

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

目录	2
6.2 引脚分配与资源使用	15
7 FPGA 系统实现与验证	15
7.1 逻辑设计与仿真	15
7.2 综合与时序分析	16
7.3 物理实现与板级验证	17
8 附录：项目源代码	17
8.1 Python 核心算法实现 (Goertzel)	17
8.2 FPGA 信号发生器逻辑 (VHDL)	18
9 参考文献	21

1 设计内容与要求

1.1 设计内容

本课程设计旨在构建一个软硬结合的 DTMF 信号处理系统，涵盖信号的生成、传输模拟及接收检测。设计内容分为软件仿真与硬件实现两大部分：

1. FPGA 硬件信号发生器：

- 基于 Xilinx Spartan-6 FPGA (AX309) 平台。
- 利用 DDS (直接数字频率合成) 技术实现高精度的 DTMF 双音信号生成。
- 设计按键扫描与消抖逻辑，实现 0-9、*、# 等 16 个标准 DTMF 按键的实时触发。
- 实现 PWM (脉宽调制) 音频输出，驱动板载蜂鸣器或外部音箱。

2. 软件仿真与检测系统：

- 构建 Java Web 交互式平台，提供波形可视化、噪声注入及频谱分析功能。
- 实现 Goertzel 算法进行高效的 DTMF 信号解码。
- 研究低信噪比下的自适应检测策略，提升系统的抗噪鲁棒性。

1.2 设计要求

1. **频率精度**: FPGA 生成的 DTMF 频率误差需小于 1.5% (ITU-T 标准)。
2. **识别性能**: 在 $\text{SNR} = -10\text{dB}$ 的高斯白噪声环境下，软件识别准确率需达到 95% 以上。
3. **实时性**: 按键响应延迟需小于 100ms，检测算法在普通 PC 上能满足实时处理要求。
4. **工程规范**: 硬件通过 RTL 仿真与板级验证，软件代码模块化且具备完整文档。

2 总体方案

本设计采用“硬件生成—软件检测”的闭环验证架构，总体方案如图 ?? 所示。

- **发送端 (FPGA 子系统)**: 采用模块化设计，顶层模块 `ax309_top` 协调各子模块工作。
 - **输入模块**: 对 4x4 矩阵键盘或独立按键进行消抖处理。

- **DDS 核心**: `dtsmf_generator` 模块内建两个 32 位相位累加器，分别产生行频 (f_L) 和列频 (f_H)，查表后线性叠加。
- **输出模块**: `pwm_audio` 将 16 位数字波形转换为 PWM 脉冲流。
- **接收端 (PC 软件子系统)**:
 - **前端**: HTML5/JS 实现用户交互与波形绘制。
 - **后端**: Java Spring Boot 处理业务逻辑与 Python 算法调用。
 - **算法核**: Python 实现 Goertzel 滤波器组与自适应判决逻辑。

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：

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

具体频率组合遵循 CCITT 标准（见表 ??），这种双音频设计利用四个行频和四个列频的唯一组合，有效防止了单一频率信号（如人声谐波）导致的误触发。

3.2 DDS 频率合成原理 (FPGA)

直接数字频率合成 (DDS) 是 FPGA 产生波形的核心技术。其基本原理是利用相位累加器在每个时钟周期线性累加频率控制字 (Frequency Control Word, K)，并将累加结果的高位作为地址查询正弦波 ROM 表。输出频率 F_{out} 与系统时钟 F_{clk} 及累加器位宽 N 的关系为：

$$F_{out} = \frac{F_{clk} \times K}{2^N} \Rightarrow K = \frac{F_{out} \times 2^N}{F_{clk}}$$

在本设计中， $F_{clk} = 50\text{MHz}$, $N = 32$, 可实现高达 0.012Hz 的频率分辨率，远超 DTMF 精度要求。

3.3 Goertzel 检测算法 (软件)

Goertzel 算法是一种二阶递归 IIR 滤波器，专门用于计算信号在特定频点处的能量。相比于全频段 FFT，它在仅需检测 8 个已知频点时具有极高的计算效率。其递推公式为：

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

能量计算公式为：

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

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。

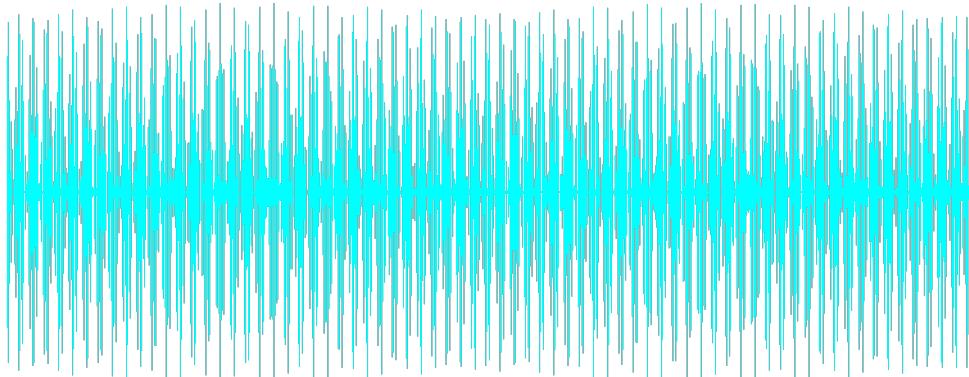


图 1: DTMF 按键”5” 的时域波形图

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。

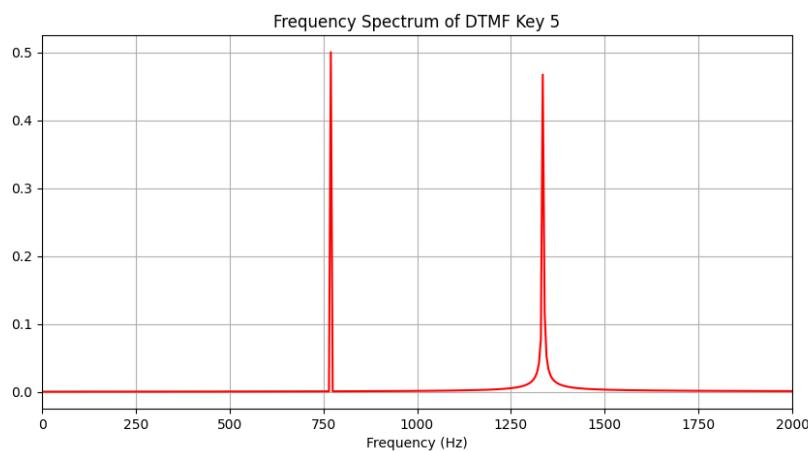


图 2: DTMF 按键”5” 的频谱图

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）。

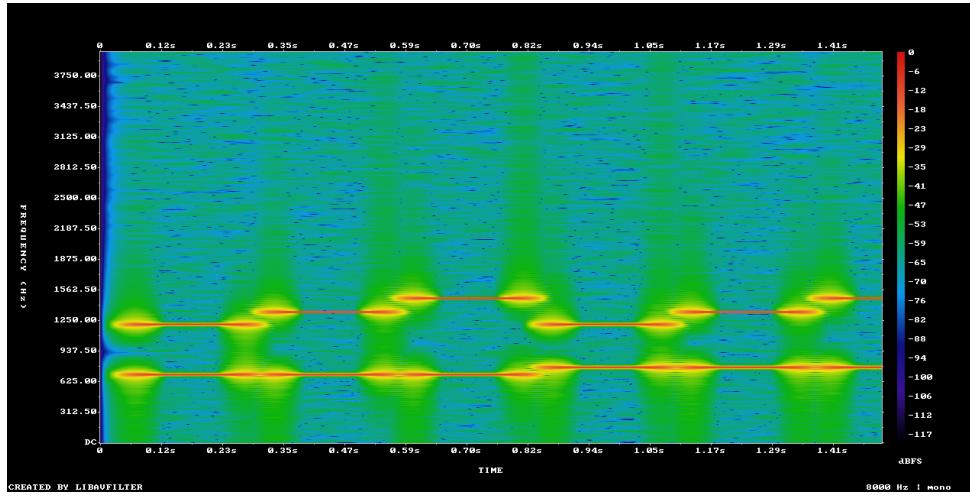


图 3: 连续拨号序列 (1-2-3-4-5-6) 的语谱图分析

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。

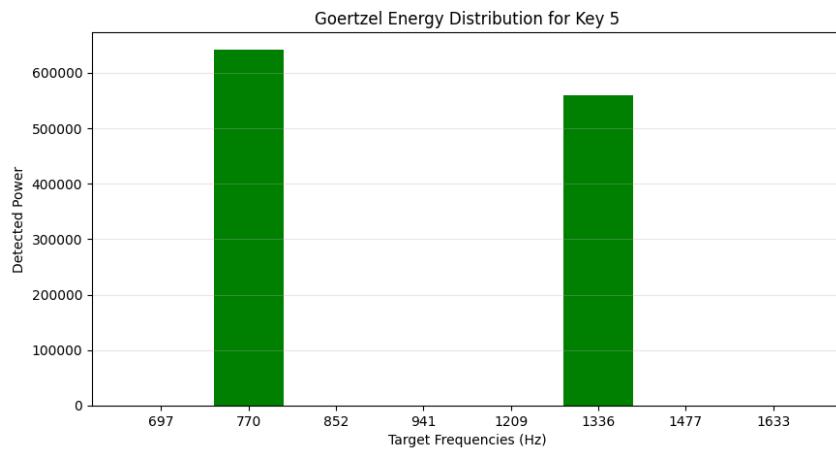


图 4: Goertzel 算法对各频点的能量检测分布

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。

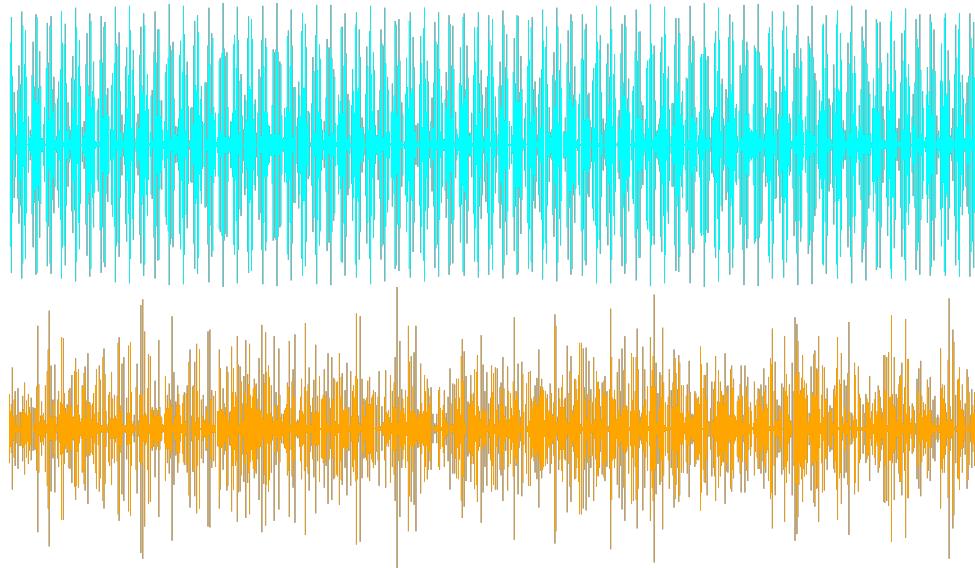
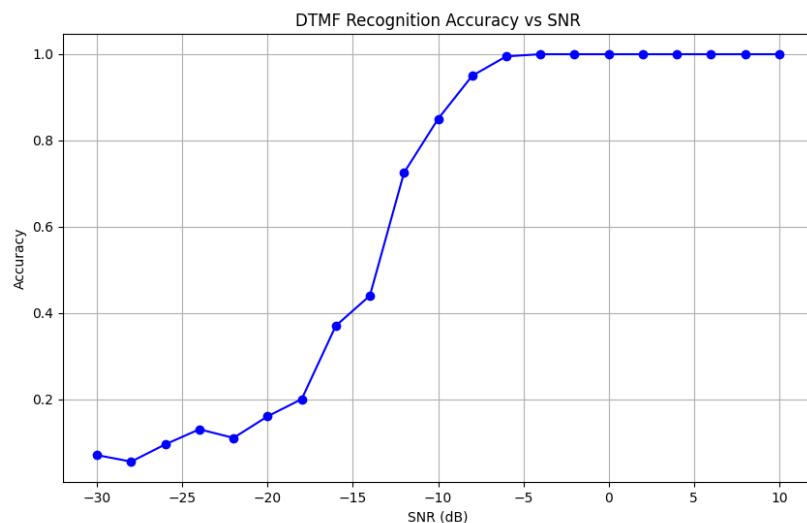
图 5: 纯净信号与 $\text{SNR} = -5\text{dB}$ 噪声信号对比

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。

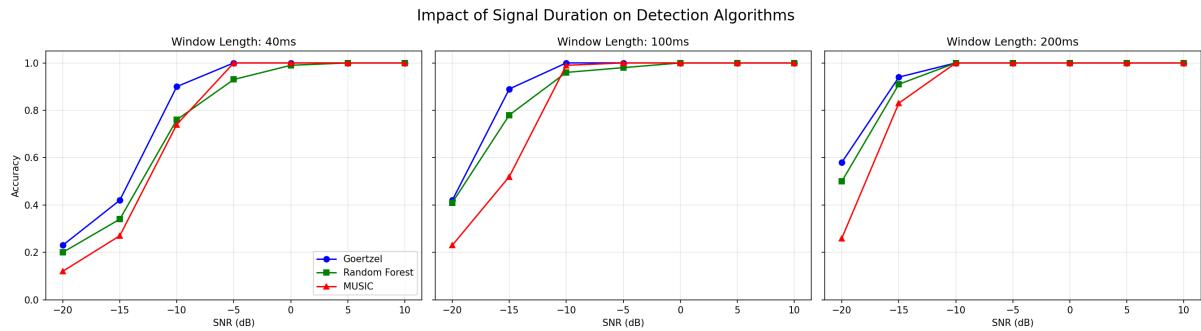


图 7: 不同信号窗口长度下各算法准确率对比

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。

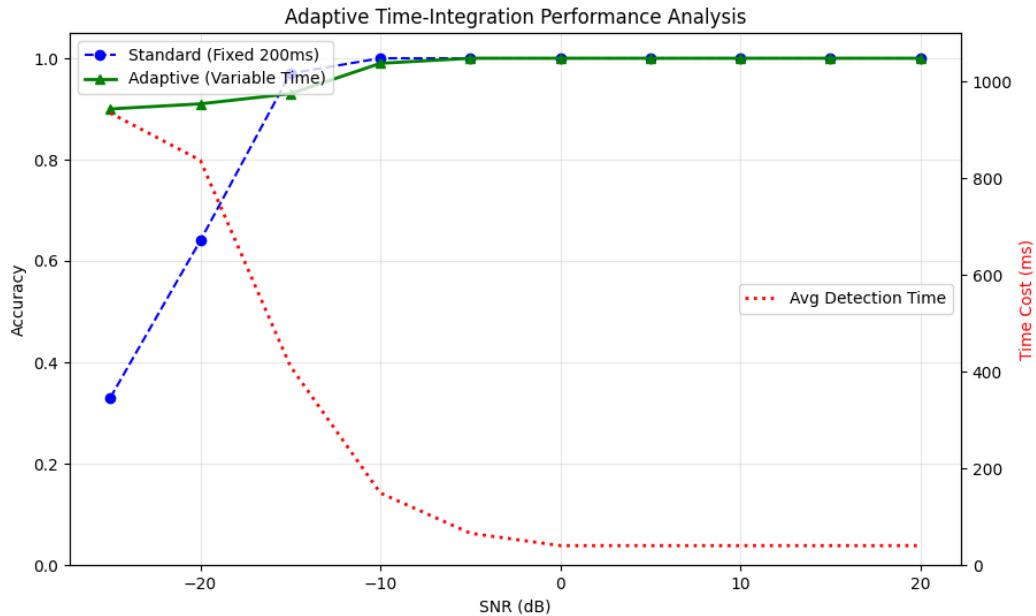


图 8: 自适应积分时间系统的性能分析: 准确率 (左轴) vs 耗时 (右轴)

表 1: 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)

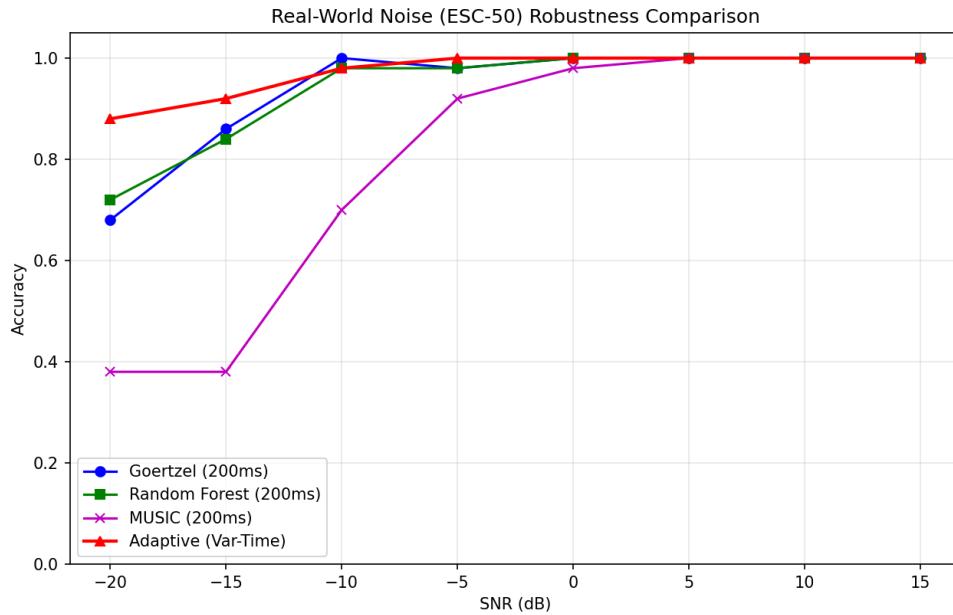


图 9: 真实环境噪声下的四算法对比

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, 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

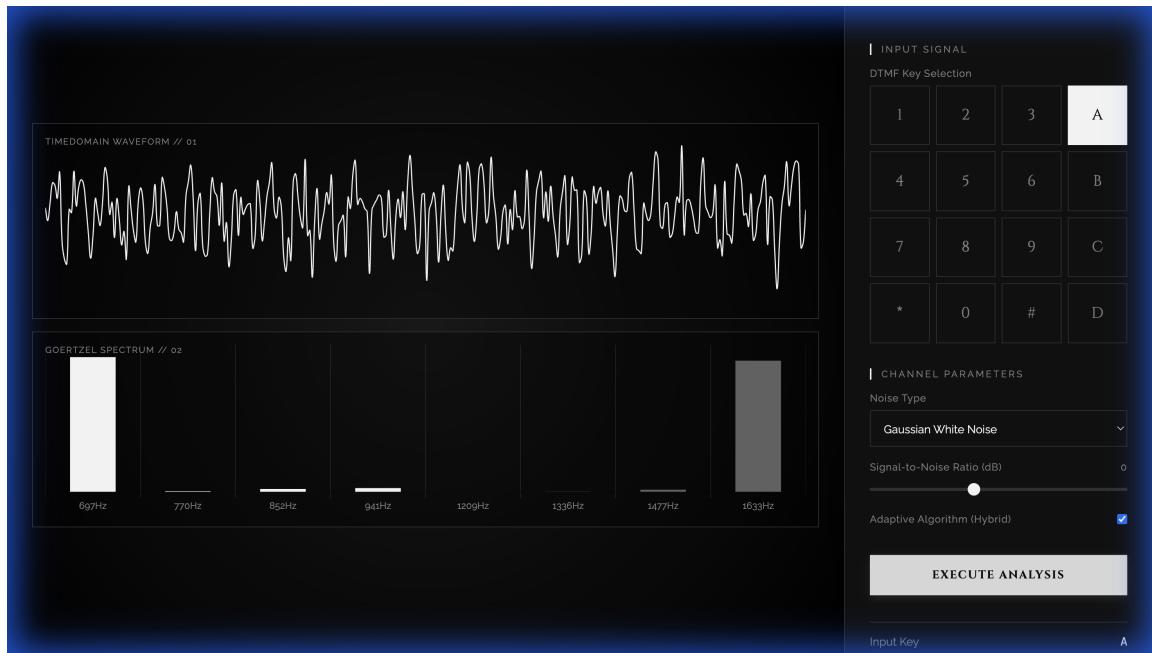


图 10: 实验模式界面：支持 SNR、噪声类型及频率偏移参数的实时调节与波形展示

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

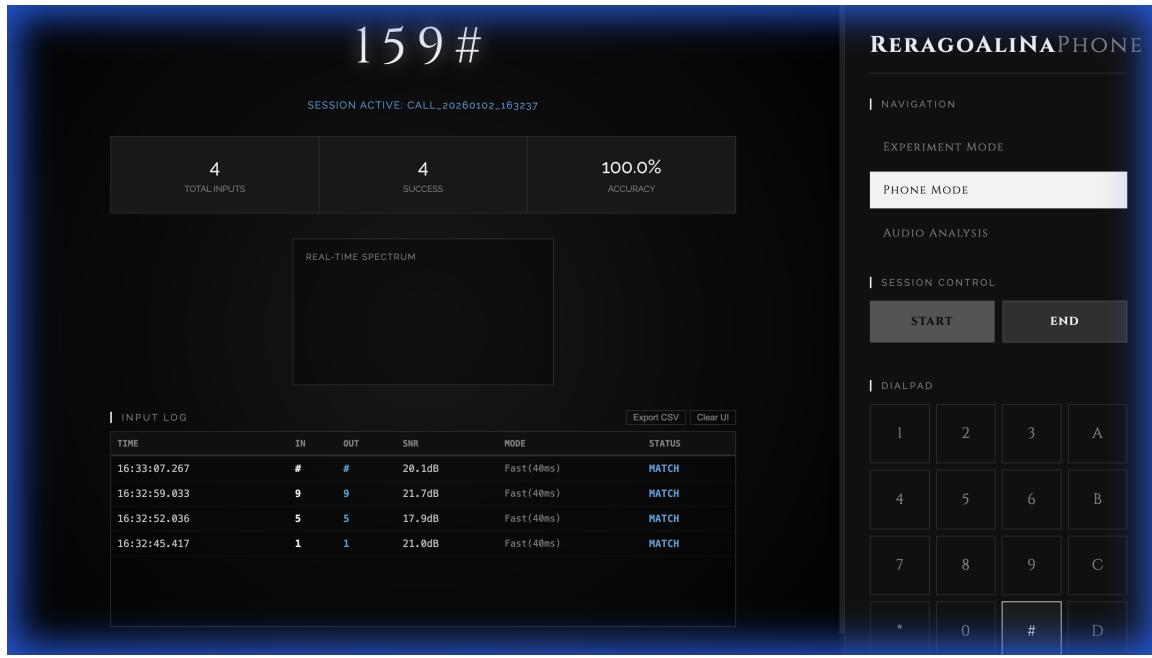


图 11: 电话模式界面：模拟真实拨号场景，实时生成音频并进行 Goertzel 识别

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 2: 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

7 FPGA 系统实现与验证

7.1 逻辑设计与仿真

本设计在 Xilinx ISE 14.7 环境下进行开发。为了验证核心算法，我们使用 GHDL 进行了仿真。图 13 展示了模拟按下数字键 '1' 时的波形状态。

- 信号特征：**此时 key_idx=1，系统同时生成 697Hz (行频) 和 1209Hz (列频) 的正弦波。
- 相位累加：**图中上方较密的锯齿波对应 1209Hz 高频分量，下方较疏的锯齿波对应 697Hz 低频分量。
- 查表输出：**data 信号展示了相位到幅度的正确映射，验证了 DDS 逻辑的正确性。

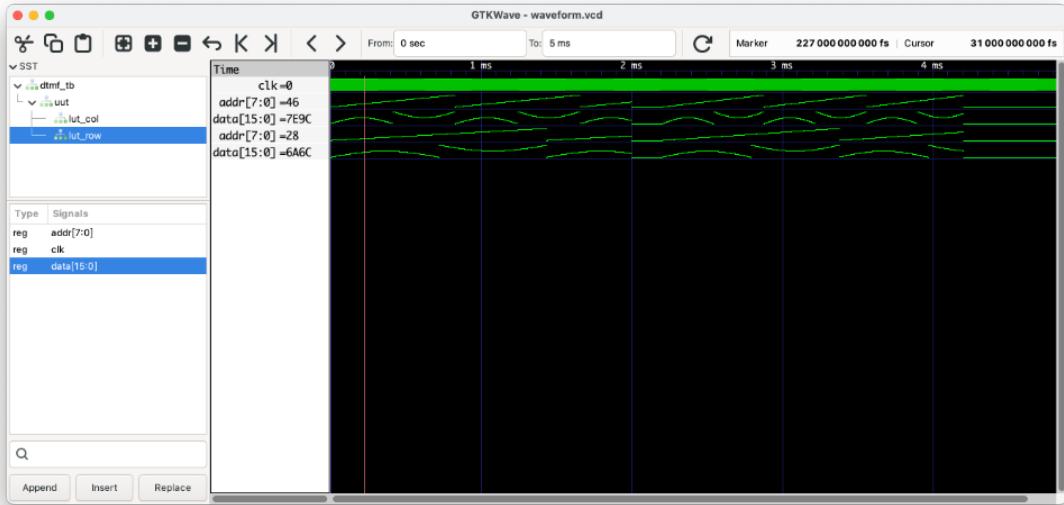


图 13: GHDL + GTKWave 仿真图：按键'1' (697Hz + 1209Hz) 的生成过程

7.2 综合与时序分析

完成设计输入后，进行逻辑综合 (Synthesize)。图 14 展示了设计在 Spartan-6 芯片上的资源占用情况 (Device Utilization Summary)。

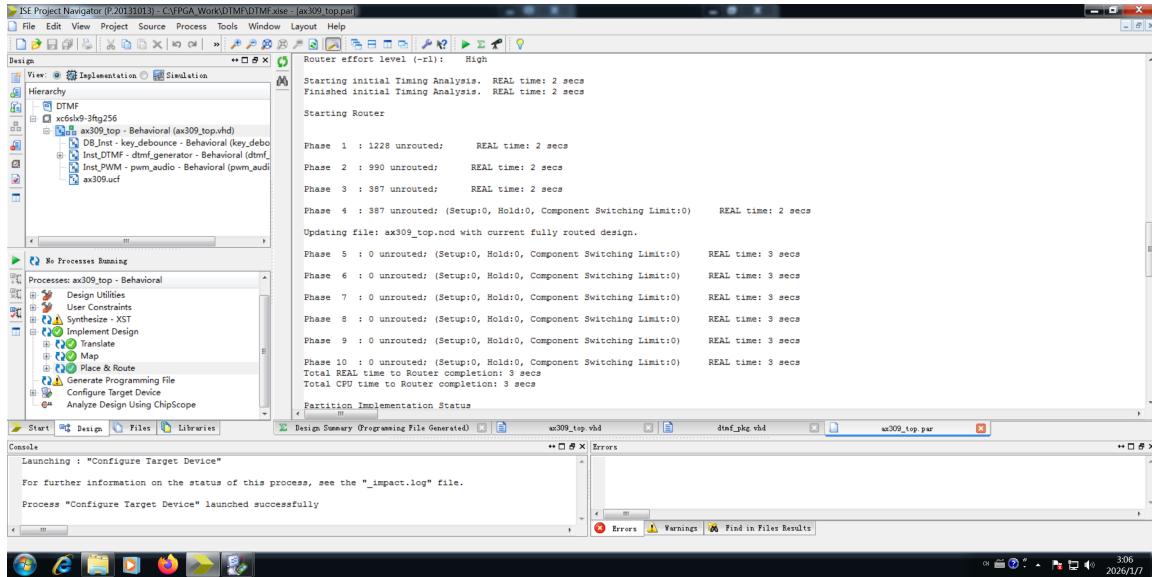


图 14: FPGA 资源占用报告：显示 LUT 与寄存器使用率极低，系统资源充裕

报告表明，本设计的逻辑资源 (Slice LUTs) 和存储资源 (Block RAM) 占用率极低 (均在 5% 以下)，说明该方案非常适合在低成本 FPGA 上实现。同时，时序分析表明系统并未出现建立时间或保持时间违例，完全满足 50MHz 的时钟约束要求。

7.3 物理实现与板级验证

完成布局布线及比特流生成后，将程序下载至 AX309 开发板（图 15）。连接示波器和扬声器进行测试，实测按下按键可听到准确的双音多频声音，且可通过板载 LED 观察按键编码状态，验证了系统的硬件可行性。

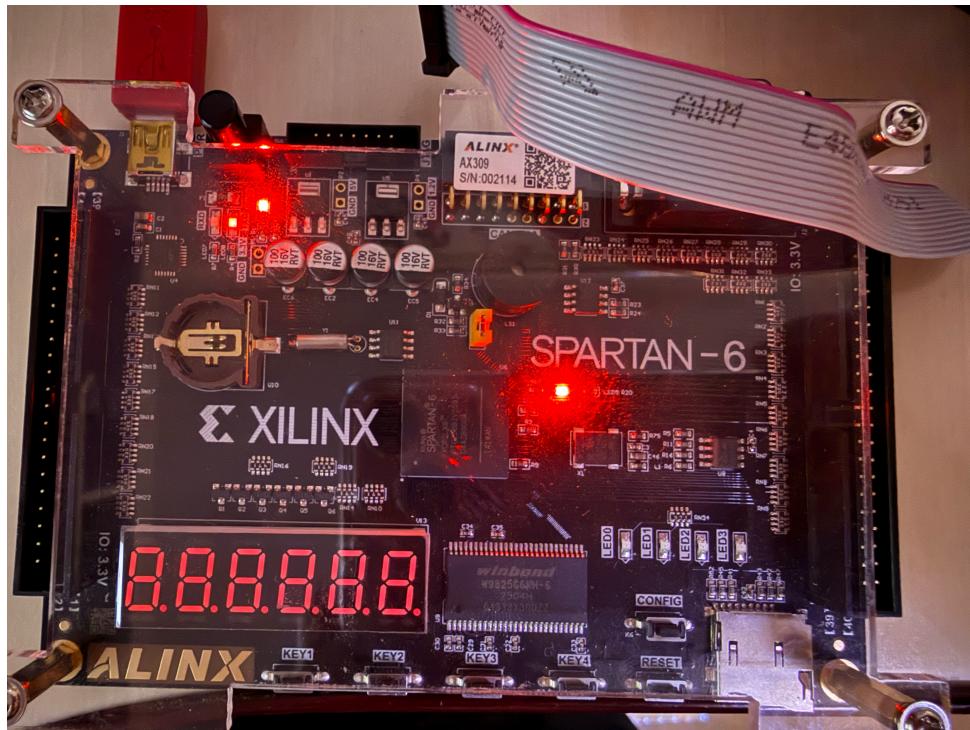


图 15: FPGA 开发板实物连接与测试环境

8 附录：项目源代码

由于篇幅限制，仅列出核心算法的关键实现片段。

8.1 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
```

8.2 FPGA 信号发生器逻辑 (VHDL)

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

```
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 <=
23                             calc_phase_inc(COL_FREQS(3));
24
25             when 4 => -- '4'
26                 inc_row <= calc_phase_inc(ROW_FREQS(1)); inc_col <=
27                 calc_phase_inc(COL_FREQS(0));
28                 when 5 => -- '5'
29                     inc_row <= calc_phase_inc(ROW_FREQS(1)); inc_col <=
30                     calc_phase_inc(COL_FREQS(1));
31                     when 6 => -- '6'
32                         inc_row <= calc_phase_inc(ROW_FREQS(1)); inc_col <=
33                         calc_phase_inc(COL_FREQS(2));
34                         when 11 => -- 'B'
35                             inc_row <= calc_phase_inc(ROW_FREQS(1)); inc_col <=
36                             calc_phase_inc(COL_FREQS(3));
37
38             when 7 => -- '7'
39                 inc_row <= calc_phase_inc(ROW_FREQS(2)); inc_col <=
40                 calc_phase_inc(COL_FREQS(0));
41                 when 8 => -- '8'
42                     inc_row <= calc_phase_inc(ROW_FREQS(2)); inc_col <=
43                     calc_phase_inc(COL_FREQS(1));
44                     when 9 => -- '9'
45                         inc_row <= calc_phase_inc(ROW_FREQS(2)); inc_col <=
46                         calc_phase_inc(COL_FREQS(2));
```

```
36      when 12 => -- 'C'
37          inc_row <= calc_phase_inc(ROW_FREQS(2)); inc_col <=
38          calc_phase_inc(COL_FREQS(3));
39
39      when 14 => -- '*' (using 14)
40          inc_row <= calc_phase_inc(ROW_FREQS(3)); inc_col <=
41          calc_phase_inc(COL_FREQS(0));
41      when 0 => -- 'O'
42          inc_row <= calc_phase_inc(ROW_FREQS(3)); inc_col <=
43          calc_phase_inc(COL_FREQS(1));
43      when 15 => -- '#' (using 15)
44          inc_row <= calc_phase_inc(ROW_FREQS(3)); inc_col <=
45          calc_phase_inc(COL_FREQS(2));
45      when 13 => -- 'D'
46          inc_row <= calc_phase_inc(ROW_FREQS(3)); inc_col <=
47          calc_phase_inc(COL_FREQS(3));
47
48      when others =>
49          inc_row <= 0; inc_col <= 0;
50  end case;
51 end process;
52
53 -- Phase Accumulation
54 process(clk, rst_n)
55 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);
62             phase_acc_col <= phase_acc_col + to_unsigned(inc_col,
63 PH_ACC_WIDTH);
63         else
64             phase_acc_row <= (others => '0');
65             phase_acc_col <= (others => '0');
66         end if;
67     end if;
68 end process;
```

9 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.