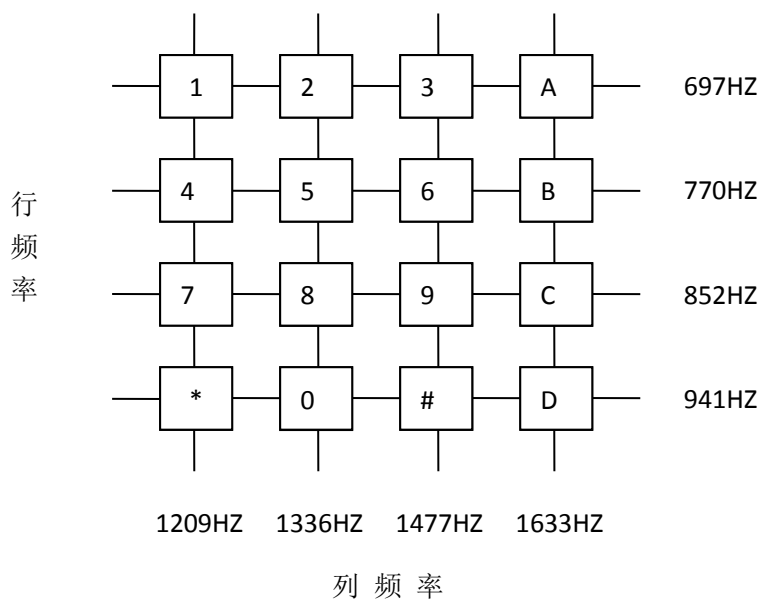


DTMF 信号的检测与识别

基本原理：

现有拨号式电话机的拨号音均采用**双音多频 DTMF**（Dual Tone Multiple Frequency）方式来产生和识别。电话机根据所拨按键的不同产生不同的音频信号，每个按键对应着由两个频率信号组成的音频信号。在交换机端，对收到的音频信号进行分析，检测有效频率组合的存在性，并将其转换成对应的按键或数字信息。电话系统中的 DTMF 信号有两种作用：一是控制交换机接通被叫用户的电话机；二是用于控制电话机的各种动作。

DTMF 信号可直接利用行频和列频两组正弦信号的叠加来产生。行频和列频分别包含 4 个频率，每个按键对应着一个行频和列频的频率组合，因此 DTMF 信号共有 16 个编码。DTMF 的具体频率配置见下图：



对于 DTMF 信号的检测和识别可以有如下两种方法：

- 方法 1：利用 FFT 直接计算输入信号 DFT 的所有谱线，了解信号整个频域信息，进而检测 DTMF 的存在并识别相应的按键。
- 方法 2：考虑到 DTMF 信号只关心其 8 个行频/列频信息，如果有选择地计算特定频率点处的 DFT，则可以大大提高运算速度。这正是 Goertzel 算法的出发点。该算法利用相位因子的周期性，将 DFT 计算表示为线性滤波运算，实现

了有选择地计算特定频点处的 DFT。该算法的简要推导过程如下：

(1) 利用相位因子的周期性，可将 DFT 定义表示成如下形式

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] W_N^{nk} = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] W_N^{(n-N)k}$$

(2) 将 n 替换为 m，代入上式可得

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

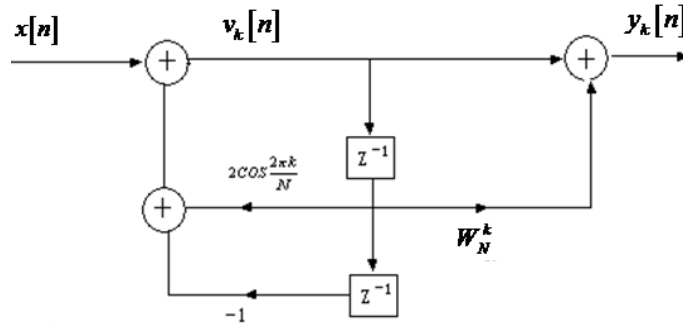
上式表明，序列 $x[n]$ 的 DFT 第 k 个输出结果等于将 $x[n]$ 输入单位抽样响应为 $h[n] = W_N^{-kn}$ 的 LTI 系统后的第 N 个输出值。

(3) 对 $h[n] = W_N^{-kn}$ 进行 z 变换可得：

$$H_k(z) = \frac{1 - W_N^k z^{-1}}{1 - 2z^{-1} \cos \omega_k + z^{-2}} = H_{k1}(z) H_{k2}(z)$$

$H_k(z)$ 可看作是级联型网络如下图所示，其中

$$H_{k1}(z) = \frac{1}{1 - 2z^{-1} \cos \omega_k + z^{-2}}, \quad H_{k2}(z) = 1 - W_N^k z^{-1}, \quad \omega_k = \frac{2\pi k}{N}$$



因此，每一个待计算的特定频率点都对应着一个匹配滤波器。第 k 个频率匹配滤波器对应的两个差分方程为：

$$v_k[n] - 2\cos(\omega_k)v_k[n-1] + v_k[n-2] = x[n]$$

$$y_k[n] = v_k[n] - W_N^k v_k[n-1]$$

其中，前一个差分方程也可以改写为便于计算的递归形式：

$$v_k[n] = x[n] + 2\cos(\omega_k)v_k[n-1] - v_k[n-2]$$

并令初始状态为 0。而后一个方程无需全部计算，只需要在 $n=N$ 即最后的输出

时刻计算，得到

$$X[k] = y_k[N] = v_k[N] - W_N^k v_k[N-1]$$

下图给出了电话拨号“7”时的 DTMF 信号波形及上述两种方法得到的频谱。

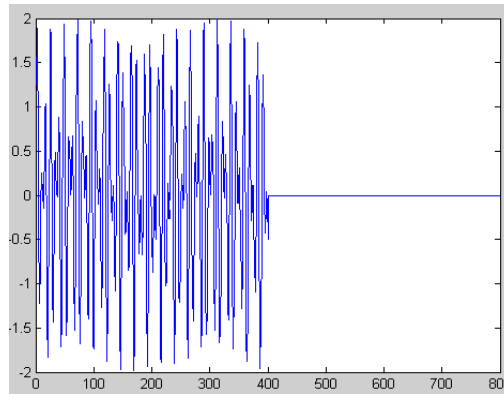


图 a

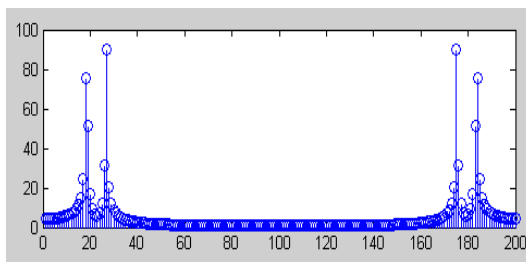


图 b

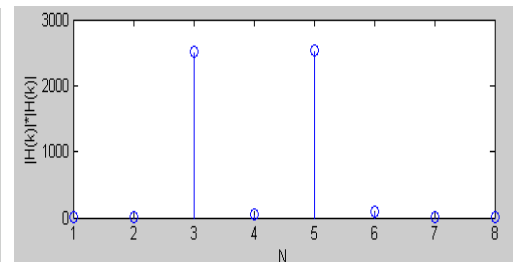


图 c

a: 电话拨号“7”的 DTMF 编码信号波形

b: “7”的 DTMF 编码 FFT 频谱

c: “7”的 DTMF 编码 GOERTZEL 功率谱

课程设计内容

要求利用上述两种算法，对给定音频文件中的双音多频信号进行检测和识别。

(1) 下载附件包中第一小题的 10 个长度不一的音频文件，利用第一次课程设计中编写的 FFT 程序对这 10 个文件中的 DTMF 信号进行频谱分析，最后给出 10 个文件所对应的真实数字。

(2) 编写 Goertzel 算法的 C/C++ 语言程序，完成 (1) 中的要求。

(3) 下载附件包中第二小题的一个长音频文件，文件中包含了一串 DTMF 信号，每个双音多频信号之间的时间间隔不一，对本串 DTMF 信号进行识别。

附件和设计报告说明

- (1) 附件包中给出的音频文件采样率为 **8kHz**。
- (2) 课程设计报告中应包括程序设计思路、程序流程图、两种算法的计算结果和复杂度性能的比较。