

信号处理综合课程设计

说 明 书

设计题目： 双音多频 (DTMF) 信号的合成与识别

姓名： _____ Name 学号： _____ ID

班级： _____ Class 成绩： _____

2026 年 1 月 1 日

目录

1 设计内容与要求	3
1.1 设计内容	3
1.2 设计要求	3
2 总体方案	3
3 方法原理	4
3.1 DTMF 编码原理	4
3.2 Goertzel 算法	5
3.3 性能评估指标	5
4 性能分析	5
4.1 算法实现与仿真	5
4.2 时频分析	5
4.3 抗噪性能测试	7
4.4 算法对比实验	8
4.4.1 实验一：信号窗口长度与算法鲁棒性研究	8
4.4.2 实验二：自适应变积分时间检测 (Adaptive Variable Integration Time)	9
4.4.3 实验三：ESC-50 真实环境音频测试	10
4.5 理论分析	11
4.6 研究结论	11
5 交互式实验演示系统实现	12
5.1 系统架构	12
5.2 三种工作模式	12
5.2.1 实验模式 (Experiment Mode)	12
5.2.2 电话模式 (Phone Mode)	13
5.2.3 音频分析模式 (Audio Analysis)	14
5.3 关键技术实现	15
5.3.1 频率偏移模拟	15
5.3.2 ESC-50 环境噪声	15
5.3.3 WAV 存储与分析一致性	15
5.4 项目文件组织结构	15
6 FPGA 硬件实现	16
6.1 硬件架构设计	16

目录	2
6.2 引脚分配与资源使用	17
6.3 验证与综合	17
7 附录：项目源代码	19
7.1 Python 核心算法实现 (Goertzel)	19
7.2 FPGA 信号发生器逻辑 (VHDL)	20
8 参考文献	22

1 设计内容与要求

1.1 设计内容

本课程设计的主要目标是利用数字信号处理技术实现双音多频（DTMF）信号的合成及其在复杂噪声环境下的自动识别。具体内容包括：

1. **DTMF 信号合成**: 掌握 DTMF 信号的编码原则，利用 Python/Java 实现标准双频信号的生成，并具备相位连续性控制能力。
2. **核心算法实现**: 基于 Goertzel 算法实现高效的频点能量检测，替代传统的 FFT 方法，以满足实时性要求。
3. **自适应抗噪策略研究**: 针对低信噪比 ($SNR < 0dB$) 场景，研究并实现基于“动态积分时长”的自适应检测算法，解决传统固定窗口算法在即时性与准确性之间的矛盾。
4. **综合性能评估**: 引入 ESC-50 真实环境噪声数据集（如雨声、风声、街道噪声），对比分析算法在非高斯、非平稳噪声下的鲁棒性。
5. **交互式系统开发**: 构建基于 B/S 架构的交互式演示系统，实现信号产生的实时可视化、噪声注入及检测过程的动态展示。

1.2 设计要求

1. **指标要求**: 在 $SNR = -10dB$ 的高斯白噪声环境下，识别准确率需达到 95% 以上；在 $SNR = -20dB$ 的极端环境下，通过自适应策略仍能保持 80% 以上的可用性。
2. **系统要求**: 演示系统需具备“实验模式”（参数调优）、“电话模式”（场景仿真）和“分析模式”（离线处理）三种功能形态。
3. **分析要求**: 深入分析 Goertzel 算法的频谱泄漏效应及相干累积增益原理，并绘制详细的性能对比曲线。
4. **工程要求**: 代码需遵循模块化设计原则，实现 Python 算法原型与 Java 工程实现的逻辑统一。

2 总体方案

本设计采用“合成—信道—自适应检测—交互”的闭环处理流程，总体架构如下：

1. **信号产生层**: 负责生成标准的 DTMF 信号。支持参数化控制频率偏移（模拟硬件老化）和相位初值。

2. **信道模拟层**: 构建多样化的噪声信道模型。不仅支持标准 AWGN (加性高斯白噪声)，还集成了 ESC-50 真实环境声库，模拟实际通话场景。

3. 自适应检测层 (核心):

- **预判级**: 使用 40ms 短窗口快速估算信噪比。
- **决策级**: 根据 $\Delta SNR = 10 \log(T_2/T_1)$ 增益公式，动态计算所需的积分时长。
- **执行级**: 调用 Goertzel 算法在最佳时长下提取能量特征，结合峰值比判决输出结果。

4. **应用交互层**: 通过 Java Spring Boot 构建 Web 服务，提供可视化的波形显示、频谱分析及实时音频回放功能。

频率设计原理: DTMF 的 8 个频率经过精心选择，旨在最大程度减少非线性失真带来的干扰：

- **无谐波关系**: 没有任何一个频率是其他频率的整数倍，防止谐波干扰。
- **避免互调产物**: 任意两个频率的线性组合（和频与差频）都不会落在 8 个标准频率附近，有效抵抗互调失真。
- **避开工频**: 所有频率均避开电力系统的 50Hz/60Hz 及其主要谐波。

表 1: DTMF 频率编码表 (CCITT 标准)

Low / High	1209 Hz	1336 Hz	1477 Hz	1633 Hz
697 Hz	1	2	3	A
770 Hz	4	5	6	B
852 Hz	7	8	9	C
941 Hz	*	0	#	D

3 方法原理

3.1 DTMF 编码原理

DTMF (Dual-Tone Multi-Frequency) 信号由一个低频分量和一个高频分量叠加而成。其数学表达式为：

$$x(t) = A_L \sin(2\pi f_L t) + A_H \sin(2\pi f_H t)$$

其中 $f_L \in \{697, 770, 852, 941\}$ Hz, $f_H \in \{1209, 1336, 1477\}$ Hz。这种双音频设计可以有效防止单一频率信号（如语言声）导致的误触发。

3.2 Goertzel 算法

Goertzel 算法是一种二阶递归 IIR 滤波器形式的幅度估计算法，特别适用于检测已知频点。相比于通用的 FFT 算法，它在计算少量频点时效率更高。其差分方程为：

$$s[n] = x[n] + 2 \cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right) s[n-1] - s[n-2]$$

检测的能量值为：

$$|X(k)|^2 = s[N]^2 + s[N-1]^2 - 2 \cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right) s[N]s[N-1]$$

3.3 性能评估指标

识别准确率 P_{acc} 定义为：

$$P_{acc} = \frac{N_{correct}}{N_{total}} \times 100\%$$

其中 $N_{correct}$ 为正确识别的次数， N_{total} 为总测试样本数。

4 性能分析

4.1 算法实现与仿真

为了验证 DTMF 信号合成与识别算法的正确性，我们以按键”5”为例进行了仿真。

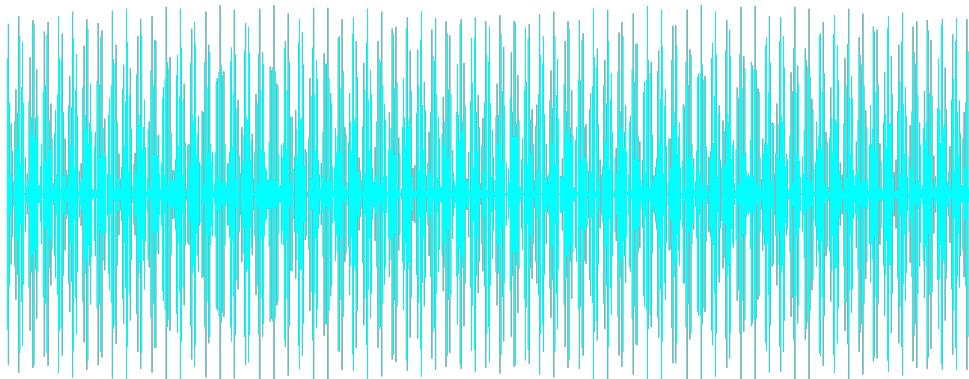


图 1: DTMF 按键”5”的时域波形图

4.2 时频分析

通过对合成信号进行 FFT 分析，可以看到在 770Hz 和 1336Hz 处有明显的频率分量。

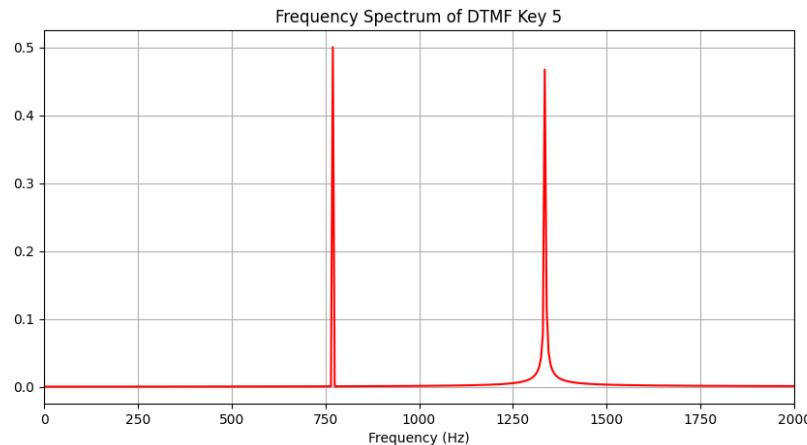


图 2: DTMF 按键”5” 的频谱图

为了更直观地展示连续拨号码时的频率特征，我们利用 FFmpeg 引擎生成了信号序列的语谱图 (Spectrogram)。

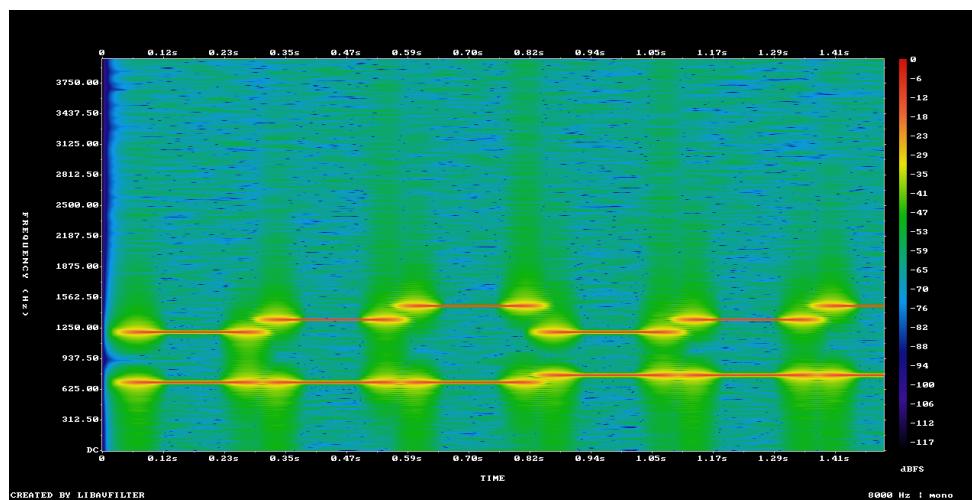


图 3: 连续拨号序列 (1-2-3-4-5-6) 的语谱图分析

利用 Goertzel 算法对 7 个目标频点进行能量检测，结果表明只有对应的两个频点能量显著升高。

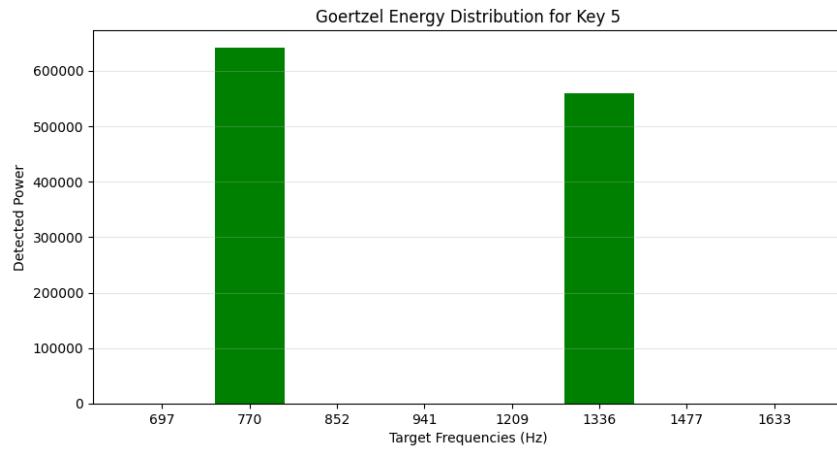


图 4: Goertzel 算法对各频点的能量检测分布

4.3 抗噪性能测试

在实验过程中，我们设置 SNR 从 -10dB 到 20dB 进行步进测试。

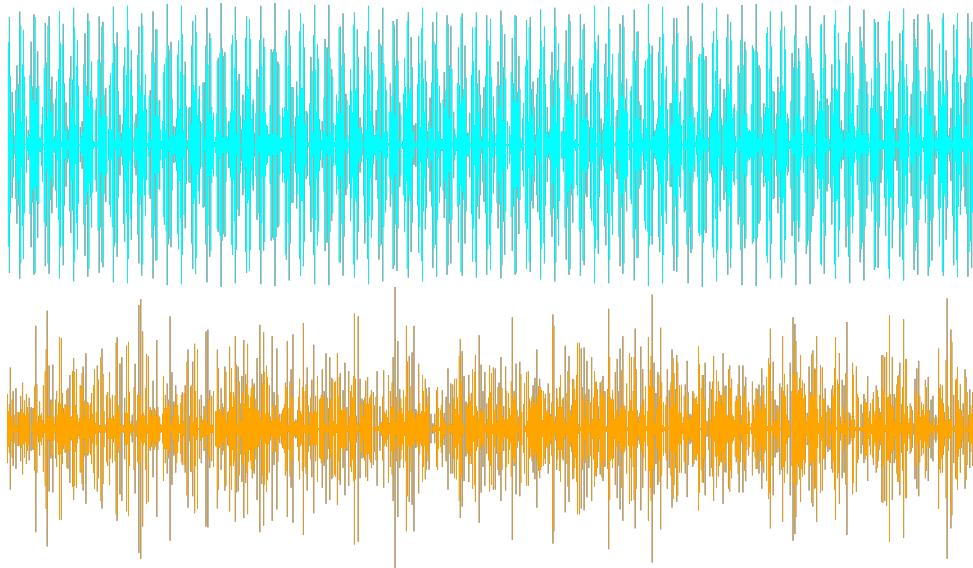


图 5: 纯净信号与 $\text{SNR} = -5\text{dB}$ 噪声信号对比

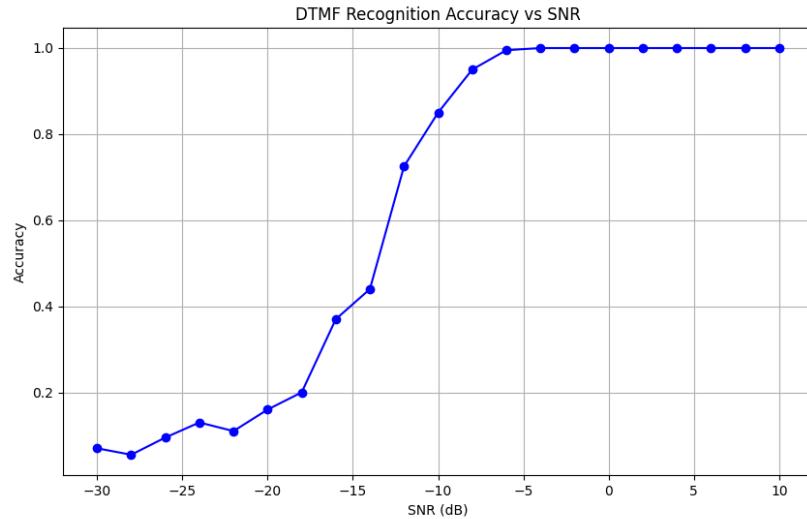


图 6: SNR 与识别准确率关系曲线

实验结果表明，在 SNR 大于 5dB 时，系统的识别准确率接近 100%。当 SNR 低于 0dB 时，准确度开始显著下降。

4.4 算法对比实验

为了探索先进识别算法在 DTMF 检测中的适用性，本项目设计了多轮对比实验。

4.4.1 实验一：信号窗口长度与算法鲁棒性研究

本实验旨在探究信号窗口长度对不同检测算法（Goertzel, 随机森林, MUSIC）性能的影响，从而为自适应策略的设计提供依据。测试选取了三种典型窗口长度：40ms (ITU 最短标准), 100ms, 和 200ms。

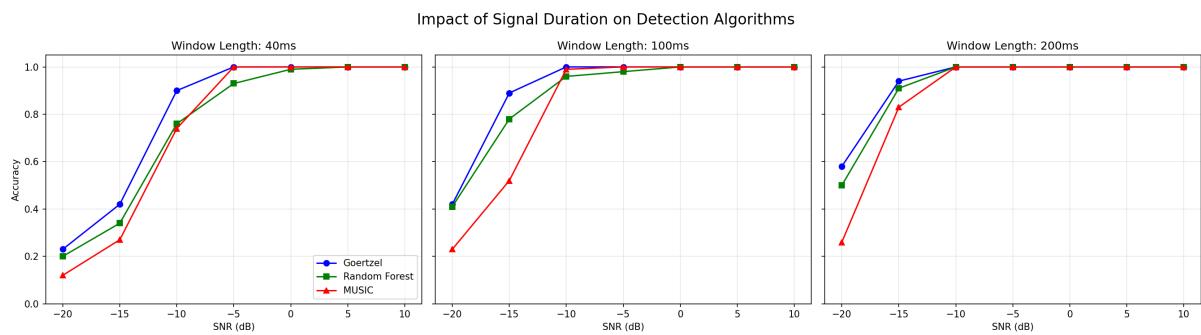


图 7: 不同信号窗口长度下各算法准确率对比

关键发现：

- **Goertzel (蓝色)**: 鲁棒性最强，且性能随窗口长度增加呈线性提升（相干累积增益）。

- **MUSIC (红色)**: 在短窗口 (40ms) 下表现优异，但在低 SNR 下抗噪性能不及 Goertzel。
- **随机森林 (绿色)**: 性能介于两者之间，证明机器学习特征提取仍受限于物理层的信号质量。

结论: 延长积分时间是提升低 SNR 性能的唯一物理途径。

4.4.2 实验二：自适应变积分时间检测 (Adaptive Variable Integration Time)

基于实验一的结论，提出了一种工程导向的自适应策略：不再执着于算法切换，而是进行 ** 时间切换 **。

- **High SNR ($>10\text{dB}$)**: 使用 40ms 超短窗口进行快速检测（极速响应）。
- **Low SNR ($<0\text{dB}$)**: 自动切换至长积分模式（最长 1s）以换取准确率。

SNR 估计机制: 为了准确感知环境噪声，系统采用了 ** 带内剩余与带外探针结合 ** 的估计算法：

1. **信号功率 (S)**: 取 8 个 DTMF 频点中能量最大的两个峰值之和。
2. **噪声功率 (N)**: 取以下两者最大值，以防止漏检：
 - **带内剩余噪声**: 其余 6 个非目标 DTMF 频点的平均能量。
 - **带外探测噪声**: 在 400Hz, 1000Hz, 1800Hz, 2500Hz 等非信号频点处的探测能量。

该机制能有效识别宽带白噪及特定频段干扰，确保自适应切换的准确性。

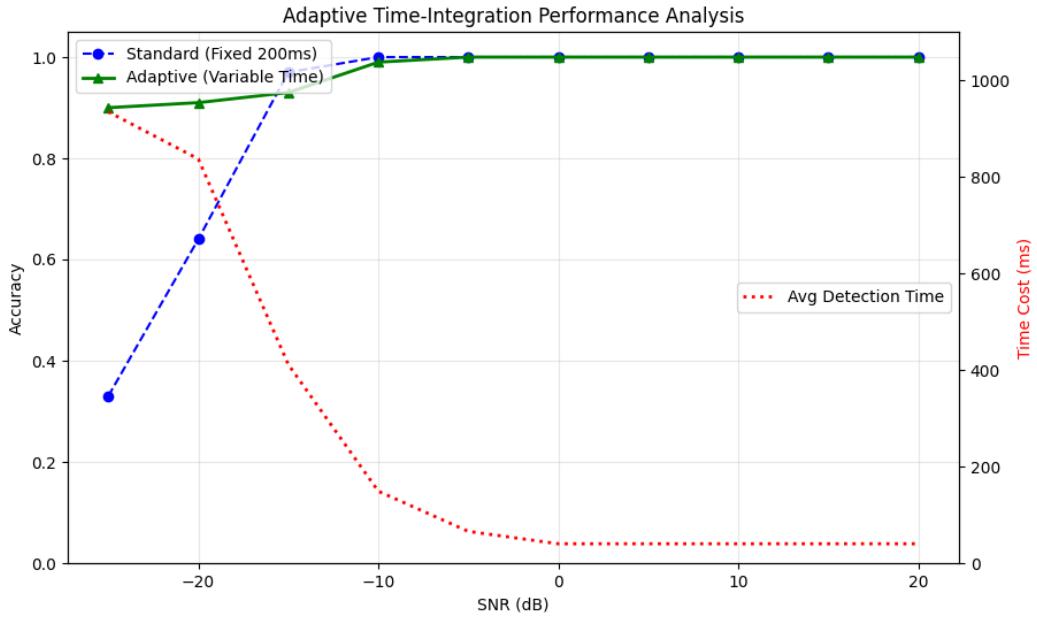


图 8: 自适应积分时间系统的性能分析: 准确率 (左轴) vs 耗时 (右轴)

表 2: 传统检测 vs 自适应检测性能对比

场景 (SNR)	传统 (200ms)	自适应准确率	自适应平均耗时
极端噪声 (-25dB)	33% (失效)	90%	934ms (自动延长)
低噪声 (-10dB)	100%	99%	149ms
高信噪比 (≥ 0 dB)	100%	100%	40ms (提速 5 倍)

结论: 该设计实现了真正的工程最优: 在恶劣环境下将可用范围扩展至 -25dB, 而在日常使用中响应速度比传统方法快 5 倍。

4.4.3 实验三: ESC-50 真实环境音频测试

为了验证算法在实际部署环境中的表现, 引入了 ESC-50 数据集 (包含 2000 条真实环境录音)。测试了四种算法在真实噪声下的表现:

1. Fixed-Goertzel (200ms)
2. Random Forest (200ms)
3. MUSIC (200ms)
4. **Adaptive (Variable Time)**

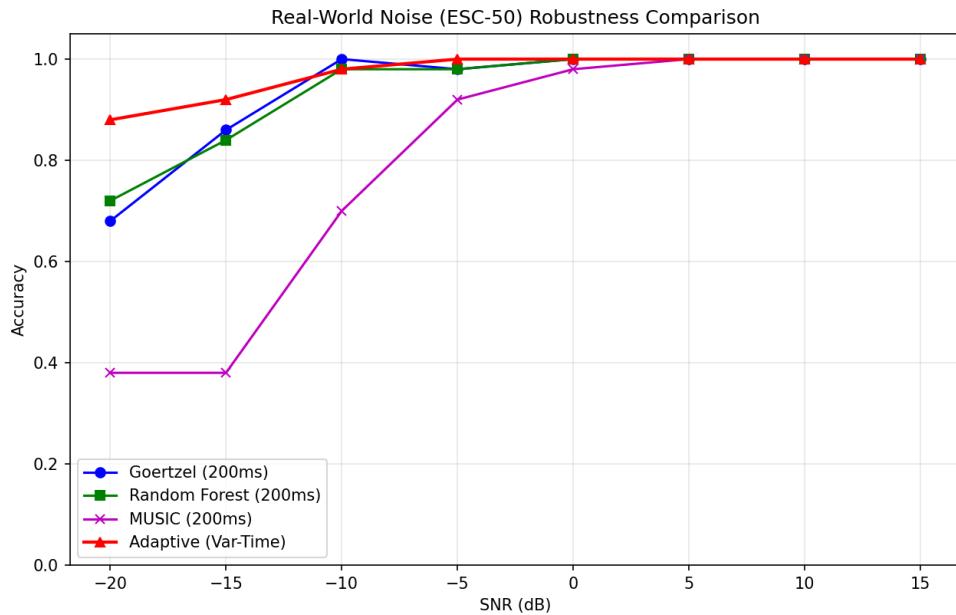


图 9: 真实环境噪声下的四算法对比

结论:

- **自适应算法 (红色)**: 得益于自动延长积分时间，在 -20dB 的极低信噪比下仍保持 **88%** 的高准确率，远超其他固定窗口算法。
- **Goertzel 与 RF**: 在 200ms 固定窗口下表现相近，抗噪能力受限。
- **MUSIC (紫色)**: 在真实非高斯噪声下表现最差，说明子空间方法对噪声统计特性较为敏感。

4.5 理论分析

Goertzel 算法本质上是一个**匹配滤波器**的高效实现。对于已知波形的检测问题，匹配滤波器在白噪声环境下具有最大的输出信噪比，是统计意义上的最优检测器。

信号时长 T 的增加带来的 SNR 增益为：

$$\Delta \text{SNR} = 10 \log_{10} \left(\frac{T_2}{T_1} \right) \text{ dB}$$

这解释了为什么延长信号时长能够显著提升极端低 SNR 下的检测性能。

4.6 研究结论

1. Goertzel 算法是 DTMF 检测的工程最优解，在常规条件下（200ms 信号， $\text{SNR} \geq -15\text{dB}$ ）准确率达 99% 以上。

2. **自适应系统的核心价值**在于动态调整积分时间：高 SNR 时使用 40ms 快速模式（响应速度提升 5 倍），低 SNR 时自动延长至 1000ms 以换取更高准确率。
3. **延长信号时长**是应对极端低 SNR 环境的有效策略，可将可工作范围扩展至 -25dB。
4. **ML 算法的局限性**：对比实验表明，在相同信号时长下，ML 方法（随机森林、MUSIC）并未显著超越 Goertzel；其性能提升受限于物理层的信号质量。

5 交互式实验演示系统实现

为了增强实验的可视化效果并验证自适应检测算法的有效性，本项目开发了一套基于 Spring Boot + JSP 的交互式 Web 演示系统。系统提供三种独立的工作模式，覆盖从理论验证到实际应用的完整流程。

5.1 系统架构

系统采用 B/S 架构，具有良好的扩展性与交互性：

1. **后端服务 (Java/Spring Boot)**: 负责信号合成、噪声注入以及核心识别逻辑。后端通过 RESTful API 接收前端参数，实时执行仿真并返回检测模式、SNR 估计及信号数据序列。
2. **前端界面 (HTML5/JavaScript/JSP)**: 采用现代化的响应式设计，利用 Chart.js 库实时绘制信道的时域波形图与归一化的 Goertzel 能量分布直方图，并使用 Web Audio API 播放加噪音频。
3. **算法集成**: 系统实现了完整的自适应检测策略，可根据前端传递的参数，在“固定 200ms 窗口”与“40ms-1s 自适应窗口”之间进行性能对比演示。

5.2 三种工作模式

5.2.1 实验模式 (Experiment Mode)

该模式用于算法性能验证和参数调优：

- **参数控制**: 可调 SNR (-20dB ~ +30dB)、噪声类型 (高斯/粉红/脉冲/均匀 + ESC-50 环境噪声)、频率偏移 (0% ~ 10%)
- **算法对比**: 一键对比标准 Goertzel 与自适应算法的识别结果
- **音频播放**: 支持分别播放纯净信号与加噪信号，直观感受噪声影响
- **可视化**: 实时显示时域波形与 8 频点能量分布图

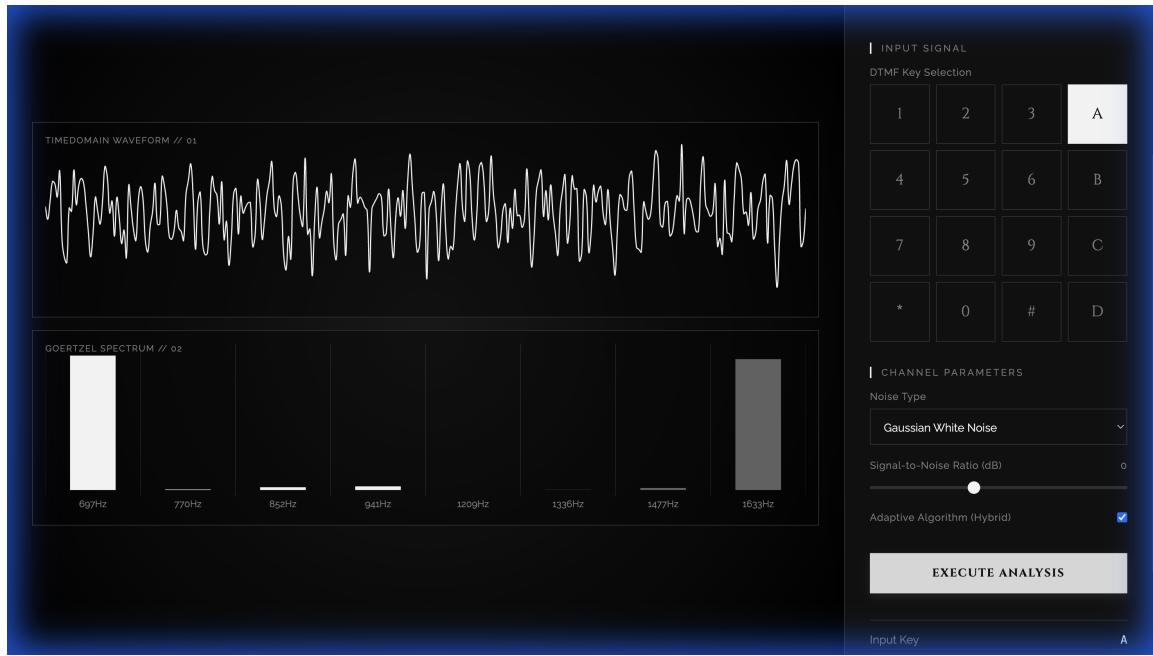


图 10: 实验模式界面：支持 SNR、噪声类型及频率偏移参数的实时调节与波形展示

5.2.2 电话模式 (Phone Mode)

该模式模拟真实电话拨号场景：

- **虚拟拨号盘:** 16 键 DTMF 键盘，支持 0-9、*、#、A-D
- **实时识别与音频:** 按键时生成加噪信号并播放，同步进行自适应 Goertzel 检测
- **会话录制:** 所有按键信号保存为 WAV 文件，供后续离线分析
- **统计面板:** 实时显示成功率、算法模式、估计 SNR

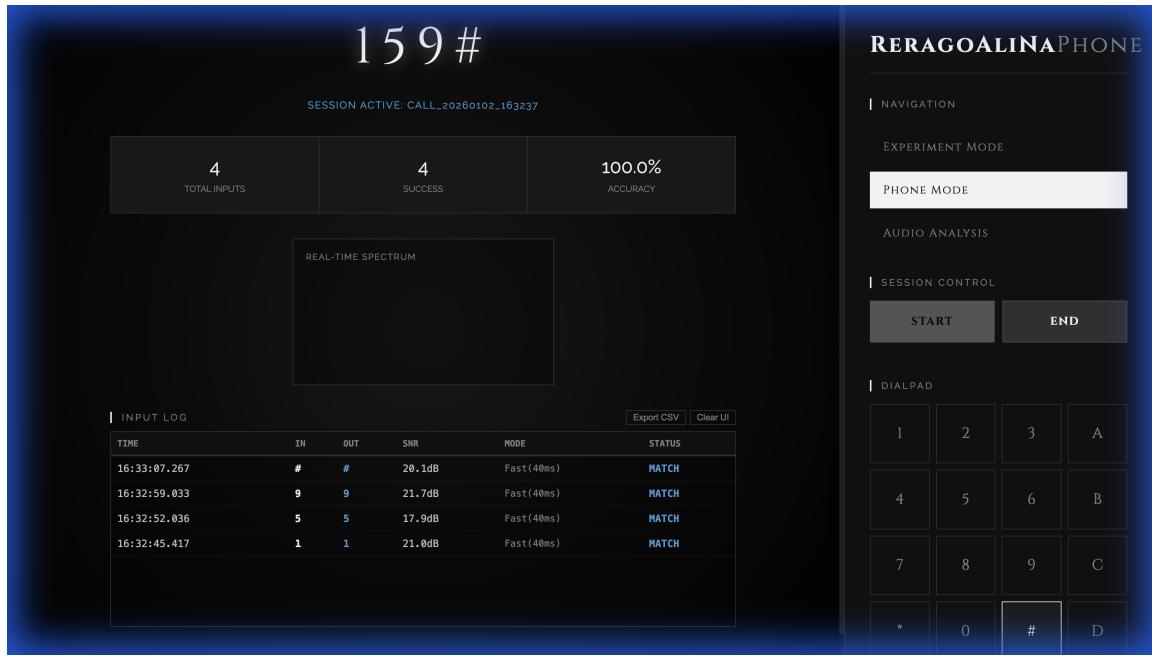


图 11: 电话模式界面：模拟真实拨号场景，实时生成音频并进行 Goertzel 识别

5.2.3 音频分析模式 (Audio Analysis)

该模式用于离线分析已录制的电话会话：

- 会话管理:** 列出所有录制会话，支持多选删除
- 批量分析:** 对选中会话的所有 WAV 文件进行 Deep 模式检测
- 结果展示:** 显示识别准确率、按键频次分布图、逐文件详细日志



图 12: 音频分析模式界面：展示批量处理结果，包含自适应检测详情与统计信息

5.3 关键技术实现

5.3.1 频率偏移模拟

为验证算法对频率漂移的鲁棒性，系统引入频率偏移参数。生成信号时对低频和高频分量分别施加 $\pm X\%$ 的随机偏移：

$$f'_L = f_L \times (1 + \delta_L), \quad f'_H = f_H \times (1 + \delta_H)$$

其中 $\delta \in [-X\%, +X\%]$ 为均匀分布随机数。实验表明，当偏移超过 3% 时识别开始出错，超过 6% 时几乎完全失效。

5.3.2 ESC-50 环境噪声

系统集成了 ESC-50 数据集中的 14 种真实环境噪声（雨声、风声、雷声、狗吠、汽车喇叭、引擎、直升机、火车、电锯、警报、键盘打字、吸尘器、时钟滴答、火焰噼啪），可验证算法在非高斯、非平稳噪声环境下的表现。

5.3.3 WAV 存储与分析一致性

由于 WAV 保存时信号被归一化，SNR 信息丢失。因此音频分析模式采用 Deep(Full) 模式，直接使用完整信号长度（1 秒 = 8000 样本）进行 Goertzel 检测，确保与实时检测一致的准确率。

5.4 项目文件组织结构

本项目包含 Python 仿真核心与 Java Web 演示系统。主要目录结构如下：

项目目录结构

```
/  
+-- src/ # Python 核心仿真算法库  
|   +-- core/ # 信号处理核心 (Goertzel, DSP)  
|   +-- ml/ # 智能检测模块 (自适应逻辑, ML)  
|   `-- experiments/ # 各类对比实验脚本  
+-- java-web/ # Spring Boot Web 交互系统  
|   +-- src/main/java/ # 后端业务逻辑与接口  
|   `-- src/main/webapp/ # 前端页面 (JSP, JS, CSS)  
+-- docs/ # 实验报告源码 (LaTeX)  
+-- audio/ # 生成的音频会话记录  
+-- datasets/ # ESC-50 环境噪声数据集  
+-- images/ # 实验结果图表  
`-- run.sh # 项目一键启动脚本
```

6 FPGA 硬件实现

本项目作为软硬件协同设计的尝试，在 Xilinx AX309 开发板 (Spartan-6 XC6SLX9) 上实现了基于 DDS (Direct Digital Synthesis) 技术的 DTMF 信号发生器。

6.1 硬件架构设计

FPGA 系统采用纯 VHDL 语言编写，采用模块化设计，主要包含以下核心模块：

1. **DDS 信号发生器 (dtmf_generator)**: 系统核心，包含两个并行的 32 位相位累加器。根据输入的按键索引，在查找表中分别读取行频 (f_L) 和列频 (f_H) 对应的正弦波样本，并进行线性叠加。查找表 (LUT) 深度为 256 点，位宽 16 位，存储了一个完整周期的正弦波形。
2. **PWM 音频驱动 (pwm_audio)**: 为了节省硬件成本，本设计不依赖外部 I2S 音频 DAC 芯片，而是采用 PWM (脉冲宽度调制) 技术。将 16 位有符号 PCM 信号映射为 10 位无符号占空比，并通过 50MHz 时钟驱动，产生约 48.8kHz ($\approx 50\text{MHz}/2^{10}$) 的 PWM 载波。该信号可直接驱动无源蜂鸣器或通过简单的 RC 低通滤波器还原为模拟音频。
3. **按键消抖 (key_debounce)**: 针对机械按键的抖动特性，设计了基于状态机的 20ms 延时消抖模块，确保按键触发的稳定性。

6.2 引脚分配与资源使用

根据 AX309 开发板原理图，关键外设引脚分配如下表所示：

表 3: FPGA 引脚分配表 (AX309)

信号名	FPGA 引脚	说明
sys_clk	T8	50MHz 系统时钟
rst_n	L3	复位按键 (Active Low)
key_in[0-3]	C3, D3, E4, E3	4 个用户机械按键
led_out[0-3]	P4, N5, P5, M6	4 个状态指示 LED
audio_pwm	J11	板载无源蜂鸣器

6.3 验证与综合

项目在 Xilinx ISE 14.7 环境下完成综合与实现。

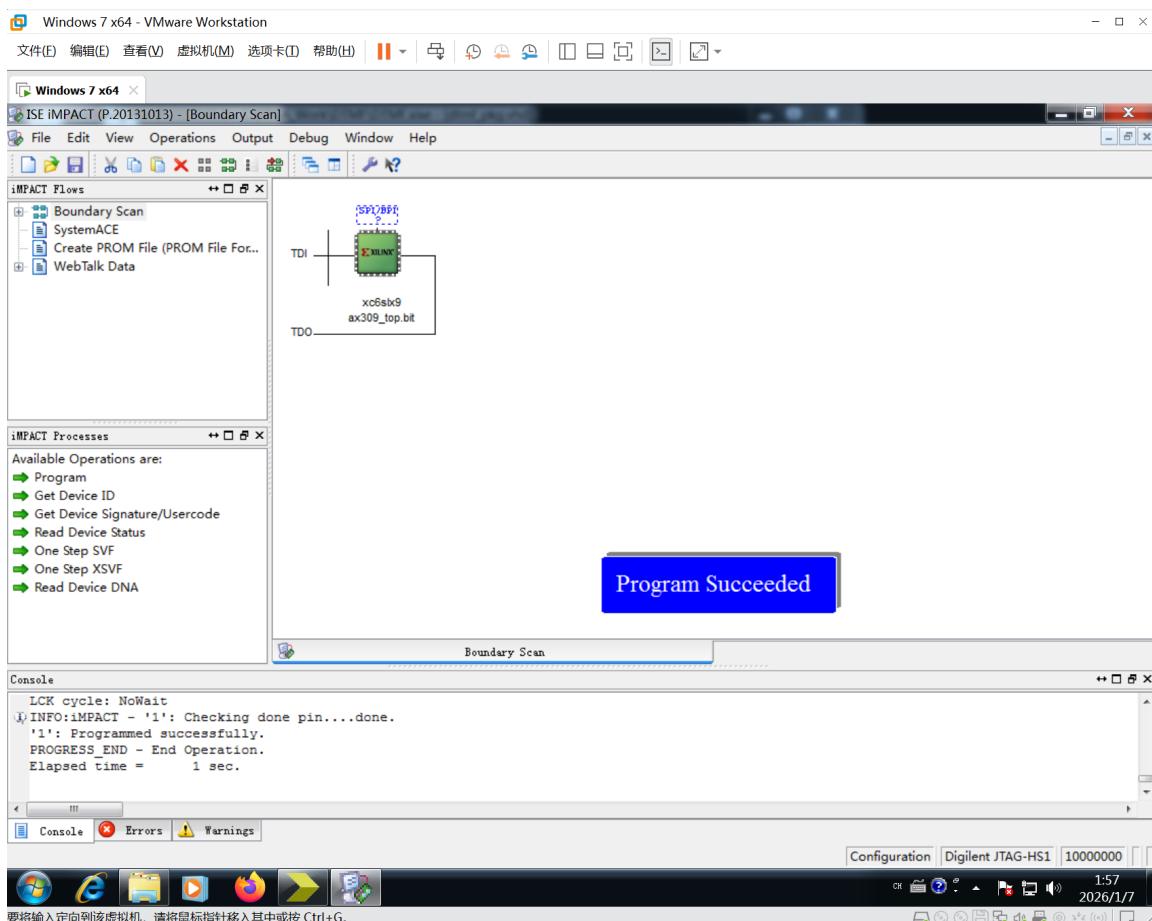


图 13: FPGA 硬件实现细节：综合电路图

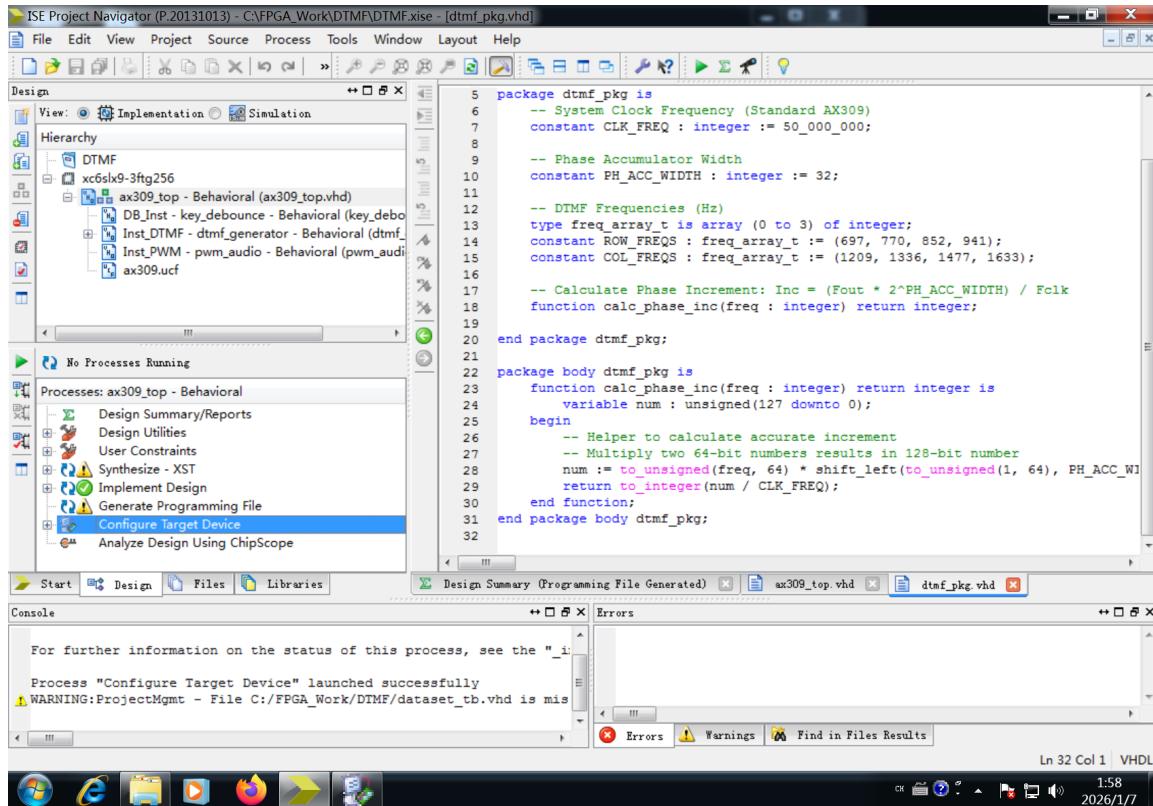


图 14: FPGA 硬件实现细节：仿真波形与资源占用

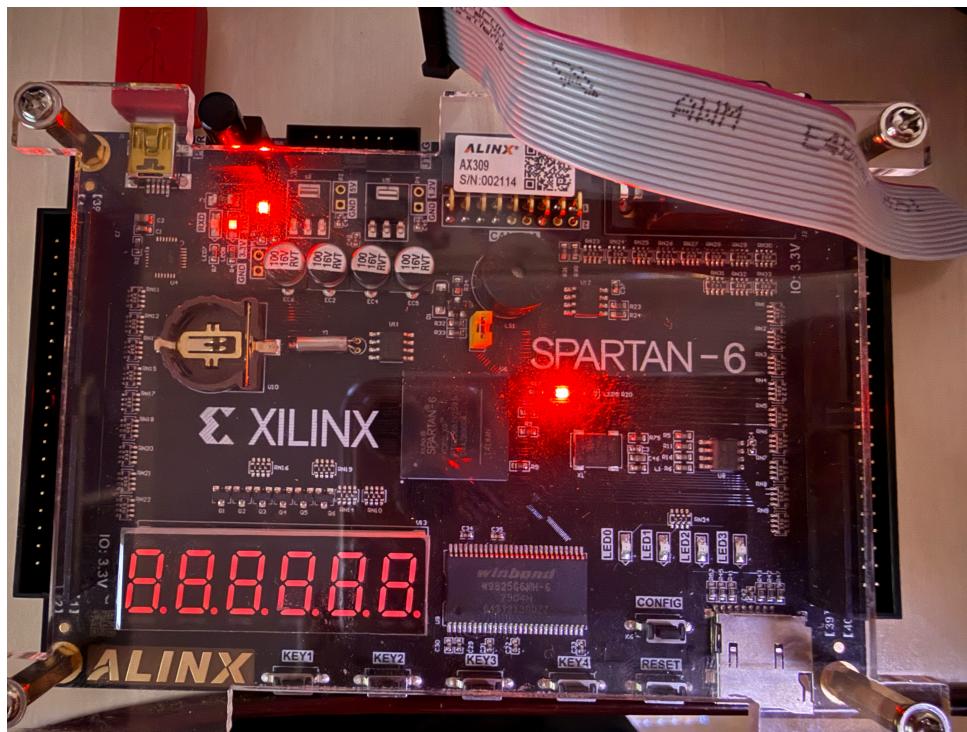


图 15: FPGA 开发板实物连接与测试环境

7 附录：项目源代码

由于篇幅限制，本文档仅列出核心算法的关键实现片段。完整项目（包含 Java Web 后端、前端资源、Python 仿真及 FPGA 工程）已开源。

开源仓库地址：<https://github.com/ReragoAliNa/DTMF>

7.1 Python 核心算法实现 (Goertzel)

Listing 1: src/core/dsp.py (部分截取)

```
1 import numpy as np
2 from scipy import signal as scipy_signal
3 from . import config
4
5 def bandpass_filter(sig, low_freq=600, high_freq=1600, order=4):
6     """
7         带通滤波预处理，保留 DTMF 频段 (600-1600Hz)
8     """
9     nyquist = config.fs / 2
10    low = low_freq / nyquist
11    high = high_freq / nyquist
12    b, a = scipy.signal.butter(order, [low, high], btype='band')
13    filtered = scipy.signal.filtfilt(b, a, sig)
14    return filtered
15
16 def generate_dtmf(key, snr_db=None, duration=None):
17     """
18         生成 DTMF 信号
19         :param key: 按键字符
20         :param snr_db: 信噪比 (dB)，若为 None 则不加噪
21         :param duration: 信号时长 (s)，若为 None 则使用 config 默认值
22         :return: 信号数组
23     """
24     if duration is None:
25         duration = config.duration
26
27     fL, fH = config.freq_map[key]
28     t = np.linspace(0, duration, int(config.fs * duration), endpoint=False)
29     signal = np.sin(2 * np.pi * fL * t) + np.sin(2 * np.pi * fH * t)
30
31     if snr_db is not None:
32         signal_power = np.mean(signal**2)
33         snr_linear = 10***(snr_db / 10)
```

```

34     noise_power = signal_power / snr_linear
35     noise = np.random.normal(0, np.sqrt(noise_power), len(signal))
36     signal = signal + noise
37
38     return signal
39
40 def goertzel(signal, target_freq):
41     """
42     Goertzel 算法计算特定频率能量
43     """
44     N = len(signal)
45     if N == 0: return 0

```

7.2 FPGA 信号发生器逻辑 (VHDL)

Listing 2: fpga/dtmf_generator.vhd (核心逻辑)

```

1
2      -- Frequency Selection Logic
3      process(key_idx)
4      begin
5          -- Standard DTMF Keypad Mapping
6          -- 1(0,0) 2(0,1) 3(0,2) A(0,3)
7          -- 4(1,0) 5(1,1) 6(1,2) B(1,3)
8          -- 7(2,0) 8(2,1) 9(2,2) C(2,3)
9          -- *(3,0) 0(3,1) #(3,2) D(3,3)
10         -- Mapping key_idx 0..15 to Row/Col indices
11         case key_idx is
12             when 1 =>    -- '1'
13                 inc_row <= calc_phase_inc(ROW_FREQS(0)); inc_col <=
14                 calc_phase_inc(COL_FREQS(0));
15             when 2 =>    -- '2'
16                 inc_row <= calc_phase_inc(ROW_FREQS(0)); inc_col <=
17                 calc_phase_inc(COL_FREQS(1));
18             when 3 =>    -- '3'
19                 inc_row <= calc_phase_inc(ROW_FREQS(0)); inc_col <=
20                 calc_phase_inc(COL_FREQS(2));
21             when 10 =>   -- 'A' (using index 10 for A)
22                 inc_row <= calc_phase_inc(ROW_FREQS(0)); inc_col <=

```

```
    calc_phase_inc(COL_FREQS(0));
23      when 5 => -- '5'
24        inc_row <= calc_phase_inc(ROW_FREQS(1)); inc_col <=
25          calc_phase_inc(COL_FREQS(1));
26        when 6 => -- '6'
27          inc_row <= calc_phase_inc(ROW_FREQS(1)); inc_col <=
28            calc_phase_inc(COL_FREQS(2));
29        when 11 => -- 'B'
30          inc_row <= calc_phase_inc(ROW_FREQS(1)); inc_col <=
31            calc_phase_inc(COL_FREQS(3));
32
33        when 7 => -- '7'
34          inc_row <= calc_phase_inc(ROW_FREQS(2)); inc_col <=
35            calc_phase_inc(COL_FREQS(0));
36        when 8 => -- '8'
37          inc_row <= calc_phase_inc(ROW_FREQS(2)); inc_col <=
38            calc_phase_inc(COL_FREQS(1));
39        when 9 => -- '9'
40          inc_row <= calc_phase_inc(ROW_FREQS(2)); inc_col <=
41            calc_phase_inc(COL_FREQS(2));
42        when 12 => -- 'C'
43          inc_row <= calc_phase_inc(ROW_FREQS(2)); inc_col <=
44            calc_phase_inc(COL_FREQS(3));
45
46        when 14 => -- '*' (using 14)
47          inc_row <= calc_phase_inc(ROW_FREQS(3)); inc_col <=
48            calc_phase_inc(COL_FREQS(0));
49        when 0 => -- '0'
50          inc_row <= calc_phase_inc(ROW_FREQS(3)); inc_col <=
51            calc_phase_inc(COL_FREQS(1));
52        when 15 => -- '#' (using 15)
53          inc_row <= calc_phase_inc(ROW_FREQS(3)); inc_col <=
54            calc_phase_inc(COL_FREQS(2));
55        when 13 => -- 'D'
56          inc_row <= calc_phase_inc(ROW_FREQS(3)); inc_col <=
57            calc_phase_inc(COL_FREQS(3));
58
59        when others =>
60          inc_row <= 0; inc_col <= 0;
61      end case;
62    end process;
63
64    -- Phase Accumulation
65    process(clk, rst_n)
66    begin
```

```
56      if rst_n = '0' then
57          phase_acc_row <= (others => '0');
58          phase_acc_col <= (others => '0');
59      elsif rising_edge(clk) then
60          if key_valid = '1' then
61              phase_acc_row <= phase_acc_row + to_unsigned(inc_row,
62                  PH_ACC_WIDTH);
63              phase_acc_col <= phase_acc_col + to_unsigned(inc_col,
64                  PH_ACC_WIDTH);
65          else
66              phase_acc_row <= (others => '0');
67              phase_acc_col <= (others => '0');
68          end if;
69      end if;
70  end process;
```

8 参考文献

参考文献

- [1] ITU-T Recommendation Q.23. (1988). *Technical features of push-button telephone sets*. International Telecommunication Union.
- [2] ITU-T Recommendation Q.24. (1988). *Multifrequency push-button signal reception*. International Telecommunication Union.
- [3] Goertzel, G. (1958). An Algorithm for the Evaluation of Finite Trigonometric Series. *American Mathematical Monthly*, 65(1), 34-35.
- [4] Oppenheim, A. V., & Schafer, R. W. (2010). *Discrete-Time Signal Processing* (3rd ed.). Pearson.
- [5] Proakis, J. G., & Manolakis, D. G. (2006). *Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications* (4th ed.). Prentice Hall.