

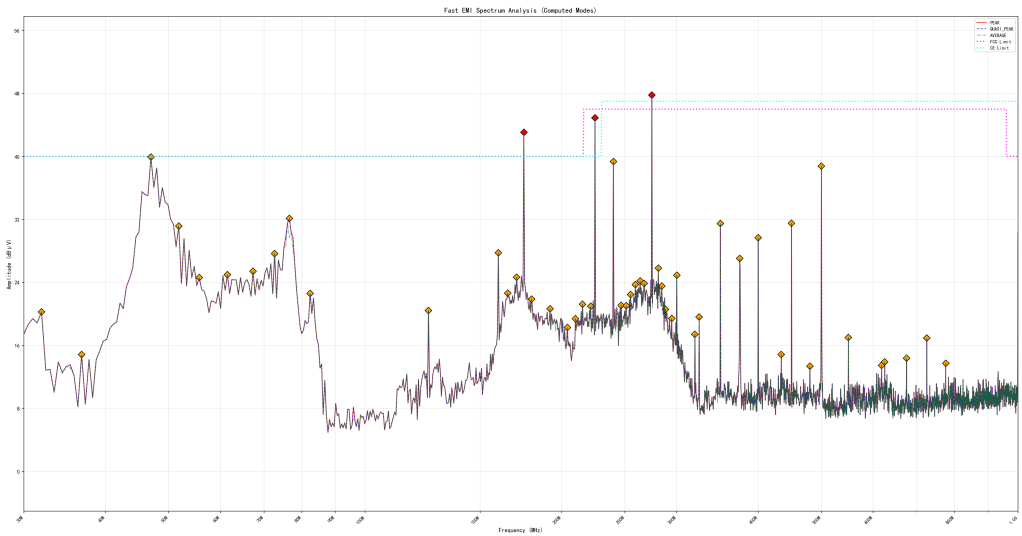


Test Report

Project Information

Customer:	M5Stack	EUT:	atom
Model:	—	Mode:	30.000MHz-1000.000MHz_15s
Engineer:	y	Remark:	首次测试

Test Graph



Suspected List

NO.	Freq [MHz]	Amplitude [dBμV]	FCC Limit [dBμV]	FCC Margin [dB]	CE Limit [dBμV]	CE Margin [dB]	Status
1	175.015	43.05	40.0	3.05	40.0	3.05	FCC Fail, CE Fail
2	274.925	47.79	46.0	1.79	47.0	0.79	FCC Fail, CE Fail
3	46.975	39.91	40.0	-0.09	40.0	-0.09	Pass
4	224.970	44.89	46.0	-1.11	40.0	4.89	CE Fail
5	240.005	39.35	46.0	-6.65	47.0	-7.65	Pass
6	499.965	38.77	46.0	-7.23	47.0	-8.23	Pass
7	76.560	32.14	40.0	-7.86	40.0	-7.86	Pass
8	51.825	31.16	40.0	-8.84	40.0	-8.84	Pass
9	159.980	27.77	40.0	-12.23	40.0	-12.23	Pass
10	72.680	27.63	40.0	-12.37	40.0	-12.37	Pass
11	450.010	31.50	46.0	-14.50	47.0	-15.50	Pass
12	350.100	31.46	46.0	-14.54	47.0	-15.54	Pass

AI测试分析报告

异常频点及简要数据信息列表

- 175.015 MHz:** Amplitude=43.05 dBuV, FCC/CE限值=40.0 dBuV, Margin=3.05 dB (FCC/CE均超出限值3.05 dB), Status: FCC Fail, CE Fail。
- 274.925 MHz:** Amplitude=47.79 dBuV, FCC限值=46.0 dBuV (Margin=1.79 dB, 超出1.79 dB), CE限值=47.0 dBuV (Margin=0.79 dB, 超出0.79 dB), Status: FCC Fail, CE Fail。
- 46.975 MHz:** Amplitude=39.91 dBuV, FCC/CE限值=40.0 dBuV, Margin=-0.09 dB (接近限值, 仅低于限值0.09 dB), Status: Pass (临界)。
- 224.970 MHz:** Amplitude=44.89 dBuV, CE限值=40.0 dBuV (Margin=4.89 dB, 超出4.89 dB), FCC限值=46.0 dBuV (Margin=-1.11 dB, Pass), Status: CE Fail。

异常点间的内在规律性

- 25 MHz基频谐波序列:** 175.015 MHz ($\approx 25 \text{ MHz} \times 7$)、224.970 MHz ($\approx 25 \text{ MHz} \times 9$)、274.925 MHz ($\approx 25 \text{ MHz} \times 11$) 均为25 MHz的7次、9次、11次谐波, 频率偏差 $\leq 0.1 \text{ MHz}$ (175.015-25x7=0.015 MHz, 224.970-25x9=-0.03 MHz, 274.925-25x11=-0.075 MHz), 符合整数倍关系, 推测存在25 MHz时钟/振荡器作为干扰源。
- 独立临界频点:** 46.975 MHz ($\approx 47 \text{ MHz}$) 与25 MHz谐波序列无明显倍数关联, 为独立异常点。

潜在技术原因分析

一、25 MHz谐波序列 (175 MHz、225 MHz、275 MHz) 超标根因

1. 时钟源谐波抑制不足

- 设备内部25 MHz晶体振荡器/锁相环 (PLL) 输出信号非线性失真, 7次、9次、11次谐波分量未被有效滤除 (如振荡器输出端未串联 π 型滤波器、滤波电容容值选型错误)。
- 时钟缓冲器 (Buffer) 饱和工作, 导致输出信号含高次谐波; 或缓冲器电源引脚去耦不良 (如未并接100nF+10uF去耦电容), 时钟噪声通过电源平面传导辐射。

2. PCB布局与布线缺陷

- 25 MHz时钟线未走内层屏蔽线, 或靠近PCB边缘、I/O接口, 形成“微带天线”效应, 直接辐射谐波能量; 线长接近175 MHz/225 MHz/275 MHz对应波长的1/4 (如175 MHz波长 $\approx 1.71 \text{ m}$, 1/4波长 $\approx 42.8 \text{ cm}$, 若时钟线长接近此值, 辐射效率显著提升)。
- 时钟线跨分割地平面 (如数字地与射频地之间存在缝隙), 高频回流路径不连续, 谐波电流通过缝隙辐射。

3. 模块级屏蔽失效

- 含25 MHz时钟的模块 (如处理器、通信芯片组) 金属屏蔽罩未完全封闭 (如螺丝缺失、缝隙宽度 $> \lambda/20$, 175 MHz $\lambda \approx 1.71 \text{ m}$, $\lambda/20 \approx 8.5 \text{ cm}$, 若缝隙 $> 8.5 \text{ cm}$ 则屏蔽失效), 或屏蔽罩与PCB接地不良 (仅单点接地, 未形成360度环绕接地)。
- 模块散热孔未采用截止波导设计, 导致175-275 MHz频段谐波通过孔洞辐射 (圆形孔直径 $> \lambda/10$ 时屏蔽失效, 175 MHz $\lambda/10 \approx 17 \text{ cm}$, 若散热孔直径 $> 17 \text{ cm}$ 则需整改)。

4. 电源系统传导耦合

- 25 MHz时钟通过VCC电源线传导至DC-DC转换器, 经开关管非线性放大后, 以共模干扰形式通过电源输入线辐射; 或LDO线性稳压器带宽不足, 无法抑制25 MHz及其谐波频率的纹波。

二、46.975 MHz临界异常点根因

1. 潜在基频谐波辐射

- 设备内部存在23.5 MHz振荡器（ $23.5 \times 2 = 47$ MHz），其2次谐波幅度接近限值（39.91 dBuV），可能因振荡器负载不匹配（如负载阻抗与输出阻抗差异 $>10\%$ ）导致谐波能量泄漏。
- 开关电源工作频率为47 kHz（ $47 \text{ kHz} \times 1000 = 47$ MHz），1000次谐波经变压器磁芯饱和放大后辐射，但开关电源高次谐波通常衰减较快，需排查电源变压器屏蔽（如未包铜箔接地）。

2. 测试环境与线缆因素

- 测量时长15秒内存在外部环境干扰（如附近47 MHz业余无线电设备突发发射），但Margin仅-0.09 dB，需复测确认是否为持续性干扰；或测试线缆（如SA连接电缆）在47 MHz频段存在谐振（线缆长度 $\approx \lambda/2 = 3.19$ m，若线缆长接近此值，会放大干扰信号）。

3. 寄生路径辐射

- 设备内部传感器线缆、按键排线未做屏蔽，在47 MHz附近形成寄生LC谐振回路（线缆分布电容与连接器电感谐振），将微弱噪声信号放大至接近限值。

三、224.970 MHz CE标准专项超标说明

该频点作为25 MHz 9次谐波，CE限值（40 dBuV）较FCC限值（46 dBuV）更低，导致CE Margin（4.89 dB）显著大于FCC Margin（-1.11 dB）。核心问题仍为25 MHz谐波抑制不足，需优先针对CE标准要求，强化225 MHz频段滤波（如在射频前端增加225 MHz陷波器）。

异常点物理共因（25 MHz谐波序列）

175 MHz、225 MHz、275 MHz频点同步超标，表明干扰源具有**持续性与规律性**，物理机制指向：

- **单一基频源主导**：25 MHz时钟为核心干扰源，其谐波能量通过“传导+辐射”双通道传播，且未被系统级滤波、屏蔽措施有效阻断。
- **多路径叠加效应**：谐波能量同时通过时钟线辐射、电源传导、模块缝隙泄漏，在测试频段形成叠加，导致幅度超出限值（如175 MHz同时存在时钟线辐射与电源传导干扰，总幅度=单个路径幅度+耦合增益）。
- **PCB寄生参数放大**：25 MHz谐波频率与PCB寄生电容/电感（如连接器引脚电感、过孔寄生电容）形成谐振，进一步提升辐射幅度（如225 MHz对应容抗 $=1/(2\pi fC)$ ，若PCB寄生电容 $C=1$ pF，容抗 ≈ 699 Ω ，易与信号线阻抗匹配失衡，产生反射增强辐射）。