Application Note

管理 D 类音频应用中的 EMI

摘要

电磁干扰 (EMI) 是外部辐射源在电路中引发的有害干扰。这种干扰会中断、阻碍电路工作，或是劣化电路的工作性能。

内容

1 EMI — 基础原理.....2
2 D 类音频放大器.....4
3 抑制 EMI.....5
4 参考资料.....6
5 修订历史记录.....6

插图清单

图 1-1. 波长随频率变化的关系.....2
图 1-2. 常见天线类型.....2
图 1-3. PCB 中的非预期天线.....3
图 2-1. D 类音频放大器 PWM.....4
图 3-1. 电阻与电感随频率变化的特性.....5
图 3-2. 固定频率调制与扩频调制对比.....5
图 3-3. LM48511 — 扩频调制 D 类放大器.....6

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

English Document: SNAA050
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

1 EMI — 基础原理

在当前便携设备与消费类产品中，空间资源十分紧张，工程师常常需要取消外壳与屏蔽结构，转而依靠其他手段抑制 EMI 与噪声，例如在电路层面做好分区隔离。产品空间缩小、功能增多，要求采用高密度 PCB；搭配具备精细布线规则的晶圆级封装后，EMI 问题会更加突出。

EMI 包含两类内容。辐射发射指设备向外产生辐射噪声的程度。敏感度指设备受其他电磁波发射信号影响的程度。设计人员对非预期发射的控制效果越好，设备的敏感度管控难度就越低。发射一般分为辐射发射与传导发射。辐射发射从电路板、走线或导线向外发散，以电磁波形式在空气中传播，干扰周边接收电路。需要注意：此处的“接收电路”泛指所有会因接收电磁能量而工作异常的电路，PCB 走线乃至 IC 引脚都属于这类电路。传导发射指能量经由导线或线缆从电路向外泄放、传导。传导发射既可以直接引发故障，也可以转化为辐射发射。

想要理解发射现象，需要先掌握天线相关知识。图 1-1 中给出了波长与频率之间公认的物理关系式：

$$\lambda = \frac{\text{Velocity of Light}}{\text{Frequency x } \sqrt{\epsilon_r}} = \frac{300}{\int \text{(MHz) x } \sqrt{\epsilon_r}}$$

ϵ_r is the relative permittivity

图 1-1. 波长随频率变化的关系

高效天线所需的最小长度为 λ/4。空气的介电常数为 1，而 FR4 或玻纤环氧材质 PCB 的介电常数约为 4.8。该特性会让信号在进入 FR4 介质形成的介质梯度区域后传输速度变慢，产生“波长缩短”效应。举例说明：200MHz 信号在空气中的四分之一波长为 16.7cm。

该信号在内层 PCB 走线中的四分之一波长为：$16.7/4.8^{(1/2)} = 7.6\text{cm}$。

即便走线长度小于 λ/4，PCB 走线依旧可以充当非预期天线，同时抬升发射水平与敏感度。表层走线同样存在波长缩短效应，介质一侧会改变传输路径的等效介电常数。

PCB 走线这类非预期天线，是数字系统辐射噪声的主要来源。由此可见，从辐射发射的角度分析，D 类音频放大器本质上属于数字系统。电磁学有一条核心原理：互易定理。电流流动可以产生电场，电通量变化又可以感应生成电流。同理，接收性能优良的天线，发射性能同样优良。如果非预期天线的任意尺寸，在噪声电流激励该天线的频率下接近四分之一波长，就会产生辐射发射。

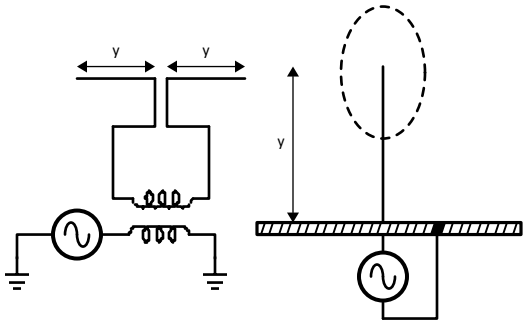


图 1-2. 常见天线类型

图 1-2 展示了两种经典天线结构：简易偶极天线与鞭状天线。一个值得关注的现象：鞭状天线本质上是半副偶极天线，水平接地面会等效充当偶极天线的另外一半。

天线的作用是通过电磁辐射收发信号。但如图 1-3 中所示，电路板上的*非预期*天线可以包括：

- 长走线
- 过孔
- 元器件引线与引脚
- 未插接器件的 PCB 连接器与插针座

English Document: SNAA050
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

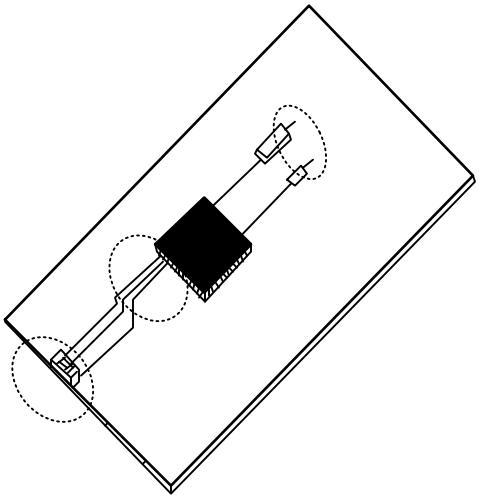


图 1-3. PCB 中的非预期天线

未端接的表层走线或内层埋走线，都可能成为非预期鞭状天线。布局不合理、处于不同射频电位的走线段，可以构成非预期偶极天线。此外，PCB 的导电平面可以充当偶极天线的另一臂，平面自身会和电场形成耦合。

English Document: SNAA050
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

2 D 类音频放大器

D 类音频放大器凭借高效率优势，已经成为消费市场广泛采用的拓扑结构。该放大器利用输入模拟信号对高频方波实施调制。方波可以是固定频率、可变频率，也可以是无固定周期的随机脉冲。系统会使用低通滤波器（通常为二阶巴特沃斯滤波器）滤除高频分量，还原原始音频信号。在“无滤波器”拓扑结构中，扬声器自身的电感直接充当滤波器的一部分。脉宽调制 (PWM) 是一种常见 D 类拓扑，该拓扑采用固定频率波形，通过改变占空比，使信号经过低通滤波器后生成均值随输入变化的波形，相关原理见图 2-1。

开关拓扑的优势十分突出：转换效率高、功耗低、散热设计体积更小。但效率提升存在相应代价。想要实现高效率，就需要边沿陡峭、高速翻转的方波。方波的频谱能量高度集中在边沿位置，会产生和数字系统相同的不良干扰现象。与此同时，波形会出现一定过冲，在短时间内超出电压最大值与最小值。过冲会在输出频谱中引入额外高频分量，不利于 EMI 控制与音频性能。

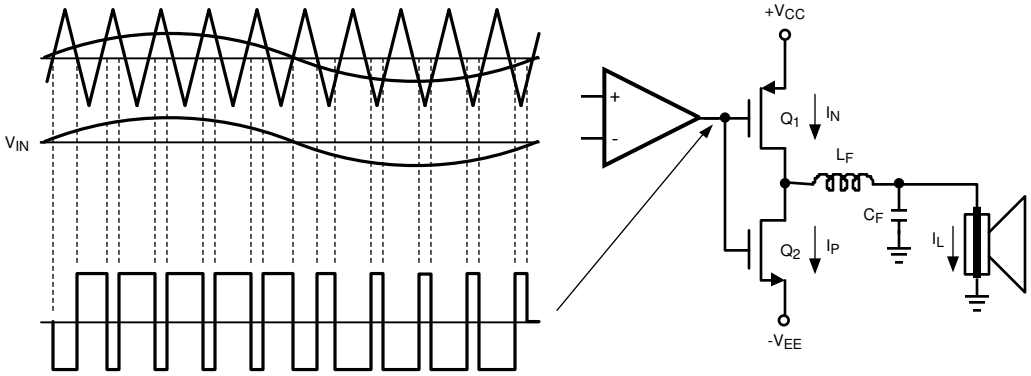


图 2-1. D 类音频放大器 PWM

English Document: SNAA050
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

3 抑制 EMI

为抑制 EMI，电路设计阶段必须联合电气工程师、PCB 布局工程师与制造工程师开展 PCB 布局规划。处理 EMI 的通用 PCB 设计准则包括：

- 在已确认存在电压波动的位置，于电源与接地之间放置去耦电容。随意摆放电容会加剧 EMI 问题。本应用报告末尾收录了去耦电容的使用参考资料
- 电源平面应与 PCB 边缘保持距离
- 避免在接地平面或电源平面内开设布线切口，该操作会形成非预期的开孔
- 对全部高频时钟线路进行妥善端接。
- 对 PCB 连接器实施合理滤波。
- 优质 PCB 设计应规避环路天线。环路天线指正向电流与返回电流沿同一条明确导电路径流通的任意走线。

最优方案是抑制向天线馈送电流的电流源，从源头阻断辐射。

音频设计人员需要重点考虑以下内容：

- 音频放大器至扬声器的走线应尽可能缩短。PCB 走线与导线均可充当天线，走线长度达到 λ/4 时会产生显著辐射。
- 对于无滤波器 D 类系统，连接放大器输出端与扬声器的走线及线缆，大概率是射频辐射的最大来源。

在扬声器回路中串联铁氧体磁珠，并将磁珠布置在靠近放大器的位置，该方式具备抑制效果。为清晰理解铁氧体磁珠的抑制机理，可将铁氧体磁珠拆解为随频率变化的电阻元件与电感元件——R(f) 和 L(f)，如图 3-1 中所示。

从 EMI 抑制的角度来看，铁氧体磁珠等效为电阻，但由于 R_{DC} = 0，不会产生直流压降。该特性使其适用于目标工作频率显著低于 1 MHz 的场景。此外，如图 3-1 中所示，需要明确：铁氧体磁珠只有作为二元分压器的组成部分时，才能发挥抑制作用。Z_1 和 Z_2 的阻抗均随频率变化。若要实现低通滤波器的预期功能，需要满足下述阻抗关系：工作频率下 $Z_2 > Z_1$，噪声频率下 $Z_1 > Z_2$。

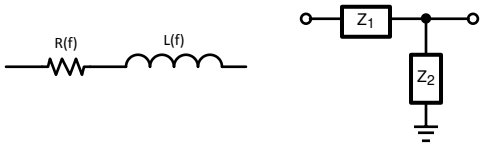
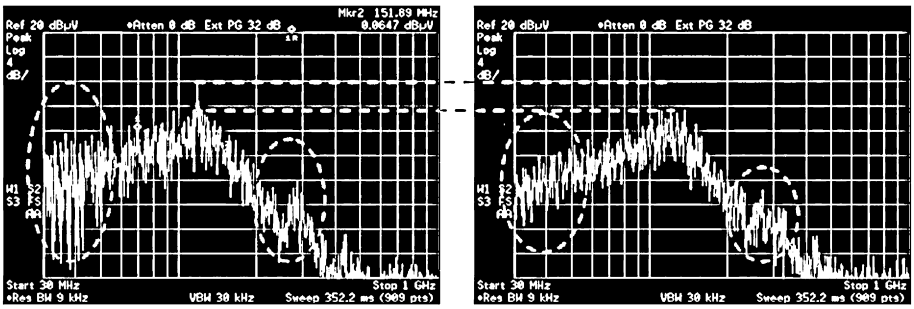


图 3-1. 电阻与电感随频率变化的特性

铁氧体磁珠一般作为串联元件，并联元件为电容，可以是实体电容或是集总电容。传递函数表明，Z_1 随频率升高而增大，Z_2 随频率升高而减小 (1/j ω C)，该系统经过阻尼处理，谐振效应得到大幅削弱。D 类放大器本身自带周期性方波，其核心难点在于能量集中分布在各次谐波处。

业界在研发低 EMI、低噪声 D 类放大器时，有一种方案是对开关频率进行抖动处理，或是对开关频谱进行扩频，以此降低频谱上任意单点的能量幅值。对比传统 D 类放大器，扩频调制架构具备多项核心优势。该架构可以维持高效率与低 THD+N 指标，同时大幅降低辐射噪声与 EMI，相关效果见图 3-2。



• Fixed Frequency　　• Spread Spectrum

图 3-2. 固定频率调制与扩频调制对比

English Document: SNAA050
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

LM48511 是一款采用扩频调制的 D 类音频放大器。器件内置升压稳压器，可将供电电压提升至 7V；对比无升压功能的放大器，该特性能够提升放大器输出功率与音频声压级。即便采用电池这类电压持续衰减的电源供电，升压稳压器也可保障放大器维持稳定输出电平。

LM48511 放大器搭载可通过逻辑信号选择的扩频调制器，能够降低 EMI，无需搭配输出滤波器或扼流圈。如图 3-3 中所示，扩频调制器驱动标准 H 桥电路，由 H 桥驱动桥接负载式扬声器。扩频模式下，开关频率以 330kHz 为中心频率，在 ±10% 范围内随机波动，减少扬声器、配套线缆以及走线产生的 EMI 辐射。固定频率 D 类放大器会在开关频率的各次倍频处集中大量频谱能量；LM48511 放大器的扩频架构会将这部分能量分散到更宽的带宽内，降低电路的峰值噪声功率。

电磁干扰属于系统层面问题，当下音频工程师开展设计时必须将 EMI 纳入考量，选用最优设计方案，审慎挑选元器件与材料。

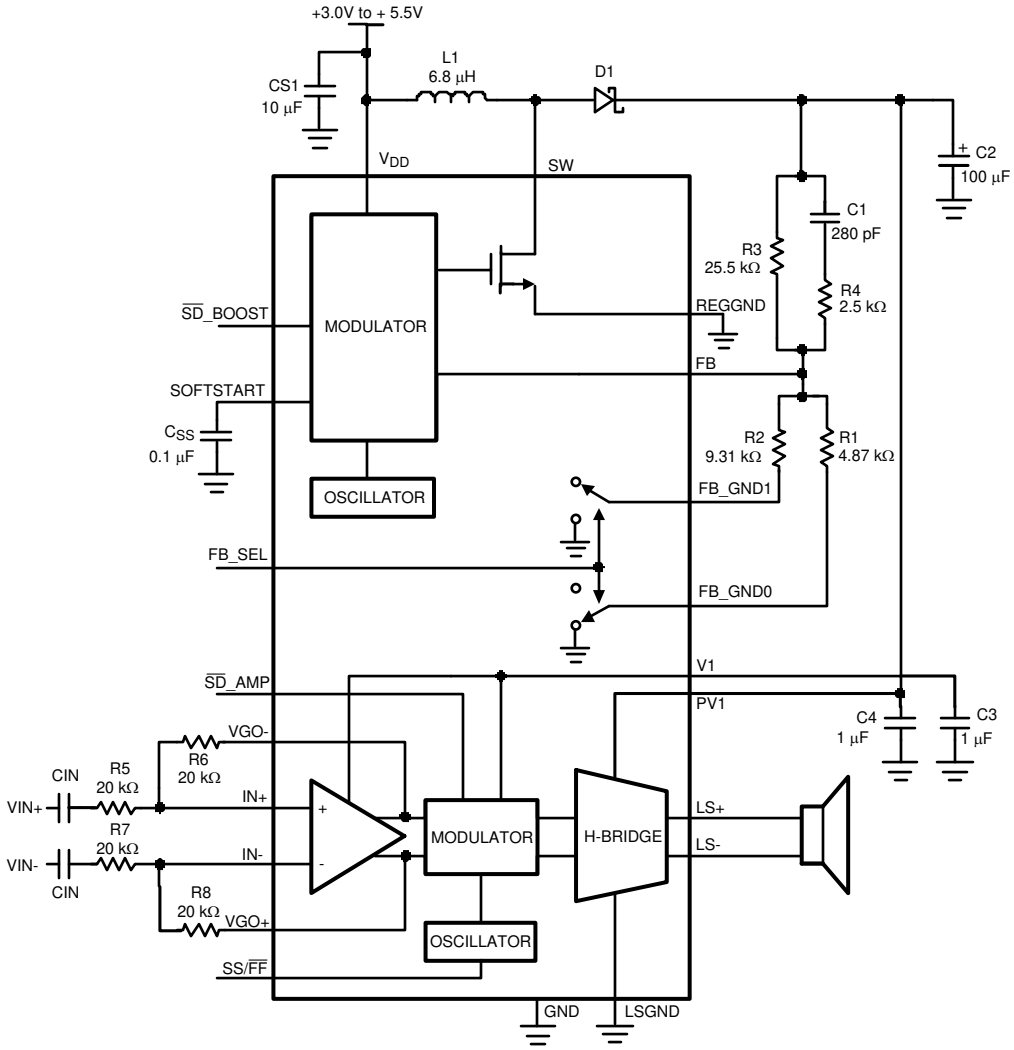


图 3-3. LM48511 — 扩频调制 D 类放大器

4 参考资料

- Bruce Archambeault 和 James Drewniak，《PCB Design for Real-World EMI Control》，2002 年
- David Terrell 和 R. Kenneth Keenen，《Digital Design for Interference Specifications》，1997 年
- Howard Johnson，《High-Speed Digital Design: A Handbook of Black Magic》，1993 年

5 修订历史记录

注：以前版本的页码可能与当前版本的页码不同

English Document: SNAA050
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

Changes from Revision A (May 2013) to Revision B (November 2026) **Page**

- 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式.....1

English Document: SNAA050
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做出任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保法规或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 TI 销售条款)、TI 通用质量指南 或 ti.com 上其他适用条款或 TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。 除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月