

THD 分析仪 (谐波失真分析系统)

项目介绍

这是一个基于 MSP 微控制器的谐波分析系统，可以对输入的模拟信号进行采样、FFT 分析，计算总谐波失真(THD)，并自动识别波形类型。系统支持两种工作模式：触发模式和自动模式，并通过 UART 接口进行控制和数据传输。

主要功能：

- 实时采集模拟信号并进行 FFT 分析
- 计算信号的总谐波失真(THD)及各次谐波幅度
- 自动识别波形类型(正弦波、方波、三角波、锯齿波等)
- 通过 UART 接口接收指令和发送分析结果
- 支持触发和自动两种采样模式

UART 通信协议

命令包格式

每个命令包固定为 8 字节，格式如下：

字节 0	字节 1	字节 2	字节 3	字节 4	字节 5	字节 6	字节 7
包头	命令码	数据 0	数据 1	数据 2	数据 3	数据 4	包尾
0xAA	CMD	DATA	DATA	DATA	DATA	DATA	0x55

- 包头：固定为0xAA
- 命令码：具体命令的编码
- 数据字节：根据命令不同，可能包含不同的数据
- 包尾：固定为0x55

响应包格式

每个响应包固定为 8 字节，格式如下：

字节 0	字节 1	字节 2	字节 3	字节 4	字节 5	字节 6	字节 7
包头	命令码	状态码	数据 0	数据 1	数据 2	数据 3	包尾
0xAA	CMD	STATUS	DATA	DATA	DATA	DATA	0x55

- 包头：固定为0xAA
- 命令码：回显收到的命令码
- 状态码：表示命令执行结果
- 数据字节：返回的数据，32 位整数，低字节在前
- 包尾：固定为0x55

分析结果数据包格式

分析结果数据包由三部分组成：包头、数据内容和包尾。

包头格式(8 字节)：

```
0xAA 0x55 0xA5 0x5A 0xAA [样本大小低字节] [样本大小高字节] [谐波数量]
```

包尾格式(5 字节)：

```
0xBB 0x66 0xB6 0x6B 0xBB
```

数据内容包括：

- 1. ADC 原始采样数据($SAMPLE_SIZE * 2$ 字节)
- 2. THD 值(4 字节浮点数)
- 3. 归一化谐波幅度(每个谐波 4 字节浮点数 * $NUM_HARMONICS$)
- 4. 谐波索引(每个谐波 4 字节整数 * $NUM_HARMONICS$)
- 5. 基波频率(4 字节整数)
- 6. 波形类型(1 字节)
- 7. 直流偏移标志(1 字节布尔值)

分析结果结构体详解

系统内部使用的**AnalysisResult**结构体包含了信号分析的全部结果，详细如下：

字段名	类型	大小(字节)	说明
thd	float	4	总谐波失真，以百分比表示，数值范围一般为 0-100%。表示非基频谐波功率与基波功率的比值。值越小表示信号越纯净。
normalized_harmonics_amplitudes	float[]	4 × NUM_HARMONICS	归一化后的各次谐波幅度值数组。索引 0 存储基波(归一化为 1.0)，索引 1 存储二次谐波相对于基波的幅度比，索引 2 存储三次谐波的幅度比，依此类推。通过这些值可以分析信号的谐波组成。

字段名	类型	大小(字节)	说明
harmonic_indices	uint32_t[]	4 × NUM_HARMONICS	各次谐波在 FFT 频谱中的索引位置。索引 0 存储基波在 FFT 结果中的位置，索引 1 存储二次谐波的位置，依此类推。这些索引可用于在 FFT 结果中准确定位每个谐波。
fundamental_freq	uint32_t	4	检测到的信号基波频率，单位为 Hz。此值反映了输入信号的主要频率成分。
waveform	WaveformType	1	波形类型枚举值，表示自动识别的波形类型。可能的值包括： 0 - 无有效波形 (WAVEFORM_NONE) 1 - 直流信号 (WAVEFORM_DC) 2 - 正弦波 (WAVEFORM_SINE) 3 - 方波 (WAVEFORM_SQUARE) 4 - 三角波 (WAVEFORM_TRIANGLE) 5 - 锯齿波 (WAVEFORM_SAWTOOTH) 6 - 未知波形 (WAVEFORM_UNKNOWN)
has_dc_offset	bool	1	直流偏移标志，true 表示信号存在明显的 DC 偏移分量，false 表示信号基本居中在 0V 附近。这有助于判断信号是否有直流偏置。

结构体内存布局

AnalysisResult结构体总大小为: 4 + (4 × NUM_HARMONICS) + (4 × NUM_HARMONICS) + 4 + 1 + 1 字节。

结构体的用途

此结构体在以下场景中使用：

- 1. 作为分析算法的返回值，包含完整的谐波分析结果

- 2. 在通过 UART 发送分析结果前，用于组织和准备数据
- 3. 可用于保存历史分析记录，进行趋势对比分析

可用 UART 命令

1. 设置自动模式 (0x01)

命令格式：

```
0xAA 0x01 0x00 0x00 0x00 0x00 0x00 0x55
```

可能的响应：

- 成功：0xAA 0x01 0x00 0x01 0x00 0x00 0x00 0x55 (MODE_AUTO=1)
- 注意：此命令总是成功

2. 设置触发模式 (0x02)

命令格式：

```
0xAA 0x02 0x00 0x00 0x00 0x00 0x00 0x55
```

可能的响应：

- 成功：0xAA 0x02 0x00 0x02 0x00 0x00 0x00 0x55 (MODE_TRIGGER=2)
- 注意：此命令总是成功

3. 获取当前模式状态 (0x03)

命令格式：

```
0xAA 0x03 0x00 0x00 0x00 0x00 0x00 0x55
```

可能的响应：

- 自动模式：0xAA 0x03 0x00 0x01 0x00 0x00 0x00 0x55 (MODE_AUTO=1)
- 触发模式：0xAA 0x03 0x00 0x02 0x00 0x00 0x00 0x55 (MODE_TRIGGER=2)

4. 触发一次采样 (0x04)

命令格式：

```
0xAA 0x04 0x00 0x00 0x00 0x00 0x00 0x55
```

可能的响应：

- 成功: 0xAA 0x04 0x00 0x00 0x00 0x00 0x00 0x55
- 系统忙: 0xAA 0x04 0x02 0x00 0x00 0x00 0x00 0x55
- 错误(非触发模式): 0xAA 0x04 0x01 0x00 0x00 0x00 0x00 0x55

5. 设置自动模式延时时间 (0x05)

命令格式:

```
0xAA 0x05 [延时低字节] [延时高字节] 0x00 0x00 0x00 0x55
```

其中, 延时值为 16 位整数, 表示自动模式下两次采样之间的延时毫秒数。必须在 100-10000 之间。

可能的响应:

- 成功: 0xAA 0x05 0x00 [延时低字节] [延时高字节] 0x00 0x00 0x55
- 错误(参数超出范围): 0xAA 0x05 0x01 0x00 0x00 0x00 0x00 0x55

6. 获取自动模式延时时间 (0x06)

命令格式:

```
0xAA 0x06 0x00 0x00 0x00 0x00 0x00 0x55
```

可能的响应:

- 成功: 0xAA 0x06 0x00 [延时低字节] [延时高字节] 0x00 0x00 0x55 例如, 默认 1000ms: 0xAA 0x06 0x00 0xE8 0x03 0x00 0x00 0x55 (0x03E8 = 1000)

响应状态码含义

- 0x00: 操作成功(RESPI_OK)
- 0x01: 操作失败(RESPI_ERROR)
- 0x02: 系统忙(RESPI_BUSY)

波形类型编码

分析结果中的波形类型使用以下编码:

- 0x00: 无有效波形(WAVEFORM_NONE)
- 0x01: 直流信号(WAVEFORM_DC)
- 0x02: 正弦波(WAVEFORM_SINE)
- 0x03: 方波(WAVEFORM_SQUARE)
- 0x04: 三角波(WAVEFORM_TRIANGLE)
- 0x05: 锯齿波(WAVEFORM_SAWTOOTH)
- 0x06: 未知波形(WAVEFORM_UNKNOWN)

使用示例

1. 初始化连接：

- 连接设备
- 配置 UART（波特率 115200，8 位数据，无奇偶校验，1 位停止位）

2. 设置为触发模式：

- 发送：0xAA 0x02 0x00 0x00 0x00 0x00 0x00 0x55
- 预期响应：0xAA 0x02 0x00 0x02 0x00 0x00 0x00 0x55

3. 触发一次采样和分析：

- 发送：0xAA 0x04 0x00 0x00 0x00 0x00 0x00 0x55
- 预期响应：0xAA 0x04 0x00 0x00 0x00 0x00 0x00 0x55
- 接收分析结果数据包

4. 设置为自动模式，间隔 2000ms：

- 发送：0xAA 0x05 0xD0 0x07 0x00 0x00 0x00 0x55 (0x07D0 = 2000)
- 预期响应：0xAA 0x05 0x00 0xD0 0x07 0x00 0x00 0x55
- 发送：0xAA 0x01 0x00 0x00 0x00 0x00 0x00 0x55
- 预期响应：0xAA 0x01 0x00 0x01 0x00 0x00 0x00 0x55
- 系统将自动每 2000ms 执行一次采样分析并发送结果