

限界を超える：スマート オーディオ アンプでマイクロスピーカのサウンドを動的に増幅する方法

Supriyo Palit

Systems engineer, consumer audio amplifiers and haptics

Aditya Sundar

Systems engineer, consumer audio amplifiers and haptics

概要

薄型軽量のデバイスから大音量で臨場感あふれるサウンドを提供するのが難しいのは、マイクロスピーカが厳格なラウドネスシーリングに直面しているためです。高電圧によるボイス コイルの破損や振動版の損傷を防止するために、設計者は従来、スピーカの定格電力よりもかなり低くなるようピーク ボリュームに制限を設けていました。それによって、達成可能な音圧レベル (SPL) を制限していました。この制限は、Bluetooth デバイスやサウンドバーの大規模なスピーカにも影響します。スマート オーディオ アンプは、IV 検出を行う高精度 A/D コンバータ (ADC) フロント エンドと、リアルタイムの DSP や保護アルゴリズムを組み合わせ、このような課題に対応します。スマート アンプは、安全ゾーン内でスピーカを短時間、適切にオーバードライブすることにより、ハードウェアが真の物理的な限界に到達できるようにし、認識されるラウドネスを 8dB ~ 10dB 高め、より深い低音を実現します。

マイクロスピーカの脆弱性の物理学

標準マイクロスピーカは、磁場の中で吊り下げられ、ダイアフラム (またはコーン) に取り付けられ、サスペンション システムによって所定の位置に保持されたボイス コイルで構成されます。電気信号がコイルを通過すると、電磁力が発生してコーンを動かし、空気を振動させて音を出します。図 1 を参照してください。

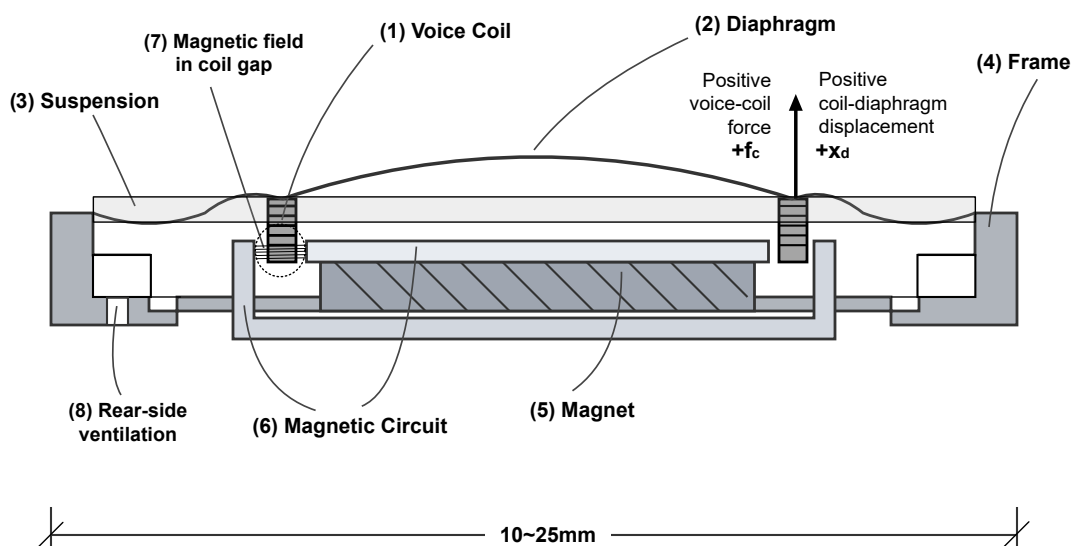


図 1. マイクロスピーカの構造

これらの超小型部品のオーディオ出力を大きくして、より大音量のサウンドを生成すると、熱過負荷と機械的過剰エクスカージョンという2つの重大な故障メカニズムが発生します。

熱の観点から見ると、ラウドスピーカは非常に非効率的であり、入力電気エネルギーの95%～99%はサウンドではなく熱になります。したがって、連続的な高電圧信号によって定格温度(T_{max})を超えてボイスコイルが押され、ワイヤの絶縁が溶けて電氣的短絡が発生する可能性があります。機械的には、大音量で低音を生成するには、大きなコーンのエクスカージョンが必要です。駆動電圧によって物理的な移動限度(X_{max})を超えてコーンが押された場合、弾性限度を超えてサスペンションが伸び、ボイスコイルが磁石のバックプレートに当たる(ボトムアウト)か、ダイアフラムが周囲から裂け、歪み、雑音、全体的な音響障害が引き起こされる可能性があります。

オーディオ設計に対する従来のアプローチとスマートなアプローチの比較

従来型のオーディオ設計では、安全性を確保するために、スピーカの連続定格電力でピークオーディオ電力を制限することができます。この静的電圧シーリングでは、信号全体が強制的に防御フロアに下げられ、結果的に音量が小さくなり、低温が弱くなります。

スマートアンプは、スピーカの状態を継続的に監視し、出力をリアルタイムで適応させます。スマートアンプは、ボイスコイルがどれだけ高温になっているかと、ダイアフラムが所定のミリ秒でどれだけ移動するかを正確に把握することで、従来のシステムではすぐに破壊されるような高電圧ピークでも、スピーカを安全に駆動できます。

スマートアンプアルゴリズムでは、ラウドネスが動的に変調され、8dB～10dB高いピークラウドネスSPLを実現するために、スピーカの推定エクスカージョンを X_{max} 以内に維持し、推定ボイスコイル温度を T_{max} 以内に維持します。このアルゴリズムは、スピーカがアクティブにリテラルブレークポイントに近付いたときのみエネルギーを引き戻します。図2を参照してください。

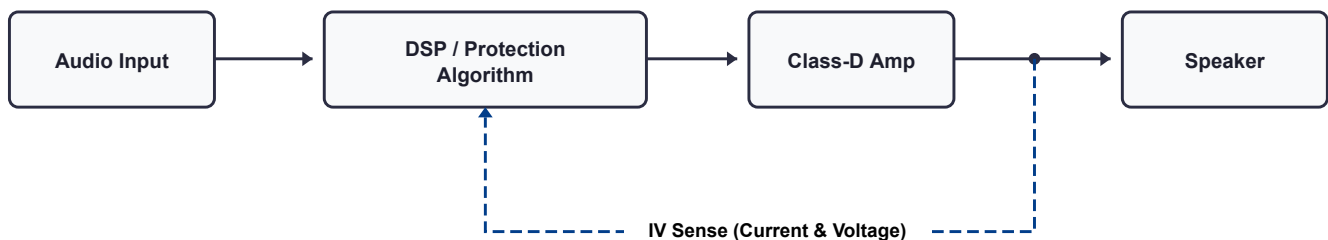


図2. スマートアンプシステムのアーキテクチャ

専用のセンシングハードウェアと、DSP上で動作する音響ソフトウェアモデルを組み合わせると、リアルタイム帰還ループが形成され、アンプはその場で出力を調整することができます。

内蔵IVセンス回路

スマートアンプは、電流および電圧(IV)センス回路を利用しています。内蔵A/Dコンバータ(ADC)が、スピーカに印加された正確な電圧と、その電圧から引き込まれる正確な電流をキャプチャした後、システムでスピーカの電氣的インピーダンス($Z = V/I$)がリアルタイムに計算されます。温度と機械的な動きに起因するダイナミックインピーダンスの変化により、保護アルゴリズムに対する生のセンサ入力が可能になります。

アンプを通して再生されるフルスケールのオーディオ信号を確実に検出できるように、ADCの変換範囲が設定されます。高精度ハードウェアにより、スピーカのラウドネスを最大限に活用できます。電流または電圧の検出誤差は、ラウドネスに直接影響します。これは、スピーカ保護アルゴリズムが X_{max} および T_{max} の制限値から逸脱しないように、はるかに多くのエラーガードバンドを必要とするためです。

通常の $\pm 0.35\%$ の誤差である場合、IV センシングによりボイス コイルの温度推定で $\pm 1^\circ\text{C}$ の誤差が発生します。TI の **TAS2781**、**TAS2783**、**TAS2573** の各 ADC は、IV センシングで高精度を実現しているため、温度やエクスカージョンに対するガード バンド要件が最小限に抑えられます。信号対雑音比 (SNR) とダイナミックレンジ (DNR) が高いため、検出誤差を回避し、スピーカを通して高音質のオーディオ コンテンツを再現することができます。図 3 を参照してください。

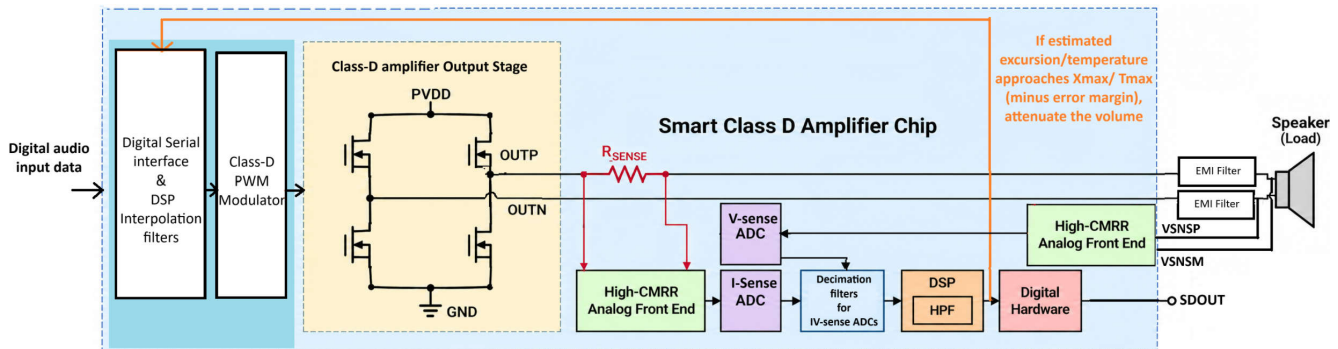


図 3. スマート アンプ内のハードウェアとソフトウェアの連携

デバイスの VSNSP ピンと VSNSN ピンは、スピーカの両端の電圧を検出します。これらは、正確な測定を保証するためにスピーカ端子のできるだけ近くに接続する必要があるセンス ラインです。

Class-D アンプのスピーカの両端の電圧は高電圧スイッチング ノードであるため、IV センス ADC には、スイッチング電圧からオーディオ コンテンツを抽出し、高精度センシング用に高電圧を低電圧に変換するために、同相信号除去比の高いアナログ フロント エンド回路が必要です。シグマ デルタまたは逐次比較型 ADC 回路は、この低電圧オーディオ コンテンツを検出して高精度の IV 情報を抽出します。ADC 出力は通常、3MHz のように、はるかに高い周波数です。これは、高い SNR と DNR を実現するためにデータ ADC がオーバーサンプリングされるためです。ADC 出力データはオーディオ レート (48KSPS) までデシメーションされ、DC コンテンツ (存在する場合) はハイパス フィルタ処理されて除去されます。その後、TAS2781、TAS2783、TAS2573 の内蔵 DSP で実行される SmartAmp アルゴリズムで使用されます。

I および V オーディオ チャネルを高精度、つまり $\pm 1\mu\text{s}$ 未満の範囲で位相整合させているので、スピーカのインピーダンスを高精度でリアルタイムに推定できます。IV センス データは、ユーザーが監視して、TDM SDOUT ピンまたは Soundwire データ インターフェイス経由で出力することもできます。

DSP はスマート アンプの頭脳です。このデバイスは、スピーカ保護アルゴリズムをホストし、ラウドスピーカの複雑な数学モデルとリアルタイム予測フィルタを実行します。DSP は門番の役割を果たし、IV センス ハードウェアから提供される遠隔測定に基づいて、受信するデジタル オーディオ ストリームを即座に変更します。

スマート アンプを正しく動作させるには、駆動している特定のラウドスピーカに合わせてキャリブレーションする必要があります。オーディオ エンジニアは、専用の診断ツールを使用して、音響チャンバー内の対象となるマイクロスピーカの特性を評価します。これらのデバイスは、熱抵抗 (R_{θ})、共振周波数 (f_0)、機械的ダンピング (Q_{ms})、磁気強度 (BI) を測定します。DSP にこれらのパラメータのプログラミング (設定) を行うと、スピーカはカスタマイズ済みの安全エンベロープを作成するためのモデルとして機能します。TI の PurePath™ Console 3 オーディオ ツールキットは、キャリブレーション、モデリング、エンドシステム チューニングをサポートします。f

温度保護アルゴリズム

スマート アンプの熱保護は、金属導体の電気抵抗が温度に応じて予測可能な状態で変化するという物理法則に依存しています。これを抵抗の温度係数 (α) と呼びます。

ボイス コイルの温度が上昇すると、 R_E は直線的に増加し、スマート アンプの IV センス ハードウェアは測定したインピーダンスからこの抵抗を分離します。**式 1** ではコイルの内部温度を算出できます。

$$R_{dc}(T) = R_E(T_0)[1 + \alpha(T - T_0)] \quad (1)$$

ここで、 $R_E(T)$ は現在の時間 T で測定された抵抗、 $R_E(T_0)$ は工場でのキャリブレーションによるベースライン抵抗、 α はコイル材料の抵抗の温度係数です (銅など)。

これにより、大きく応答の遅い物理サーミスタは不要になります。

この測定は、連続ストリームではなくチェックポイント読み取りであり、2 つの理由のため、定期的に行われます。その理由は、出力レベルが低いとき、または低電力から大電力への遷移 (ノイズ制約のある信号、セトリング誤差、オフセット) 時には信頼性が低いこと、センス ADC とそのアナログ フロント エンドを継続的に動作させると、特にバッテリー駆動の低容量リスニングで不要な電力が消費されることです。

熱のモデル化と制御

R_E の測定値は定期的にしか到着しないため、アルゴリズムには測定間のギャップの中で、ボイス コイルの温度を継続的に把握する方法が必要です。このソリューションは、予測熱モデル、つまり多段抵抗とコンデンサの熱ネットワークです (図 4 を参照)。このモデルは、ボイス コイルからスピーカの磁石構造へ、そして最終的にデバイスのシャーシと周囲の空気への熱伝達をシミュレートします。これは、制御ループの全レートで動作します。新しい IV センス ベースの R_E 読み取り値が到着するたびに、モデルが再固定され、最後のチェックポイント以降に蓄積されたドリフトが補正されます。

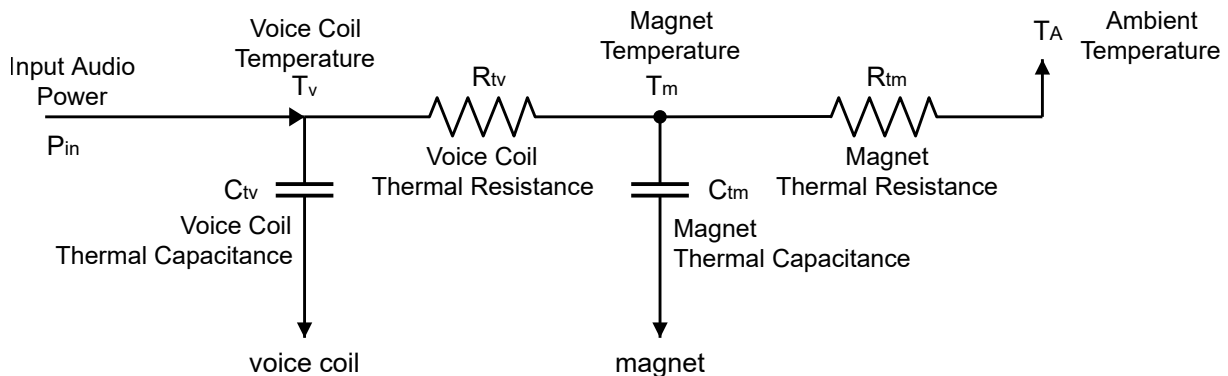


図 4. ラウドスピーカの予測熱モデル

この方法で放熱経路を追跡することで、アルゴリズムは、今後のオーディオ ピーク時に温度が上昇する速度と、一時停止中に温度が低下する速度を予測できます。この推定値は、オーディオ信号の安全な動作限度を継続的に、中断なしで強制適用するパワー コントローラに供給されます。ボイス コイルの推定温度がラウドスピーカの T_{max} に近づく、コントローラはラウドスピーカを過熱から保護するため、許容限度を下げます。ソフト オーディオ セグメント中にラウドスピーカが冷却されると、コントローラによってラウドスピーカへのより高い電力供給が許可されます。

熱保護アルゴリズムは、熱コントローラで予測された電力制限に基づいてオーディオ信号を制御し、スムーズで広帯域のゲイン低減を適用して、スピーカに供給される総実効値 (RMS) 電力を低減することで、音量を急激に降下させずにボイス コイルが冷却されるようにします。このゲイン低減では、低速のアタック時間とリリース時間を使用します。人間の聴覚は音量全体の段階的な変化にあまり敏感でないため、減衰はバックグラウンドにシームレスに融合され、知覚される音声のダイナミクスが維持されます。[図 5](#) を参照してください。

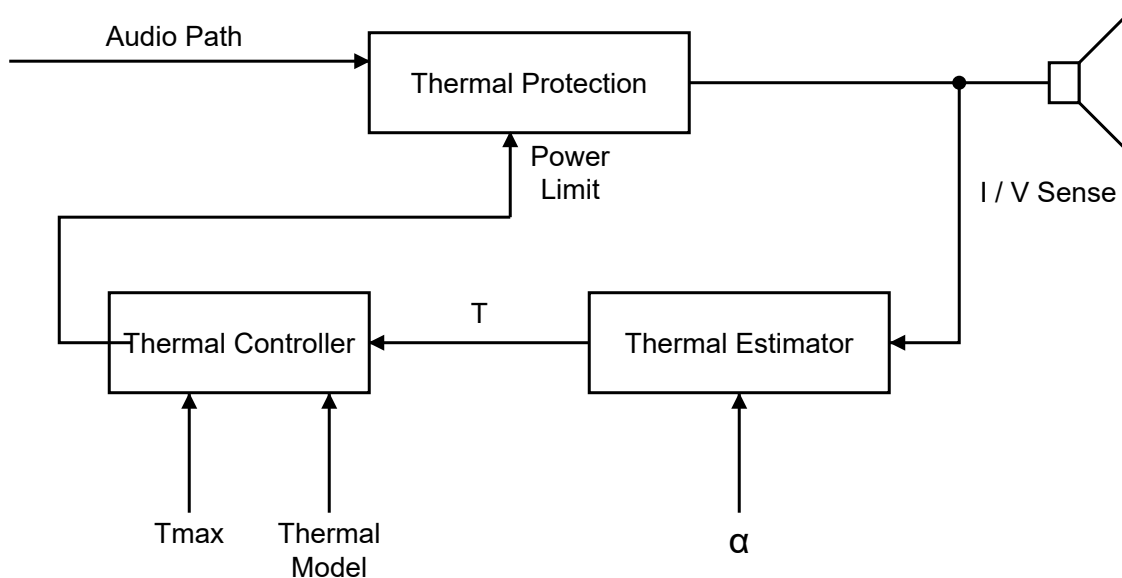


図 5. 閉ループの温度保護

[図 6](#) で、青の曲線はスマート アンプの推定温度、赤の線は T_{max} の限度を示しています。アンプはオーディオを動的に変調し、スピーカが常に信頼性の高い温度制限内に収まるようにします (IV のセンシング誤差のためのヘッドルームを確保)。

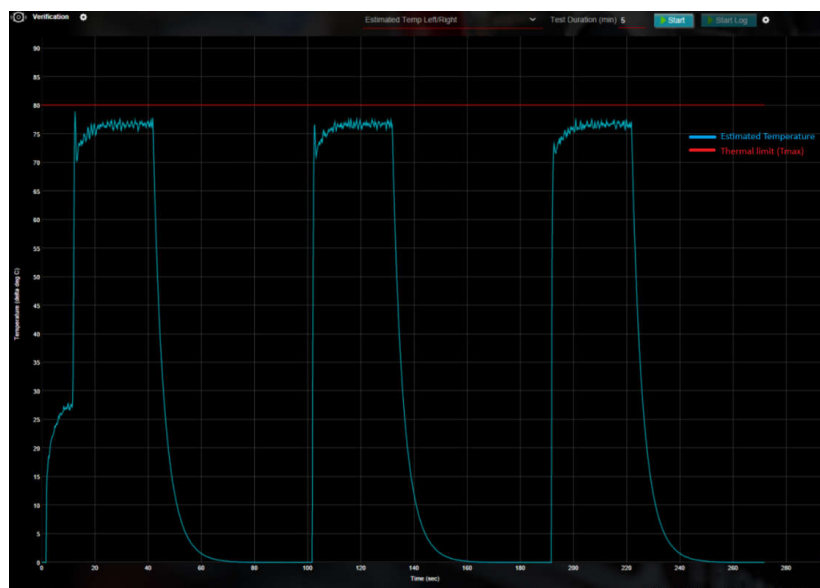


図 6. スマート アンプの温度推定と、 T_{max} 限度の関係

エクスカッション保護アルゴリズム

低速で移動する熱質量と RMS 電力を処理する熱保護とは異なり、エクスカッション保護は揮発性が高くなります。スピーカ コーンは、1 回の波形サイクル内で、数分の 1 ミリ秒という時間で静止状態から最大過剰エクスカッションまで移動できます。

物理的なレーザー変位センサをスマートフォン内に配置してスピーカ コーンの動きを追跡することは不可能なため、スマート アンプではスピーカの力学の数学的シミュレーションが使用されます。これは、Thiele-Small パラメータとトランスデューサの線形状態空間モデルに基づいています。図 7 と表 1 を参照してください。

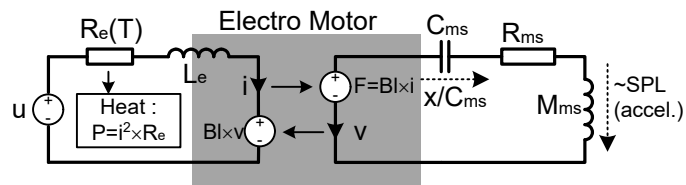


図 7. ラウドスピーカの起電力モデル

起電力パラメータ	説明
R _{ms}	機械的減衰係数
M _{ms}	機械質量
C _{ms}	機械的コンプライアンス
Bl	力率
R _E	ボイス コイルの DC 抵抗
L _E	ボイス コイルのインダクタンス
u	アンプの電圧
i	ボイス コイルの電流
v	膜の速度
F	磁界内の機械的力
x	磁気エクスカッション変位

表 1. スピーカの起電力モデルの主要パラメータ

このアルゴリズムは、電流と電圧のリアルタイム データを使用して、スピーカの動きによって生成される逆起電力を計算します。逆起電力データを「デジタル ツイン」スピーカ モデルと組み合わせると、DSP は正規化された最小 2 乗フィルタなどのオブザーバ ループを実行して、モデルをリアルタイムで更新します。スピーカ モデルは、エクスカッション予測の電圧対エクスカッション フィルタ (式 2) を使用して、コーンの瞬時物理変位 (x) を計算するために使用されます。

$$Z_{exc} \left(s \right) = \frac{X(s)}{V(s)} = \frac{Bl}{M_{ms}R_E} \times \frac{1}{s^2 + s \times \left(\frac{R_{ms} + \frac{Bl^2}{R_E}}{M_{ms}} + \frac{1}{M_{ms}C_{ms}} \right)}$$

(2)

ルックahead リミッタ

低周波のバストランジェント (スネアドラムのヒットやムービー内の爆発など) が X_{max} を超えてコーンを押す恐れがある場合、エクスカッション保護アルゴリズムは迅速で対象を絞った対策を展開します。短いデジタル遅延バッファ (通常は数ミリ秒) を使用する

と、DSP はアンプ段に達する前に危険なピークを検出できるため、アルゴリズムではその特定の波形サイクルに正確な瞬時ピーク減衰を適用する時間が得られます。図 8 を参照してください。

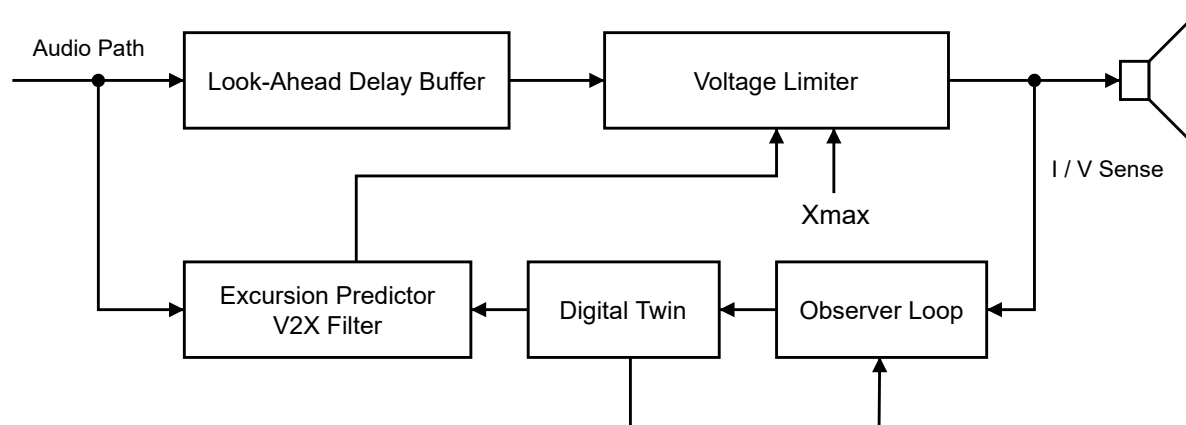


図 8. 閉ループのエクスカージョン保護

図 9 で、青の曲線はスマート アンプの推定エクスカージョンを表し、赤の線は X_{max} 制限を表しています。アンプはオーディオを動的に変調し、スピーカが常に信頼できるエクスカージョン制限内に収まるようにします。

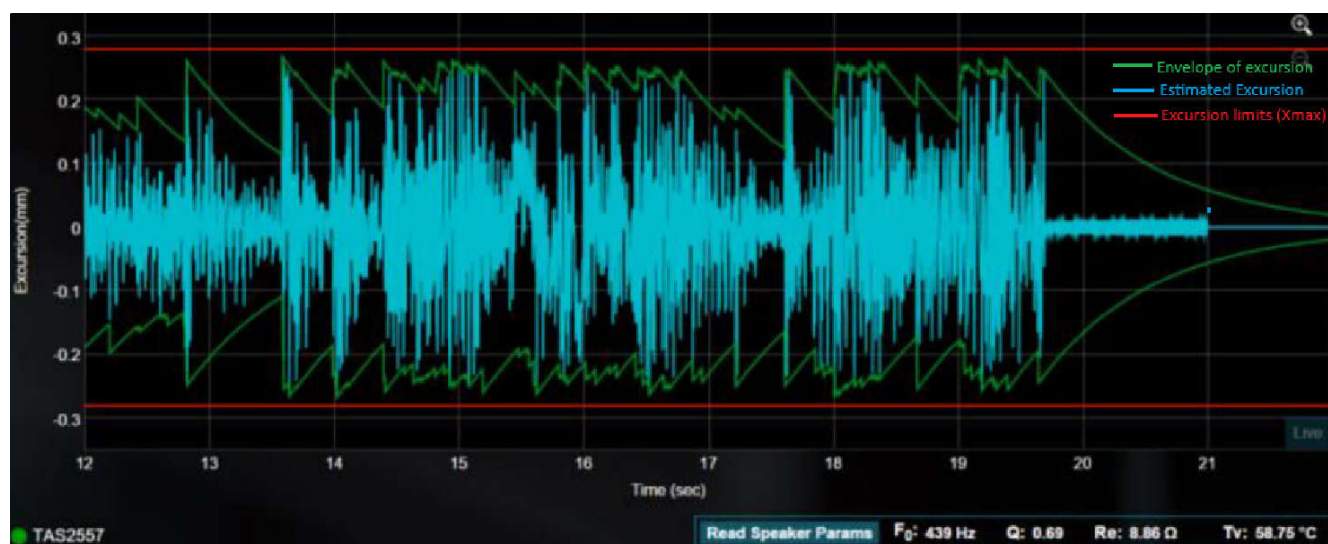


図 9. X_{max} 値を基準としたリアルタイムのエクスカージョントラッキング

オーディオ チューニング チェーンの統合

従来のオーディオ設計では、マイクロスピーカの安全性を確保するための強力な制限ツールとしてイコライザ (EQ) とダイナミックレンジ コンプレッサ (DRC) を使用していたのに対して、スマート アンプのパラダイムでは、オーディオ信号チェーンを真に芸術的にチューニングすることができます。たとえば、チューニング エンジニアはパラメトリック EQ を使用して、積極的に低周波を高め (低音の拡張)、スマートフォンの小さなスピーカをはるかに大きな音響装置のように鳴らすことができます。EQ は、応答ピークをフラット化して、音声の明瞭さを最適化することもできます。

また、スマート アンプは、保護モデルと整合性のあるマルチバンド DRC を使用して、オーディオを個別の低帯域、中帯域、高帯域に分割します。設計者は、中帯域と高帯域を最適化して、最大の知覚ラウドネス、鮮明な対話、広い空間イメージングを実現でき

ます。低帯域は、コーンの実際の物理的変位に基づいて最適な低音応答を提供するため、エクスカーシオン モデルと緊密に結合されます。

スマート アンプは、スピーカ出力を安全に最大化することでラウドネスと周波数応答を強化し、ハードウェアの性能、設計、および信頼性を高めます。具体的なメリットは次のとおりです。

- 低周波数応答の拡張: 静的ハードウェア フィルタで低音を永続的にロールオフにする代わりに、スマート アンプはインテリジェントなスライディング低音拡張方式を採用しています。音量が小さい場合、低音はより低い周波数に深く広がります。音量が増加すると、ルックアヘッド リミッタは過剰エクスカーシオンを防ぐために必要なだけ作動し、すべての音量レベルで可能な限り最大の低音のプレゼンスを維持します。
- 成分の最適化と空間の節約: 保護についてはソフトウェアで対応されるため、製品設計者は小型で薄型のスピーカ モジュールを調達し、より大型のバッテリー、高度なカメラ センサ、またはスリムな製品プロファイルのために狭いデバイス筐体内のスペースを解放することができます。
- 現場のリターン率がほぼゼロ: 焦げたボイス コイルや裂けたダイアフラムに対する信頼性の高いデジタル シールドとして機能することで、スマート アンプでは、ハードウェア障害を大幅に削減し、保証サポートや現場での返品請求のコストを数百万も節約することができます。

図 10 にラウドネスと周波数応答の比較において、スマート アンプと従来のアンプを比較したものを示します。

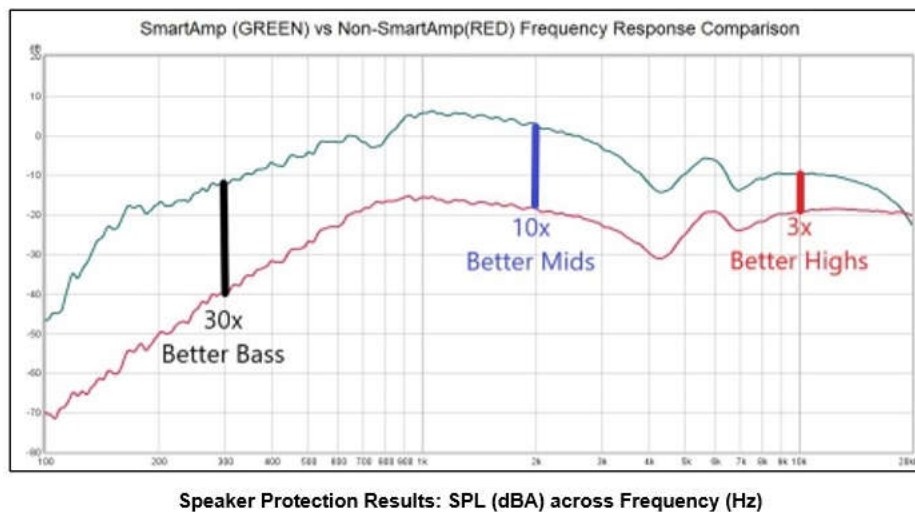


図 10. スマート アンプと従来の非スマート アンプのラウドネスおよび周波数応答の比較

まとめ

スマート アンプは、パッシブな安全マージンを、ハードウェアとソフトウェアで共同駆動するアクティブな監視機能に置き換えることで、脆弱なマイクロ音響と消費者が求める強力で高音質のサウンドの間のギャップを埋めます。電流と電圧のリアルタイム センシング、非線形の熱と機械のモデリング、オーディオ エンジニアリングを通じて、これらのシステムはマイクロスピーカを絶対物理的境界まで押し上げることに成功しました。その結果生まれたのが、コンポーネントの信頼性を維持しながら、非常に大きく、豊かで、完全に聞こえるスマートフォン、ラップトップ、スマートハウス デバイスです。

著者について

Aditya Sundar は、コンシューマ オーディオ アンプとハプティクス製品を担当するシステム エンジニアで、テキサス インストルメンツで 11 年以上従事してきました。以前は、アナログ設計マネージャを務めていました。ゴアのビルラ工科大学で電子工学と計測工学の学士号を取得しています。専門はミックスド シグナル Class-D オーディオ信号チェーンの設計で、ミックスド シグナル昇圧 Class-D オーディオ アンプ、ピエゾドライバ、ラウドスピーカ保護技術に幅広く対応しています。

Supriyo Palit は、テキサス インストルメンツのコンシューマ オーディオ アンプおよびハプティクス製品のシステム エンジニアです。この業界で 30 年の経験があり、当社では 27 年以上にわたり従事してきました。彼はバンガロールのインド理科大学院で電気通信の学位を取得しています。担当業務は、オーディオ信号処理、ラウドスピーカ保護技術、オーディオ パワー マネージメント、ハプティクス、音声アルゴリズムです。

謝辞

著者は、この記事の作成にあたり、Vallabha Hampiholi、Nilendra Gadre、Michael Kim、Jasjot Chadha、Mashkurahmed Badebade 諸氏による技術面での貢献に感謝します。

その他の資料

- こちらの [CES 2015 のスマート アンプに関するプレゼンテーション](#)をご確認ください。
- アプリケーション レポート『[Smart Amp Tuning Guide](#)』、『[Smart Amp Quick Start Guide](#)』、および『[Getting Started with Smart Amp Development](#)』をご覧ください。

重要なお知らせ:ここに記載されているテキサス・インストルメンツ社および子会社の製品およびサービスの購入には、TI の販売に関する標準の使用許諾契約への同意が必要です。お客様には、ご注文の前に、TI 製品とサービスに関する完全な最新情報のご入手をお勧め致します。TI は、アプリケーションに対する援助、お客様のアプリケーションまたは製品の設計、ソフトウェアのパフォーマンス、または特許の侵害に対して一切責任を負いません。ここに記載されている他の会社の製品またはサービスに関する情報は、TI による同意、保証、または承認を意図するものではありません。

PurePath™ is a trademark of Texas Instruments.
すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

重要なお知らせと免責事項

TI は、技術データと信頼性データ (データシートを含みます)、設計リソース (リファレンス デザインを含みます)、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Web ツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の黙示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含みいかなる保証も、明示的または黙示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、TI 製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1) お客様のアプリケーションに適した TI 製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとし、TI は一切の責任を拒否します。

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されている TI 製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、TI はその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。TI や第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、TI およびその代理人を完全に補償するものとし、TI は一切の責任を拒否します。

TI の製品は、[TI の販売条件](#)、[TI の総合的な品質ガイドライン](#)、[ti.com](https://www.ti.com) または TI 製品などに関連して提供される他の適用条件に従い提供されます。TI がこれらのリソースを提供することは、適用される TI の保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。TI がカスタム、またはカスタマー仕様として明示的に指定していない限り、TI の製品は標準的なカタログに掲載される汎用機器です。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案する場合も、TI はそれらに異議を唱え、拒否します。

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

最終更新日：2025 年 10 月