递函数, $x(n)$ 为系统的输入信号, 而 $X(k)$ 则为相应的滤波器输出。

通过公式得出^[4]:

$$W_N^{-kN} = e^{j(\frac{2\pi}{N})kN} = e^{2\pi k} = 1 \quad (6)$$

用 W_N^{-kN} 乘式(6)右边, 得出:

$$X(k) = W_N^{-kN} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{kn} = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{-k(N-n)} \quad (7)$$

定义序列:

$$y_k(n) = \sum_{m=0}^{N-1} x(m) W_N^{-k(n-m)} \quad (8)$$

式(8)可视为有限序列函数 $x(n)$, $0 \leq n \leq N-1$, 和函数序列 $W_N^{-kn} \mu(n)$ 的卷积。

所以 $y_k(n)$ 可看作是冲击响应 $W_N^{-kn} u(n)$ 的通过滤波器的输出。因此可以说, 因为 $x(n)$ 的有限性且作为输入, 滤波器才有了冲激响应:

$$h_k(n) = W_N^{-kn} \mu(n) \quad (9)$$

所以, 式(8)能表达为:

$$y_k(n) = x(n) \cdot W_N^{kn} u(n) \quad (10)$$

根据式(8), 式(9), 以及当 $n < 0$ 和 $n \geq N$ 时 $x(n) = 0$, 可以证明:

$$X(k) = y_k(n) \Big|_{n=N-1} \quad (11)$$

也就是在时间定在 $n=N-1$ 时会有 $X(k)$ 作为滤波器 $H_k(z)$ 的输出^[6]。

对式(10)作 z 变换, 计算得出:

$$Y_k(z) = X(z) \frac{1}{1 - W_N^{-kz-1}} \quad (12)$$

戈泽尔第 k 个滤波器的函数为:

$$H_k(z) = \frac{Y_k(z)}{X(z)} = \frac{1}{1 - W_N^{-kz-1}} \quad k = 0, 1, 2, \dots, N \quad (13)$$

可以利用式(13)的多个滤波器来组成一个平行组合, 然后可以把数据进行滤波, 从而计算出整个离散傅里叶变换。式(13)的滤波器多个能组成一个平台是因为它在频率为 $Wk = 2\pi k/N$ 的单位圆上有一个极点, 对于 DTMF 信号采样点的 N 则需要计算出 N 个离散傅里叶系数, N 的选择还有能使 $X(k)$ 接近双音多频信号频率 f_k , 因此 N 的选择需要下式实现^[6]:

$$\frac{f_k}{f_s} = \frac{k}{N} \quad (14)$$

式中: f_s 为采样频率, 值设为 8 kHz。

4 IIR 数字滤波器的实现结构

在本文中使用的 IIR 数字滤波器的实现结构为直接 II 型结构, 其差分方程^[6]描述为:

$$y(n) = \sum_{k=0}^M b_k x(n-k) + \sum_{k=1}^N a_k y(n-k) \quad (15)$$

根据此差分方程实现结构如图 3^[6] 所示。

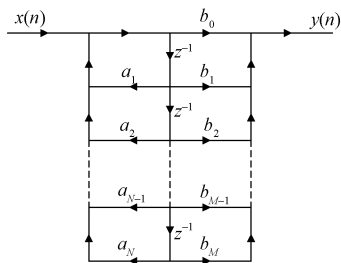


图3 直接 II 型结构

在 MATLAB 中调用 filter 函数就是用直接 II 型结构来实现一个数字滤波器, 其调用格式^[6]为:

$$y = \text{filter}(b, a, X)$$

式中, 向量 b 和向量 a 分别用来指定滤波器传递函数的分子多项式和分母多项式, X 代表输入序列, 滤波后的序列返回到变量 y 中。

5 双音多频信号的检测验证

双音多频信号的产生是由两个正弦函数相加而成的表达式是: $x(k) = \sin(2 \times \pi \times n \times f_1) + \sin(2 \times \pi \times n \times f_2)$ 产生, 此式中的 f_1 和 f_2 分别对应表 1 中的一个行频和一个列频, 通过数字公式的方法产生双音多频信号, 使用方便且清晰明了。假如规定对双音多频信号的采样频率为 10 000 Hz, 通过采样得出的时域离散信号为:

$$x(k) = \sin(2 \times \pi \times n \times f_1 / 10\ 000) + \sin(2 \times \pi \times n \times f_2 / 10\ 000)$$

当接收到 DTMF 信号后需要对叠加的两个正弦波进行检测并辨别出正弦波中对应的低频和高频, 从而根据高低频判断输入的是哪个十进制数字或符号。可以采用数学公式方法进行检测和识别, 但首先需要将双音多频信号通过模数转换器转为数字信号然后在进行检测。MATLAB 仿真验证的是 Goertzel 算法。DTMF 信号的产生、检测流程如图 4 所示。

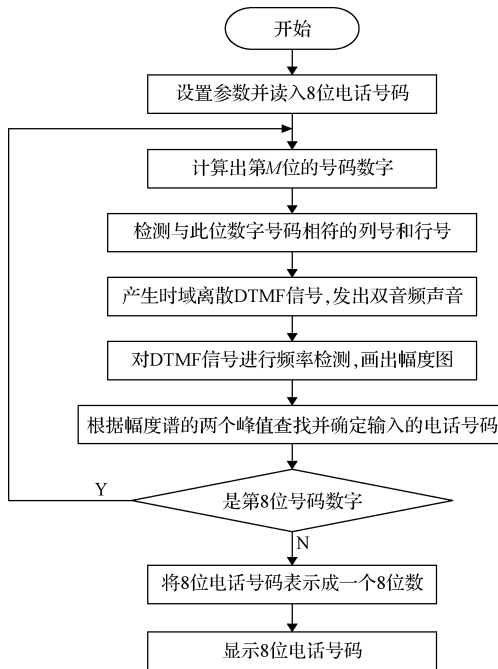


图4 DTMF 信号的产生、检测流程

通过流程图在 MATLAB 中编写程序进行仿真, 当在键盘上输入 8 位数字后按回车键, 听到 8 声 DTMF 短音后, 弹出界面, 如图 5 所示。

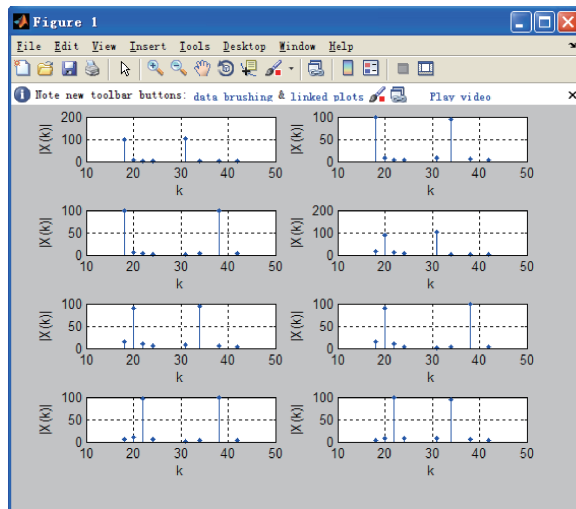


图5 系统显示结果

命令窗口显示,如图 6 所示。



图 6 系统显示结果

由命令窗口和弹出的界面可以看出,当在计算机键盘上输入 8 个数字键时,都能看到结果和输入的按键一致,而且其频谱的峰值也与表 1 的组合相一致,说明 Goertzel 算法的正确性。如图 7 所示是将戈泽尔算法与 IIR 滤波器结合之后并移植硬件的系统结构。

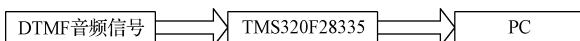


图 7 系统总体结构

DTMF 音频信号通过 TMS320F28335 处理,然后单片机将处理的结果通过 HPI 接口读取,然后再通过串口传给 PC。

6 MATLAB 仿真结果

对 DTMF 信号分别通过 IIR 滤波器和通用滤波器进行仿真,其中随机输入一组数字为 74826935 作为输入信号。仿真结果如图 8,9,10 所示。

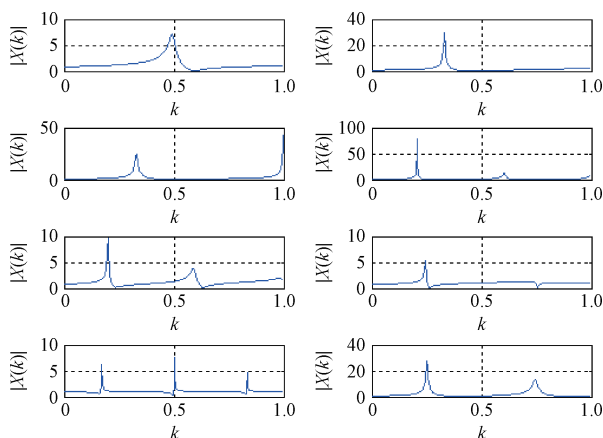


图 8 DTMF 信号未经过滤波器

对 MATLAB 的仿真结果分析,如图 8 可以清楚的看到波形的波峰比较尖并伴随小幅度波形,经比较得出 DTMF 信号没有经过滤波器的干扰较多,稳定性较差。如图 9 可以看出波形峰值尖容易从零突然变化之后又趋于零但比较整齐可以得出 DTMF 信号通用滤波器明显干扰

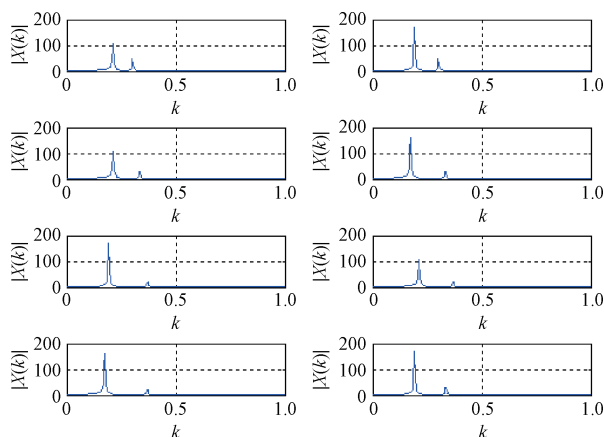


图 9 DTMF 信号经过普通滤波器

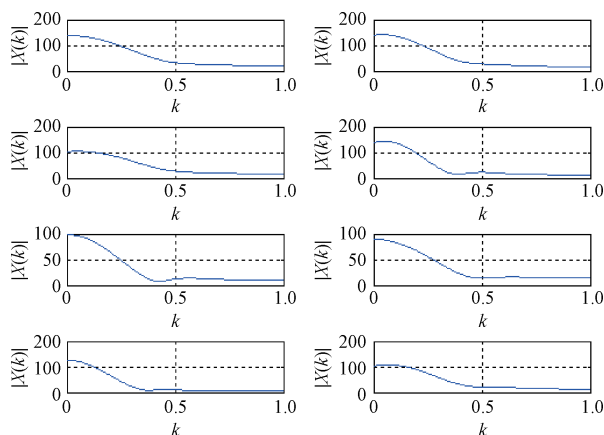


图 10 DTMF 信号经过直接 II 型结构的 IIR 数字滤波器

较少但所检测的高频和低频的范围缩小。如图 10 所示可以看出波形比较延缓并且没有尖峰波形可以得出 IIR 滤波器能够较好的滤除干扰并且能够有较好稳定性,并且所检测的高频和低频范围也增加了。

7 结论

针对 DTMF 信号的产生和检测验证,并经过 MATLAB 仿真,验证了戈泽尔算法的快速性、精确性和高效性,再将戈泽尔算法与 IIR 滤波器进行结合仿真有助于提高双音多频信号检测的准确性和稳定性。此算法移植到硬件上实现了 DTMF 信号的解码。利用 TMS320F28335 和语音解码芯片、单片机作为主要硬件,单片机负责语音解码芯片的初始化、复位 DSP 和与 PC 通信的功能,而且 DSP 从单片机中加载程序;以戈泽尔算法为主要算法依据,将 Goertzel 算法的快速性和 F28335 的高处理速度结合起来,实现了 DTMF 的解码,但尚存在一定的误码率。通过 DSP 进行双音多频信号的检测和识别,充分使用了 DSP 的资源同时省去了专用解码芯片,降低了 DTMF 信号解码的成本。

检测和识别存在一定的误码率,在实际应用中应多增

加一些检测指标以达到更精确的解码。如失真和扭曲度检测,二次谐波检测既能使DTMF信号和语音信号区分开来,还能判断当前号码是否同上次检测的号码相同,若不相同则为无效信号,其中还要注意判断静音信号以防重复检测。

参 考 文 献

- [1] 夏斌,于永学,李小瑞. 戈泽尔算法在DTMF信号检测中的应用与改进[J]. 电子测量与仪器学报, 2008, 22(增刊1):53-56.
- [2] 李仪府,彭卫韶. 双音多频信号检测在DSP中的实现[J]. 吉首大学学报, 2006, 27(3):43-47.
- [3] 吴庆国. 双音多频音产生与检测的DSP实现方案[J]. 信息化研究, 2011, 37(6):24-28.
- [4] 付宁,施睿,宋凌云,等. 基于欠采样的单音周期信号幅频测量方法实现[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(10):73-78.
- [5] 戴红. DTMF信号的产生与解码算法研究[J]. 信息技术 2008(11):88-91.
- [6] 钟麟,王峰. MATLAB仿真技术与应用教程[M]. 北京:国防工业出版社, 2004.
- [7] 刘高潮,梁向东. 用单片机实现DTMF信号译码[J]. 电子测量技术, 2008, 31(5):158-161
- [8] 刘明亮,朱江淼. 数字信号处理对电子测量与仪器的影响研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(10):1041-1046.
- [9] 李志农,朱明,褚福磊,等. 基于经验小波变换的机械故障诊断方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(11):2423-2432.
- [10] 王宏强,田青,唐福华. 基于DSP的DTMF拨号音解码器[J]. 计算机工程与设计, 2005, 26(1):135-137.
- [11] 常青青,邓大伟,艾红. 基于DSP的DTMF信号编解码算法实现[J]. 北京信息科技大学学报, 2011, 26(4):77-82.

作 者 简 介

宋贵科, 1990年出生, 硕士研究生, 主要研究方向为嵌入式系统应用。
E-mail: 1345060311@qq.com

(上接第87页)

- [6] 张志飞,陈思,徐中明,等. 基于反问题的正则化波束形成改进算法[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(8):1752-1758.
- [7] 刘正琼,胡丽莉,唐璇,等. 基于虚拟仪器的肢体姿态检测系统研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(6):907-913.
- [8] JIANG D, LIU X K, WANG D Y, et al. Analysis of sensitivity and errors in Maglev vibration test system [J]. Instrumentation, 2016, 3(1):70-78.
- [9] 史志辉,林君,周逢道. 基于虚拟仪器的高准确度同步采集系统[J]. 中国测试, 2016, 42(2):67-70.
- [10] 王显军. LabVIEW对串口采样测量数据的处理[J]. 电子测量技术, 2014, 37(3):107-111.

作 者 简 介

马新强, 1990年出生, 硕士研究生, 主要研究方向为动载荷识别、虚拟仪器设计与实现。
E-mail: mxq6368@126.com

姜金辉, 1981年出生, 博士, 副教授, 主要研究方向为振动测试与数据处理、动载荷识别、虚拟仪器设计与实现。
E-mail: jiangjinhui@nuaa.edu.cn

黄丹羽, 1995年出生, 本科, 主要研究方向为飞行器总体设计与虚拟仪器设计与实现。
E-mail: yuer_dan@163.com

任小梦, 1996年出生, 本科, 主要研究方向为飞行器总体设计与虚拟仪器设计与实现。
E-mail: Lunaysw@126.com