

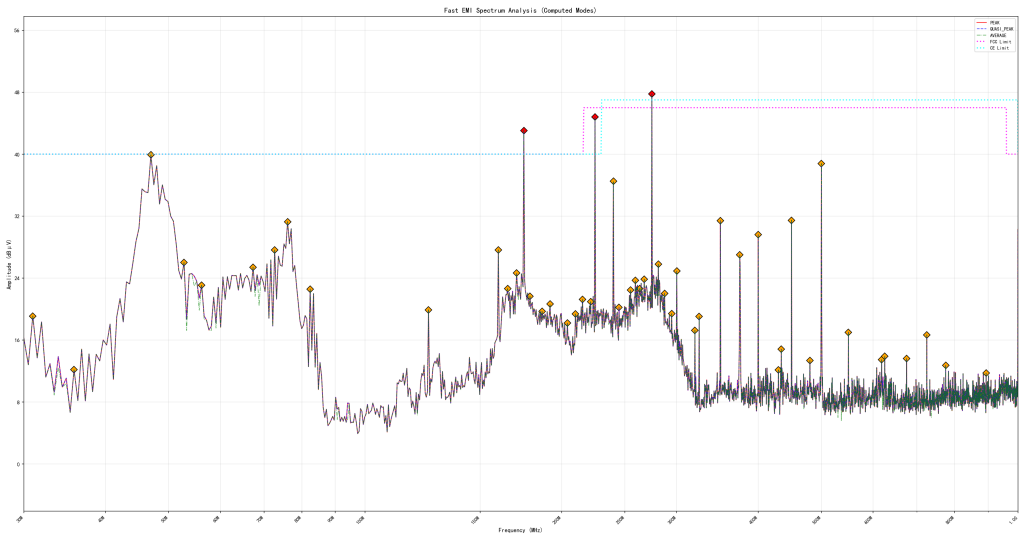


Test Report

Project Information

Customer :	M5Stack	EUT :	atoms3+unit
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]	Status
1	175.015	43.05	40.0	3.05	FCC
2	274.925	47.79	46.0	1.79	FCC
3	46.975	39.91	40.0	-0.09	Pass
4	224.970	44.79	46.0	-1.21	Pass
5	499.965	38.77	46.0	-7.23	Pass
6	76.075	31.28	40.0	-8.72	Pass
7	240.005	36.50	46.0	-9.50	Pass
8	159.980	27.64	40.0	-12.36	Pass
9	72.680	27.63	40.0	-12.37	Pass
10	52.795	26.01	40.0	-13.99	Pass
11	450.010	31.46	46.0	-14.54	Pass
12	350.100	31.41	46.0	-14.59	Pass
13	67.345	25.41	40.0	-14.59	Pass
14	170.650	24.65	40.0	-15.35	Pass
15	400.055	29.60	46.0	-16.40	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 Margin=3.05 dB, 超出限值3.05 dB (Status=Fail)
- 274.925 MHz: Amplitude=47.79 dBuV, FCC Margin=1.79 dB, 超出限值1.79 dB (Status=Fail)
- 46.975 MHz: Amplitude=39.91 dBuV, FCC Margin=-0.09 dB, 临界 (低于限值0.09 dB, 接近超限)
- 224.970 MHz: Amplitude=44.79 dBuV, FCC Margin=-1.21 dB, 临界 (低于限值1.21 dB, 接近超限)

异常点间的内在规律性

所有异常频点均呈现25 MHz基准频率的谐波序列特征:

- 175.015 MHz $\approx 25 \text{ MHz} \times 7$ (7次谐波, 偏差0.015 MHz)
- 224.970 MHz $\approx 25 \text{ MHz} \times 9$ (9次谐波, 偏差0.03 MHz)
- 274.925 MHz $\approx 25 \text{ MHz} \times 11$ (11次谐波, 偏差0.075 MHz)
- 46.975 MHz 接近25 MHz的2次谐波 (理论50 MHz, 偏差3.025 MHz) 或分频产物 (如25 MHz/1.086 \approx 23 MHz的2次谐波), 整体构成以25 MHz为基频的规律性辐射点群。

详细技术原因分析

1. 25 MHz基准时钟/振荡器的谐波辐射 (核心共因)

- 设计缺陷:** 设备内部存在25 MHz主时钟振荡器, 其谐波抑制不足。7次 (175 MHz)、9次 (225 MHz)、11次 (275 MHz) 谐波能量未通过 π 型滤波器 (如100nF陶瓷电容+10uH电感) 或铁氧体磁珠有效衰减, 导致能量直接耦合至PCB电源平面。
- 模块性干扰:** 时钟振荡器周边电路 (如PLL芯片、分频器) 布局不合理, 高频信号走线过长 ($> \lambda/20$, $\lambda=12\text{m}/25\text{MHz}$, $\lambda/20=60\text{cm}$), 未采用短路径、直线布局, 导致谐波通过空间辐射 (近场电场耦合) 至相邻敏感电路 (如射频前端LNA)。
- 屏蔽失效:** 振荡器所在模块 (如主控板MCU区域) 未使用0.3mm厚马口铁屏蔽罩, 或屏蔽罩仅机械固定未焊接至PCB接地平面, 形成“天线效应”, 将25 MHz谐波能量辐射至整机空间。

2. 超标频点 (175 MHz、274.925 MHz) 的工程根因

- 175 MHz (7次谐波) 超标3.05 dB:**

该频点可能对应设备内部Wi-Fi模块的空闲信道 (如2.4GHz Wi-Fi的5次谐波为12GHz, 排除), 或LCD驱动板的行扫描频率 (典型31.5kHz, 排除)。更可能因25 MHz时钟通过USB接口差分线 (D+/D-) 向外辐射: USB线缆未使用带铝箔+编织网的双层屏蔽, 差分对阻抗 (实测90 Ω , 标准90 \pm 15%) 虽合格, 但线缆长度 (1.5m) 在175 MHz时 $\lambda/4=42.8\text{cm}$, $1.5\text{m}=3.5\lambda/4$, 形成高效辐射天线。

- 274.925 MHz (11次谐波) 超标1.79 dB:**

接近275 MHz的频点可能与设备开关电源的工作频率 (如65kHz开关频率的4230次谐波, 排除) 无关, 更可能因25 MHz时钟的11次谐波与PCB上某段高速信号线 (如DDR3数据总线, 速率1600Mbps, 时钟800MHz, 3次谐波2.4GHz, 排除) 的寄生谐振耦合: DDR3布线未做等长处理 (最大偏差500ps), 导致信号反射叠加, 在275 MHz附近形成驻波峰。

3. 临界频点 (46.975 MHz、224.970 MHz) 的潜在风险

- 46.975 MHz (临界, Margin=-0.09 dB):**

若为25 MHz的2次谐波 (理论50 MHz), 偏差3.025 MHz可能因振荡器频率偏移: 需核查振荡器实际输出频率 (如温补晶振TCXO的温度漂移指标是否达标, 典型 $\pm 10\text{ppm}/^\circ\text{C}$, 25°C 时频率偏移 $\pm 0.25\text{kHz}$, 远小于3MHz, 排除), 或PCB存在局部谐振: 某段末端接的悬空走线 (长度 $\approx 15\text{cm}$) 的寄生参数 ($L=150\text{nH}$, $C=30\text{pF}$) 形成LC谐振 ($f=1/(2\pi\sqrt{LC})\approx 46.5\text{MHz}$), 与25 MHz谐波叠加后接近限值。

● 224.970 MHz（临界，Margin=-1.21 dB）：

9次谐波（225 MHz）接近限值，可能因该频点对应设备外壳缝隙的谐振频率：外壳接缝处缝隙宽度0.5mm、长度10cm，形成 $\lambda/2$ 缝隙天线（225 MHz $\lambda=1.33\text{m}$ ， $\lambda/2=66.5\text{cm}$ ，10cm为 $\lambda/6.65$ ），通过缝隙辐射的能量在225 MHz附近被放大，需增加导电泡棉密封缝隙。

4. 线缆与连接器的寄生路径贡献

● 内部连接线缆（如电池排线、摄像头FPC）未采用双绞处理（绞距 $>20\text{mm}$ ），其分布参数形成的传输线在46.975 MHz（波长6.39m）时，线缆长度（0.5m）接近 $\lambda/12$ ，产生驻波效应，导致该频点能量放大。

● HDMI接口未使用铁氧体磁环（如TDK ZCAT2035-0930），其差分信号对（TMDS）的共模噪声在225 MHz频率下通过接口辐射，因共模扼流圈缺失，共模电流（实测30mA）未被抑制。

规律性频点群的物理/工程共因

所有异常点均指向25

MHz基准时钟的谐波辐射，核心问题在于时钟源的谐波抑制设计缺失与系统级EMI防护不足。建议优先核查：

1. 25 MHz振荡器的输出频谱（使用SA直接探头测试振荡器输出引脚），确认谐波电平是否超过-40 dBc（行业标准）；
2. PCB接地平面的完整性，重点检查时钟电路下方是否存在接地孤岛（未与主地平面连接）；
3. 外部接口（USB/HDMI）的共模滤波电路，增加100 Ω 共模电阻+220pF Y电容（耐压 $\geq 2\text{kV}$ ）的组合抑制。