

基于Goertzel算法的DTMF信号检测及参数优化

陈延太

中电天奥有限公司航空事业部 四川成都 610036

摘要: 近年来, DTMF信号已经广泛地应用于通信系统, 比如电话银行、车辆的导航终端、语音邮件及自动取款机。为了保证它们能正常工作, 必须对其进行正确地解调以得到数字信号, 检测DTMF信号对上述应用具有十分重要的意义, 由于其具有较高的频率分辨率, 因此可以用来提取有用信息, 从而达到识别目的。本论文将深入研究Goertzel对DTMF的检测, 其中包括对关键参数的选取, 同时还对如何提高检测效率进行了分析与探讨。我们尤其强调采样点个数 N 非常重要, 最后还给出了DTMF检测的详细过程以及Matlab仿真结果。

关键词: DTMF信号; Goertzel算法; 参数选取

DTMF Signal Detection and Parameter Optimization Based on Goertzel Algorithm

Yantai Chen

Southwest China Institute of Electronic Technology, Aviation Department, Sichuan, Chengdu 610036

Abstract: In recent years, DTMF signals have been widely used in communication systems, such as telephone banking, vehicle navigation terminals, voicemail, and automatic teller machines (ATMs). To ensure their proper functioning, correct demodulation of DTMF signals is essential to obtain digital information. Detecting DTMF signals is of significant importance for the aforementioned applications. Due to its high frequency resolution, DTMF detection can be employed to extract useful information, thus achieving the goal of identification. This paper will delve into the study of Goertzel algorithm for DTMF detection, which includes the selection of key parameters. Additionally, an analysis and discussion on improving detection efficiency will be conducted. We emphasize the importance of the number of sampling points (N) and provide a detailed process for DTMF detection along with Matlab simulation results.

Keywords: DTMF signal; Goertzel algorithm; parameter selection

前言:

美国贝尔电话实验室创造了双音多频DTMF信号, 为当代按钮式电话拨号提供信号。为了保证它们能正常工作, 必须对其进行正确地解调以得到数字信号。该信号迅速代替过去脉冲拨号方式, 并且在电信系统得到了广泛的应用。该技术使用户可以通过一个简单电路实现高速拨号上网和通话, 而不用改变现有的电话线或线路。DTMF信号包含八个频率点, 分高, 低频率组, 每一组包括四种频率。这些不同频率在通话时相互独立。每一

个DTMF信号都由高频信号和低频信号迭加而成。表1示出各数对应的各种频率组合^{[1][2]}。

表1 DTMF信号频率对应关系

频率 (Hz)	1209	1336	1447	1633
697	1	2	3	A
770	4	5	6	B
852	7	8	9	C
941	*	0	#	D

DTMF信号是由表1中两个频率信号的叠加构成的, 同时还受到信道噪声和语音干扰的影响。由于多普勒效应的影响, 信号可能还存在频偏。DTMF信号解码器的技术指标要求如下:

- 1) 高低频电平差: $\leq 4\text{dB}$;

作者简介: 陈延太, 1982.06, 男, 汉族, 籍贯: 四川遂宁, 硕士研究生, 中级工程师, 研究方向为音频数字信号处理。

2) 电平范围: -4 ~ -23dBm;

3) 频偏: 在 ±1.5% 以内通过验证, ±3.5% 以上不通过验证;

4) 二次谐波: 比基频能量低 20dB 以上。

所以, 对于 DTMF 的信号, 时域内解码非常困难。相比较而言, 一种更有效的解码方法是首先利用离散傅立叶变换 (DFT) 将 DTMF 信号变换到频域, 接着在频域内对各频点进行能量计算和识别。

直接对 DFT 进行计算, 其不足之处在于计算量很大, FFT 算法一次性计算出全部频率点频谱, 但解码 DTMF 信号时, 仅需对表 1 少数频点进行频谱计算, 因此, DFT 与 FFT 均不适用于对 DTMF 进行信号解码。从工程的角度来看, 戈泽尔 (Goertzel) 算法^[1]是最常用的解码 DTMF 信号的算法^{[4][5]}。

尽管对 Goertzel 算法进行了广泛的研究, 但是对于检测过程涉及到的参数优化问题, 目前还未进行过多的深入探究。该文根据 DTMF 的信号特点, 结合 Goertzel 算法递推的特点, 达到 DTMF 信号正确检测的目的, 文中还详细地论述了检测中所涉及到的有关参数, 给出选择参数 N 的理论依据和论证结果。为 DTMF 信号检测时参数的恰当选取提供理论支持。

一、Goertzel 算法原理

Goertzel 算法由 Gerald Goertzel 于 1958 年提出, 属于离散傅里叶变换的范畴。设 $x[n]$ 为长度是 N 的采样序列, $n \in [0, N-1]$, 其中 n 为正整数, 则 $x[n]$ 的 DFT 为

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] W_N^{kn}, k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (1)$$

式中, $W_N = e^{-j2\pi/N}$, 则式 (1) 中 Goertzel 算法的计算公式为

$$y_k[m] = W_N^{-k} y_k[m-1] + x[m], m \in [0, N] \quad (2)$$

式中, m 为整数, $x[N]=0$; Goertzel 算法可看做一个二阶的 IIR 带通滤波器^[6], 且该滤波器的传递函数可表示为

$$H_k[z] = \frac{1}{1 - W_N^{-k} z^{-1}} = \frac{1 - W_N^{-k} z^{-1}}{1 - 2\cos(2\pi k/N) z^{-1} + z^{-2}} \quad (3)$$

因此, 实现该滤波器的结构框图如图 1 所示。

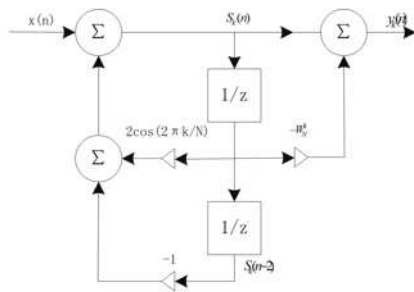


图 1 算法实现结构框图

由图 1 导出该滤波器的数学实现形式可以表示为:

$$s_k[n] = x[n] + 2\cos(2\pi k/N) s_k[n-1] - s_k[n-2] \quad (4)$$

$$X[k] = y_k[N-1] = s_k[N-1] - W_N^k s_k[N-2] \quad (5)$$

式中, $s_k[-1] = s_k[-2] = 0$ 。对每一个采样值而言, 式 (4) 递推运算一次 (总共计算 N 次)。在递推结束后, 式 (5) 仅需计算一次。由此得出计算一个具体频点的傅里叶变量总共需 N+2 次实数相乘和 2N+1 次实数相加运算^[7]。在 DTMF 信号检测过程中, 不需要关心信号的相位信息, 因此由式 (5) 可以推出:

$$|X[k]|^2 = s_k^2[N-1] - s_k^2[N-2] - 2\cos(2\pi k/N) \times s_k[N-1] \times s_k[N-2] \quad (6)$$

二、Goertzel 算法具体实现及参数选取

根据国际电联标准, DTMF 信号最短的持续时间为 40ms, 对应于 8KHz 的采样率条件下一共有 320 个样本^[8]。

时域信号通过数字采样离散化以后, 对应于某个频率的幅值的横坐标可用公式 (7) 表示

$$k_f = \frac{f_k \times N}{f_s}, 0 < k_f < \frac{N}{2} \quad (7)$$

式中 f_s 为采样频率, N 为采样个数, 将离散的时域信号进行周期延拓, 该信号将在频域中被离散化, 一个频率在幅值谱序列中的位置可用公式 (8) 表示

$$k = \text{round}\left(\frac{f_k \times N}{f_s}\right) = \text{round}(k_f), k = 0, 1, 2, 3, \dots, \frac{N}{2} \quad (8)$$

式中, round 表示对浮点数进行四舍五入取整。为了区分 DTMF 信号中的 8 个频率成分, 8 个频率成分的 k 值均不能相等。

$$\text{round}\left(\frac{f_1 \times N}{f_s}\right) \neq \text{round}\left(\frac{f_2 \times N}{f_s}\right),$$

$$f_1, f_2 = 697, 770, 852, 941, 1209, 1336, 1477, 1633, f_1 \neq f_2 \quad (9)$$

满足公式 (9) 的 N 取值范围为 [73, 74, 81~86, 91~97, 99~320]。

根据 ITU 标准, 频偏在 ±1.5% 以内的 DTMF 信号均应视为有效信号, 因此 N 的取值应满足下式。

$$\text{round}\left(\frac{0.985 \times f_k \times N}{f_s}\right) \neq \text{round}\left(\frac{1.015 \times f_k \times N}{f_s}\right),$$

$$f_k = 697, 770, 852, 941, 1209, 1336, 1477, 1633 \quad (10)$$

满足公式 (10) 的 N 取值范围为 [1, 2, 4~8, 11, 12, 13, 16, 18, 20, 24, 25, 28, 31, 34, 44, 48, 53, 54, 59, 60, 65, 113]。同时满足公式 (9) 与公式 (10) 的 N 为 113, 因此我们可以认为在采样频率为 8KHz 的情况下, N 的最佳取值为 113。

当采样频率变化时, 如果出现多个 N 值同时满足公式 (9) 与公式 (10), 此时我们可以构造以下公式。

$$y = \sum_{i=1}^8 \left(\text{round} \left(\frac{f_k \times N}{f_s} \right) - \frac{f_k \times N}{f_s} \right)^2,$$

$$f_k = 697, 770, 852, 941, 1209, 1336, 1477, 1633 \quad (11)$$

此时求N值使得y最小即为最佳值。DTMF信号的全部检测流程如图2所示。

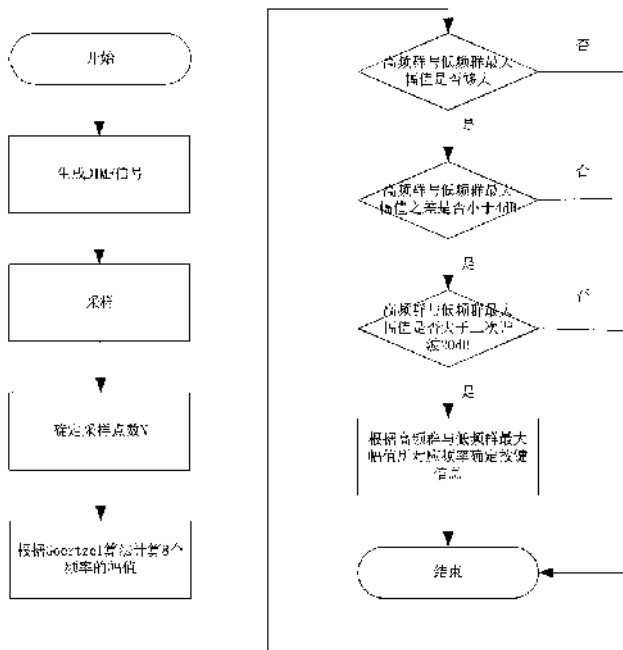


图2 DTMF信号检测流程

一些论文指出，当N=205时为DTMF信号检测的最佳值^{[9][10]}。图3给出了N=113及N=205时对键值“A”的检测结果比较。

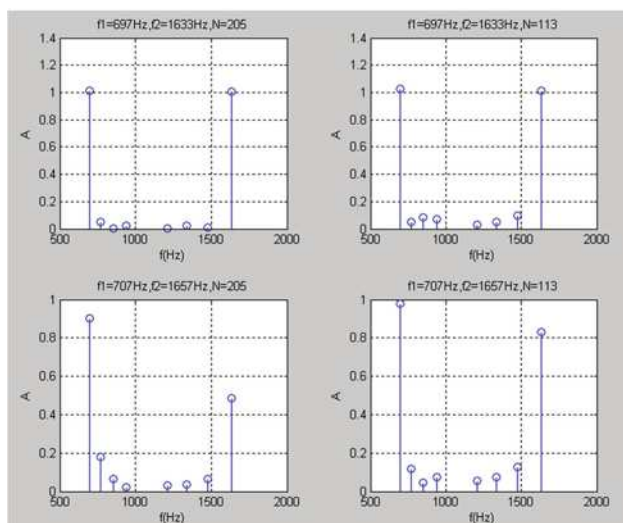


图3 N=205及N=113时键值“A”的检测结果

如图3所示，当键值“A”的两种频率成分频偏为0时，N=205及N=113均可以取得较好的检测结果。但是当键值“A”的两种频率成分的频偏在ITU标准许可范围

内的1.5%时，用N=205检测得到得结果很差，此时低频成分与高频成分的幅值差为5.4dB，按ITU检测标准属于误检，而用N=113检测得到的低频与高频成分的幅值差为1.4dB，显然是一个正确的检测。

三、结束语

作为数据通信系统和音频电话系统的重要技术信号，DTMF信号的快速准确检测是至关重要的。本文详细分析了利用Goertzel算法进行DTMF信号检测的原理及其主要参数的选取。虽然目前还有很多其他的DTMF信号检测算法，比如基于支持向量机的算法等，但是对于如何优化检测过程中的参数，以往讨论不多，本文特别论证了N值的优化，并详细给出了相应的DTMF信号检测过程和仿真结果。

参考文献：

[1]郭彤旭.基于增强型Goertzel滤波的DTMF算法研究及检测系统实现[D].北京：北京工业大学，2015.
 [2]刘伟，张育钊.基于Goertzel算法的亚音频识别方法[J].通信技术，2014（6）：159-162.
 [3]Goertzel G. An Algorithm for the Evaluation of finite Trigonometry Series [J]. American Math Monthly, 1958, 65(1): 34-35.
 [4]Beck R, Dempster G. Finite-precision Goertzel Filter Used for Signal Tone Detection [J]. IEEE transactions, 2001,48(6): 691-700.
 [5]Felder D, Mason C. Efficient Dual-Tone Multifrequency Detection Using the Nonuniform Discrete Fourier Transform [J]. IEEE Signal Processing Letters,1998,5(7):160-163.
 [6]王卫兵，朱秋萍，徐心毅，等.Goertzel算法的一种改进计算结构[J].武汉大学学报（理学版），2007，53（3）：375-378.
 [7]Shen L T, Hwang S H. A new algorithm for DTMF detection[A]. Proceedings of WOCN'09 IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks[C]. Cairo, 2009.
 [8]张震宇.基于Matlab的语音断点检测试验研究[J].浙江科技学院学报，2007，19（3）：197-201.
 [9]金鑫春，旺一鸣.Goertzel算法下DTMF信号检测及参数优化[J].现代电子技术，2010（06）：152-155.
 [10]徐灵飞，章红，林浩东.改进DTMF信号检测方案在定点DSP上的实现[J].电讯技术，2012，52（5）：721-725.