

クラス D オーディオ・アプリケーションにおける EMI 対策

National Semiconductor
Application Note 1737
Bill McCulley
2007 年 11 月



EMI の基本

EMI (電磁波障害) は、外部ソースから発せられる電磁放射によって電気回路内に発生する不要な障害です。この障害は、回路の有効な性能を中断、妨害したり、悪化させる恐れがあります。

今日の携帯 / コンシューマ機器アプリケーションでは、省スペースが特に重視されるため、エンジニアは筐体やシールドを省略して回路レベルでの分離改善などの別の手段で EMI およびノイズを抑制することがしばしば求められます。小型化と高機能化は高密度の PCB を必要とし、また、微小な PCB 設計ルールを適用したウェハ・スケール・パッケージの採用に伴って、EMI の影響がよりいっそう懸念されます。

EMI は 2 つの側面を持っています。エミッションは、機器から発生する放射ノイズがどの程度であることを示します。感度は、他の電磁波からのエミッションによって機器がどの程度影響を受けるかを表します。設計者が意図しないエミッションをどれほど抑制できるかが、感度対策を容易にするカギです。エミッションは一般的に、放射性エミッションと伝導性エミッションに分類されます。放射性エミッションは、回路基板、パターンまたは配線から離れて、電磁波の形で空中を伝搬して、付近のレシーバに干渉するものです。なお、ここでいう「レシーバ」は、電磁エネルギーを受けることによって動作に悪影響が出る可能性がある、PCB パターンや IC のリードなどのあらゆる回路を指していることが重要です。伝導性エミッションは、配線またはケーブルを通して、回路から外へ漏れるか、または伝導したエネルギーのことをいいます。伝導性エミッションは、直接に色々な問題を引き起こすか、あるいは放射性エミッションの形をとることもあります。

エミッションを理解するには、アンテナを理解することが重要です。Figure 1 は、よく知られた波長と周波数の物理的な関係です。

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

ϵ_r is the relative permittivity

FIGURE 1. Wavelength as a Function of Frequency

効率的なアンテナに必要とされる最短の長さは $\lambda/4$ です。誘電率は空中では 1 ですが、FR4 またはガラス - エポキシ系の PCB では約 4.8 になります。パターンを通る信号は、FR4 素材に由来する誘電率勾配 (dielectric gradient) に達すると減速して、事実上の「波長短縮」効果が発生します。

例えば、200MHz 信号は空中では 16.7cm の $\lambda/4$ の波長を持っています。

内部層の PCB パターンでは、この波長は $16.7/4.8^{(1/2)}=7.6$ cm になります。

PCB パターンは、長さが $\lambda/4$ より短い場合でも意図しないアンテナとして振る舞い、エミッションと感度をともに増やしてしまうことがあります。表面パターンもこの波長短縮効果を見せます。これは、誘電体の片側が伝送の全体的な誘電率を変えるよう作用するからです。

PCB パターンのような意図しないアンテナは、デジタル・システムにおける放射ノイズの元凶です。後でみるように、クラス D オーディオ・アンプは、放射性エミッションの観点からみると、本質的にはデジタル・システムです。電磁気学の根幹をなす主要原理のなかに、相反性の定理があります。電流の流れは電界を発生させ、電束が 1 回変化すると電流を誘導します。同様に、受信に有効なアンテナは送信にも有効です。ノイズによって励起された意図しないアンテナの長さが、周波数で $\lambda/4$ 波長に近づく、放射性エミッションが発生する恐れがあります。

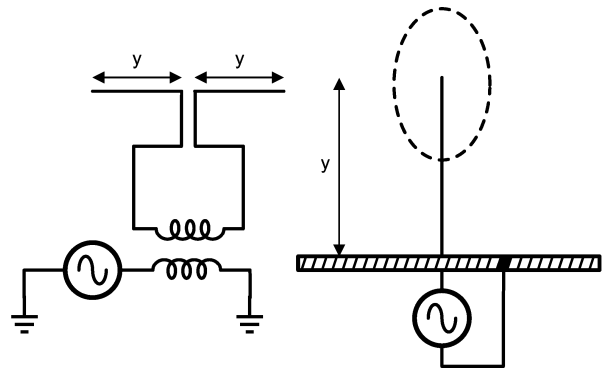


FIGURE 2. Common Antennas

一般的なアンテナ型式には、シンプルなダイポール型とホイップ型の 2 種類があります (Figure 2 を参照)。興味深いのは、ホイップ型は本質的にはダイポール型の半分であることで、ダイポール型の残りの半分として機能させるために水平グラウンドを設けています。

アンテナは、電気エネルギーの放射を通じて信号の送受信を行うものです。しかし、Figure 3 にみるように、回路基板内の意図しないアンテナとして、次のようなものがあります。

- 長いパターン
- ピア
- 部品のリードとピン
- 未実装の PCB 基板コネクタおよびヘッダ

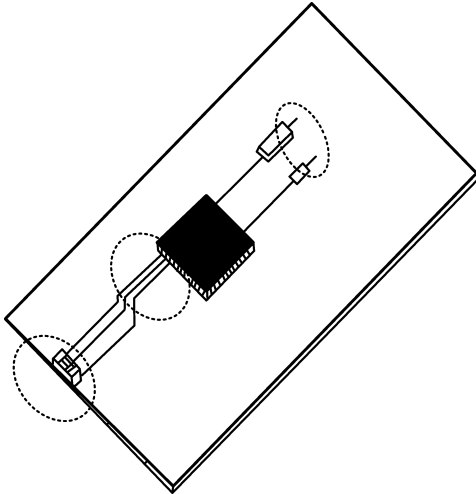


FIGURE 3. Unintended Antennas in PCBs

未末端の表面パターンまたは未末端の埋め込みパターンは、意図しないホイップ型アンテナになる可能性があります。良くないレイアウトに起因する、異なる RF 電位でのパターンの部分は意図しないダイポール型アンテナになることがあります。また、PCB の導電層の面自体が電界に結合されて、ダイポール型アンテナのもうひとつの足として振舞うことがあります。

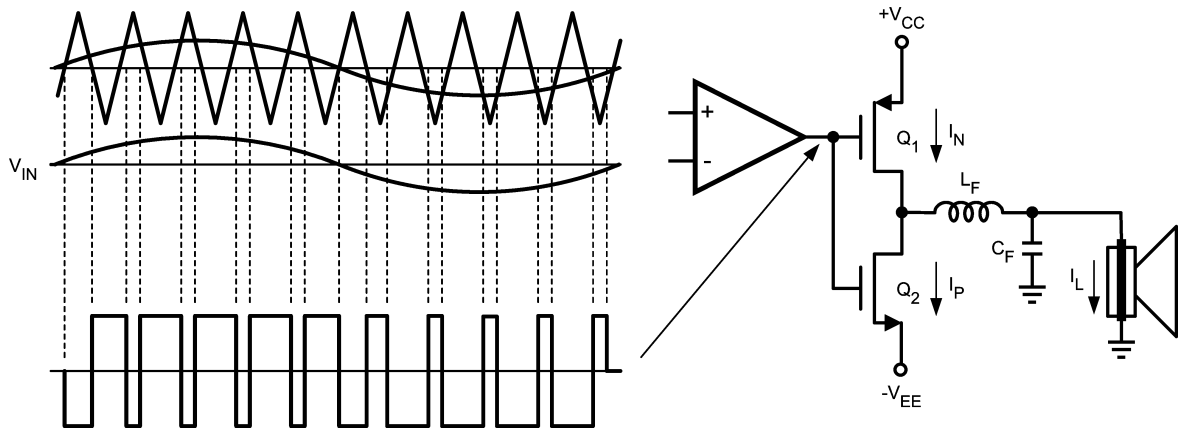


FIGURE 4. The Class D Audio Amplifier PWM

クラス D オーディオ・アンプ

クラス D オーディオ・アンプは、高効率なことから、コンシューマ機器市場でポピュラーなトポロジーとして浸透しつつあります。このアンプでは、入力されるアナログ信号で高調波の方形波を変調します。方形波自体は、固定周波数、可変周波数または周波数が固定していない単なるランダム・パルスとすることができます。ローパス・フィルタ (2 時のバターワース型が代表的) を使って、高周波成分を除去し、元のオーディオ信号を再生します。「フィルタレス」トポロジーでは、スピーカ自体のインダクタンスをフィルタの一部として使用します。一般的なクラス D トポロジーのひとつであるパルス幅変調 (PWM) では、固定周波数の波形を使い、ローパス・フィルタを通過した後信号の移動平均を作るためにデューティ・サイクルを変化させます (Figure 4 を参照)。

スイッチング・トポロジーの長所は明白で、高効率、低消費電力および小規模な放熱設計です。ただし、効率向上には犠牲を伴います。効率を高めるには、シャープな高速スイッチング方形波が必要です。この方式では、スペクトル・エネルギーが方形波のエッジに強く集中するので、デジタル・システムにみられるのと同様な、好ましくない現象が発生する可能性があります。また、波形が短時間、最大電圧および最小電圧を超えてしまう、オーバーシュートが起きることもあります。オーバーシュートは、出力スペクトルに高周波成分を付加するので、EMI およびオーディオ性能にとっては好ましくありません。

EMI 対策

EMI 対策では、電気、PCB レイアウト、製造の各エンジニアとの回路設計の一部として、PCB フロア・プランニングを含めることが重要です。EMI 対策のための一般的な PCB ガイドラインとしては、次のようなものがあります。

- 電圧変動が起きる個所には、電源とグラウンドの間にデカップリング・コンデンサを配置すること。コンデンサを無計画に配置すると、EMI 問題を悪化させる恐れがあります。デカップリング・コンデンサを使用するための参考文献を本稿の最後に載せました。
- 電源プレーンは、PCB のエッジまで広げないこと。
- グラウンド・プレーンまたは電源プレーン内でのパターン切断を避けること。切断されると、意図しない開口部ができる可能性があります。
- すべての高周波クロック・ラインを適切に終端すること。
- PCB コネクタを適切にフィルタ処理すること。
- PCB 設計を適切に行って、ループ・アンテナを回避すること。ループ・アンテナには、周到に定義した 1 つの導電パスを順方向電流と帰還電流の両方が通る場合のどのルートも含まれます。

アンテナに給電している電流源を抑えることで、放射を適切にストップさせることができます。

オーディオ設計者にとっては、以下の事項を考慮することが重要です。

- オーディオ・アンプからスピーカまでのパターンを極力短くすること。パターンの長さが $\lambda/4$ に達すると、PCB パターンないし配線は放射の大きいアンテナとして振舞います。
- フィルタレス・クラス D システムの場合、アンプ出力とスピーカを接続するパターンおよびケーブルの長さが、最大の RF エミッション源になることがあります。

アンプの近くのラウドスピーカと直列にフェライト・ビーズを挿入すると、効果が出る場合があります。フェライト・ビーズの抑制メカニズムを理解するには、フェライト・ビ

ズを周波数に依存する抵抗要素とインダクタ要素、すなわち $R(f)$ と $L(f)$ に分けると便利です (Figure 5 を参照)。

EMI 抑制では、フェライト・ビーズは抵抗として機能しますが、 $RDC=0$ であるので、DC 電圧降下は生じません。このため、問題の周波数が 1MHz を大きく下回る場合には、フェライト・ビーズは効果的です。また、Figure 5 のように、2 素子分圧回路の一環と考えると、フェライト・ビーズは有効とすることを理解することも重要です。 Z_1 と Z_2 はともに周波数に依存します。ローパス・フィルタの所望の機能を達成するには、次の関係が存在しなければなりません。すなわち、所望の周波数の時に $Z_2 > Z_1$ およびノイズ周波数の時に $Z_1 > Z_2$ という関係です。

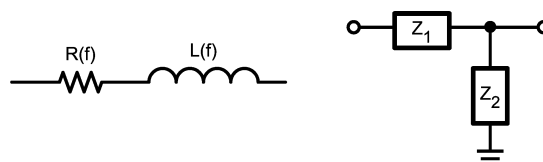
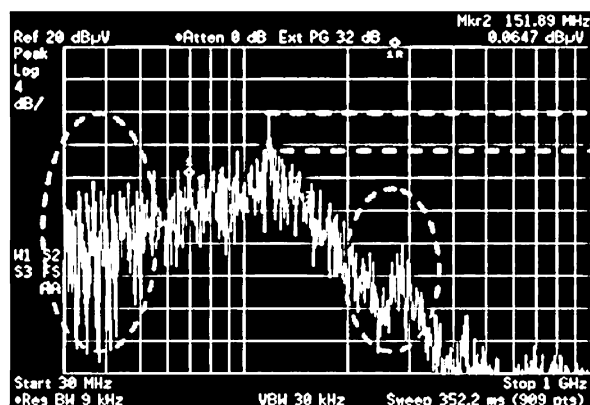


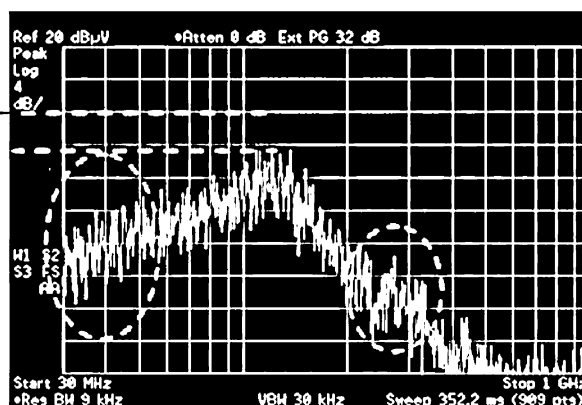
FIGURE 5. Resistance and Inductance as a Function of Frequency

フェライトは通常、直列素子として機能します。シャント素子は、分布容量または集中容量のいずれかの容量になります。伝達関数から分かるのは、周波数 ($1/j\omega C$) と共に、 Z_1 は増加し、 Z_2 は減少することと、共振効果が大きく減ると、それだけシステムは抑圧されるということです。

クラス D に固有の周期的な方形波を扱う場合の大きな問題は、高調波インターバルでエネルギーの集中が発生することです。低 EMI の「静粛な」クラス D アンプをつくるには、この周波数を前後に揺らす方法か、または、スイッチングのスペクトラムを拡散させて、スペクトル内のどの一点においてもエネルギーを低減させる方法があります。従来型のクラス D アンプと比べると、スペクトラム拡散変調方式には大きな利点がいくつかあります。効率および低 THD+N は維持される一方、放射ノイズおよび EMI を大幅に低減できます (Figure 6 を参照)。



• Fixed Frequency



• Spread Spectrum

FIGURE 6. Comparison of Fixed-Frequency and Spread-Spectrum Modulation

LM48511 は、スペクトラム拡散変調方式のクラス D オーディオ・アンプです。LM48511 は、昇圧型レギュレータも内蔵しており、これが電源電圧を 7V でアンプを駆動し、昇圧機能のないアンプに比べて、より大きなアンプ出力電力およびオーディオ・サウンド音圧レベルを実現します。昇圧型レギュレータ内蔵により、バッテリーなどのように電圧が減少する電圧源を使用する場合でも、一定の出力レベルを維持することができます。

LM48511 は、ロジックでオン / オフ可能な EMI を抑圧するスペクトラム拡散変調器を持っており、出力フィルタまたはチョークは不要です。スペクトラム拡散変調器はブリッジ接続されたスピーカを駆動する標準的な H ブリッジに入力します (Figure 7 を参照)。スペクトラム拡散モードでは、

スイッチング周波数が中心周波数 330kHz から約 10 パーセントの範囲内でランダムに変化し、スピーカとこれに接続されるケーブルやパターンから放射される EMI エミッションを低減します。固定周波数のクラス D アンプの場合、スイッチング周波数の何倍ものスペクトル・エネルギーがみられますが、LM48511 のスペクトラム拡散アーキテクチャでは、広い帯域にわたってエネルギーを拡散させ、回路内のピーク・ノイズ電力を低減します。

電磁波干渉はシステム・レベルでの課題であり、今日のオーディオ・エンジニアには、最良の設計手法および部品 / 材料の賢明な選択と合わせて、EMI を考慮に入れた設計が不可欠となっています。

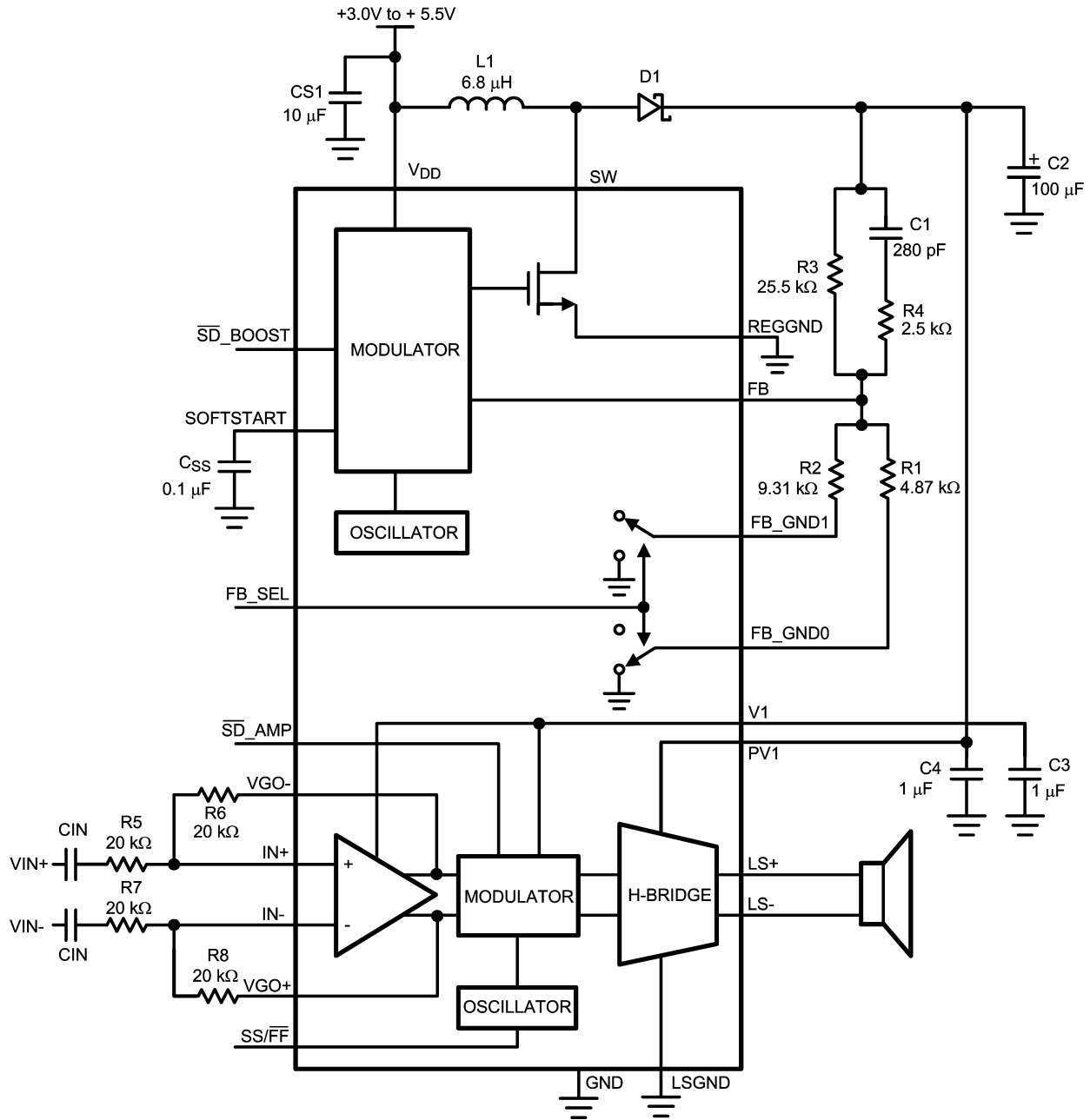


FIGURE 7. LM48511 — A Spread-Spectrum Modulated Class D Amplifier

参考文献

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

このドキュメントの内容はナショナル セミコンダクター社 (以下ナショナル) 製品の関連情報として提供されます。ナショナルは、この発行物の内容の正確性または完全性について、いかなる表明または保証もいたしません。また、仕様と製品説明を予告なく変更する権利を有します。このドキュメントはいかなる知的財産権に対するライセンスも、明示的、黙示的、禁反言による惹起、またはその他を問わず、付与するものではありません。

試験や品質管理は、ナショナルがナショナルの製品保証を維持するために必要と考える範囲に用いられます。政府が課す要件によって指定される場合を除き、各製品のすべてのパラメータの試験を必ずしも実施するわけではありません。ナショナルは製品適用の援助や購入者の製品設計に対する義務を負いかねます。ナショナルの部品を使用した製品および製品適用の責任は購入者にあります。ナショナルの製品を用いたいかなる製品の使用または供給に先立ち、購入者は、適切な設計、試験、および動作上の安全手段を講じなければなりません。

それら製品の販売に関するナショナルとの取引条件で規定される場合を除き、ナショナルは一切の義務を負わないものとし、また、ナショナルの製品の販売か使用、またはその両方に関連する特定目的への適合性、商品の機能性、ないしは特許、著作権、または他の知的財産権の侵害に関連した義務または保証を含むいかなる表明または黙示的保証も行いません。

生命維持装置への使用について

ナショナルの製品は、ナショナル セミコンダクター社の最高経営責任者 (CEO) および法務部門 (GENERAL COUNSEL) の事前の書面による承諾がない限り、生命維持装置または生命維持システム内のきわめて重要な部品に使用することは認められていません。

ここで、生命維持用の装置またはシステムとは (a) 体内に外科的に使用されることを意図されたもの、または (b) 生命を維持あるいは支持するものをいい、ラベルにより表示される使用方法に従って適切に使用された場合に、これの不具合が使用者に身体的障害を与えると予想されるものをいいます。重要な部品とは、生命維持にかかわる装置またはシステム内のすべての部品をいい、これの不具合が生命維持用の装置またはシステムの不具合の原因となりそれらの安全性や機能に影響を及ぼすことが予想されるものをいいます。

National Semiconductor とナショナル セミコンダクターのロゴはナショナル セミコンダクター社の商標または登録商標です。一部のブランドや製品名は各権利所有者の商標または登録商標です。

Copyright © 2007 National Semiconductor Corporation

製品の最新情報については www.national.com をご覧ください。

ナショナル セミコンダクター ジャパン株式会社

本社 / 〒 135-0042 東京都江東区木場 2-17-16 TEL.(03)5639-7300

技術資料 (日本語 / 英語) はホームページより入手可能です。

www.national.com/jpn/