

Application Note

車載アプリケーション向けの INA1650-Q1 をベースとする大出力電力 Hi-Fi ヘッドホン アンプの設計上の検討事項



Mason Chen

概要

このアプリケーション ノートでは、車載オーディオ システム向けに特別に設計された INA1650-Q1 をベースとしたヘッドホン アンプの設計について説明します。このソリューションは、オンボード ヘッドホン機能の実際的な要件を満たしており、乗員専用のオーディオやノイズフリーの車内オーディオ環境などのシナリオに適しています。低感度のヘッドホンを効果的に駆動し、十分なボリュームを確保するために、アンプは幅広いヘッドホン負荷インピーダンスで十分な出力電力を供給する必要があります。設計上の重要な課題は、電源出力要件の競合に起因しています。ハイインピーダンスのヘッドホンを駆動するには、より高いアンプ出力電圧 (つまり、高い電源電圧) が必要ですが、ローインピーダンスのヘッドホンに同等の電力を供給するには、はるかに大きな出力電流が必要です。この課題は、単一の INA1650-Q1 の 2 つのチャンネルを並列接続して出力電力を増幅することで効果的に解決され、車載オーディオ システムの厳格な仕様に準拠した、安定した高性能のオーディオ増幅が可能になります。

目次

1 概要.....	2
2 車載 Hi-Fi ヘッドホン オーディオ システムの概要.....	3
2.1 車載 Hi-Fi オーディオ システムの主な技術仕様.....	4
2.2 車載 Hi-Fi ヘッドホン オーディオ システムの設計要件.....	5
3 車載 Hi-Fi ヘッドホン オーディオ システムの動作原理と回路設計.....	6
3.1 DAC 回路設計.....	6
3.2 差動からシングルエンドへの回路設計.....	7
4 シミュレーション.....	9
4.1 過渡応答シミュレーション.....	9
4.2 ノイズ解析.....	10
4.3 消費電力のシミュレーションと熱に関する計算.....	11
5 実験テスト.....	12
6 まとめ.....	17
7 参考資料.....	18

商標

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

1 概要

車載インフォテインメントシステムの継続的なアップグレードに伴い、オンボードのヘッドホン機能は、ニッチな機能から、現代の車両に求められる実用的で需要の高い必須機能へと進化してきました。乗員は多くの場合、ドライバや他の同乗者に迷惑をかけずに、音楽を楽しんだり、映画を鑑賞したり、音声通話に参加したりするなど、パーソナライズされたオーディオ体験を求めています。そのため、オンボードヘッドホンコネクティビティは、ユーザーを中心とする車載設計にとって重要な部品となっています。

ただし、低感度のヘッドホンを駆動する場合は難しい問題が発生します。なぜなら、十分な音量レベルを達成するのに一定レベルの出力電力が必要になるためです。このため、車載ヘッドホンアンプには固有の技術的課題、すなわち、さまざまなヘッドホン負荷インピーダンスに対応しつつ、一定の電力出力を維持するという課題が存在します。ハイインピーダンスヘッドホンの場合、必要な電力を供給するために、アンプは高い出力電圧を生成する必要があります。そのため、電源電圧範囲に対する要求が大きくなります。逆に、ローインピーダンスのヘッドホンは、同じ電力レベルを達成するために、アンプからより高い出力電流を必要とし、デバイスの電流駆動能力が試されます。従来のアンプ設計は多くの場合、これら2つの要件をバランス良く両立するのが難しく、オーディオ性能の低下や、異なる種類のヘッドホンとの互換性の低下につながっていました。

INA1650-Q1 は高性能の車載グレードアンプであり、これらの課題に正面から取り組むように設計されています。このレポートでは、INA1650-Q1 をベースとするヘッドホンアンプ設計の設計原理、回路実装、性能検証を詳細に取り上げ、多様な負荷条件で安定した高品質のオーディオ出力を供給し、車載アプリケーションの厳しい信頼性と性能基準を満たす能力を実証します。



図 1-1. 車載対応 3.5mm ヘッドホン ジャック

2 車載 Hi-Fi ヘッドホン オーディオ システムの概要

Hi-Fi (ハイファイ) とは、オリジナルのオーディオ ソースに対して高品質な再生または最高の忠実度で再生されるサウンドを指します。理想的には、Hi-Fi オーディオ デバイスは、人間の耳には感知できないほど低いノイズと歪みしか発生しないレベルを実現できます。一般的な Hi-Fi オーディオ システムのブロック図の図 2-1 が示すように、Hi-Fi デバイスは D/A コンバータ (DAC) の差動出力電圧をシングルエンド電圧に変換して、ローインピーダンスのヘッドホンを駆動できるようにします。差動シングルエンド コンバータを使用して、ヘッドホン駆動用に差動信号をシングル エンド信号に変換します。

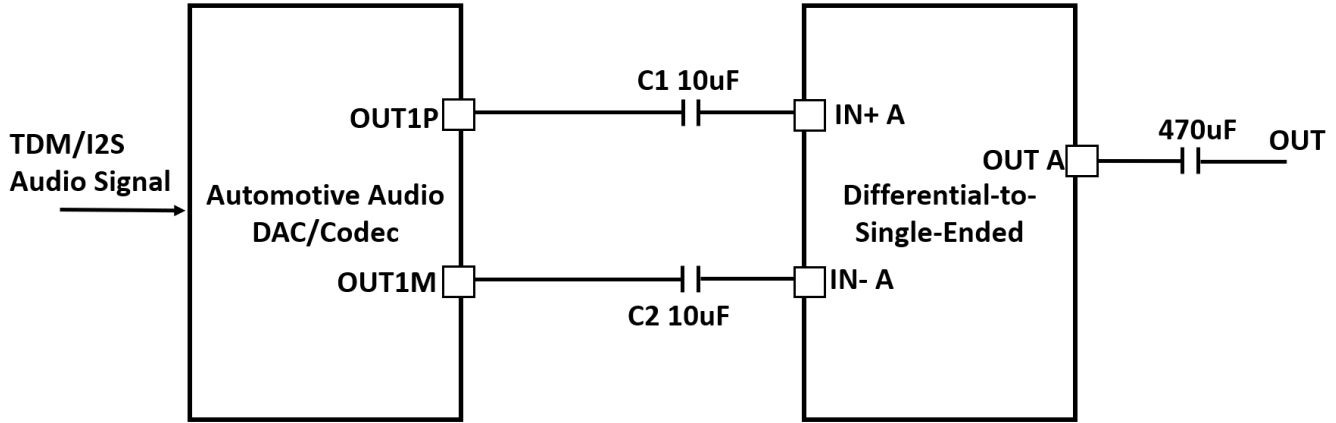


図 2-1. 車載 Hi-Fi オーディオ システムのブロック図

ほとんどのコンシューマ グレードのヘッドホンはシングルエンド設計 (3.5mm/6.35mm インターフェイスで、1 つの信号路 + グランド配線のみ必要) です。シングルエンド モードには、AC 結合モードと DC 結合モードがあります。ただし、シングル エンド DC 結合モードには、DC 同相電圧が含まれます。この場合、消費電力が大きくなるため、DC 結合のシングル エンド モードは推奨しません。シングル エンド AC 結合モードは、ヘッドホン アプリケーション用に適しています。シングル エンド AC 結合モードで動作する場合は、AC カップリング コンデンサを慎重に選択する必要があります。このコンデンサは、負荷とともにハイパス フィルタを形成し、その値がオーディオ周波数応答に大きな影響を及ぼします。コンデンサの値が小さいと、オーディオ周波数が低く減衰し、低音応答が損失します。このため、目的のオーディオ周波数範囲を維持しながら、DAC 出力からの DC バイアスをブロックするには、大きな AC カップリング コンデンサが必要です。

$$F_C = \frac{1}{2 \times 3.14 \times C \times Z_{load}} \quad (1)$$

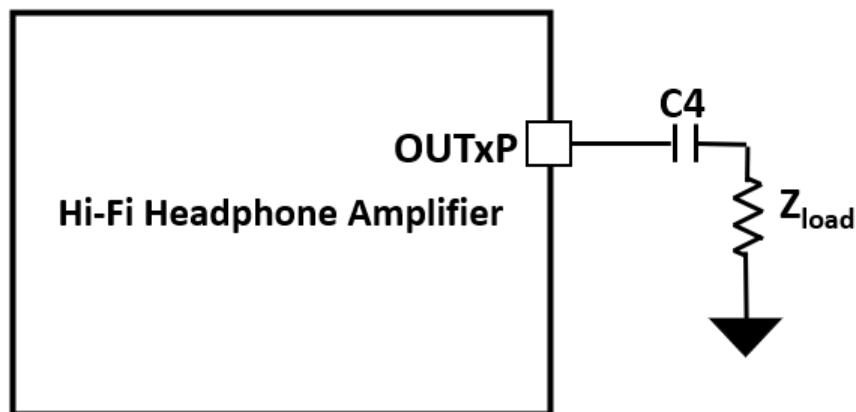


図 2-2. DC 結合差動マイク入力ハードウェアの設計

ヘッドホン / ヘッドセット (32Ω) アプリケーション向け: $\geq 470\mu\text{F}$ を使用して、 $f_c = 10\text{Hz}$ を維持します。

2.1 車載 Hi-Fi オーディオ システムの主な技術仕様

車載 Hi-Fi オーディオ システムの主な技術仕様として、信号対雑音比 (SNR) や全高調波歪み + ノイズ (THD+N) があります。

信号対雑音比 (SNR) は、同じ基準ポイントにおけるオーディオ デバイスの出力ノイズ電力に対する出力信号電力の比として定義されます。この比は、式 (2) に示すように、一般にデシベル (dB) で表されます。この式で、 P_{signal} は出力信号電力を表し、 P_{noise} は出力ノイズ電力を表します。SNR 値が高いほど、オーディオ信号に重畳されるノイズのレベルが低くなり、再生品質が高くなります。その逆も同様です。車載 Hi-Fi オーディオ システムでは、SNR 仕様は通常、105dB を上回る必要があります。

$$NR(\text{dB}) = 10 \log \left(\frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{noise}}} \right) \quad (2)$$

全高調波歪み + ノイズ (THD+N) は、オーディオ再現品質の特性を評価するための重要な性能パラメータであり、その予測値は式 3 で計算できます。ここで、 V_n は合計出力ノイズ電圧の RMS 値、 V_f は基本周波数出力電圧の RMS 値を表します。オーディオ システムの THD+N 性能は、高品質オーディオ信号ソース、超低ノイズおよび超低歪みの DAC、オペアンプ、超低ノイズ電源、最適化された PCB レイアウトおよび配線など、さまざまな設計要素によって決まります。車載 Hi-Fi オーディオ システムの場合、標準仕様では 0.001% 未満の THD+N が求められます。式 3 には、THD+N が数学的に基本周波数の電力と合計した高調波電力の測定値との比として定義されることが示されています。

$$THD + N(\%) = 100\% \times \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^{\infty} (V_i^2 + V_n^2)}{V_f^2}} \quad (3)$$

ここで、

基本波の i 次高調波の RMS 電圧 ($i = 2, 3, 4 \dots$)

回路の V_n RMS ノイズ電圧

基本波の V_f RMS 電圧

さらに、車載アプリケーションでは、チップの電磁干渉 (EMI) 性能に関して厳格かつ詳細な要件が課されます。主な要件は、国際規格や業界規格への準拠、自動車の複雑な電磁環境への対応です。車載チップは通常、85°C の周囲温度で動作する必要があります。したがって、Hi-Fi システムで採用されているデバイスの EMI 性能と熱特性を設計で考慮する必要があります。自動車は一般に 12V バッテリから電力を供給されます。そのため、TI は、ユニポーラ電源構成では、Hi-Fi システムの電源電圧を 12V 未満にすることをお勧めします。

2.2 車載 Hi-Fi ヘッドホン オーディオ システムの設計要件

車載アプリケーション向けの、Hi-Fi ヘッドホン オーディオ システムの設計要件は以下のように規定されています。

表 2-1. 設計目標

電源電圧	<12v
THD+N (1kHz/32Ω)	0.001% 未満
最大出力電力	100mW

低感度ヘッドホンに十分な音量を確認するには、全レンジの負荷条件にわたって大きな出力電力を供給できるヘッドホンアンプが必要です。これには、設計上の課題があります。ハイインピーダンスのヘッドホン負荷に特定の電力を供給するには、より高いアンプ出力電圧（つまり、高い電源電圧）が必要ですが、ローインピーダンスのヘッドホンに同等の電力を供給するには、著しく大きなアンプ出力電流が必要です。

出力電力の制限

オペアンプ (OP アンプ) の出力電力は、複数の要因によって制限されます。ハイインピーダンス負荷の場合、オペアンプのスルーレートとフルパワー帯域幅が主な制限要因になります。フルパワー帯域幅は、オペアンプが大きな歪みなしに最大出力電力を供給できる周波数範囲です。ローインピーダンス負荷の場合は、オペアンプの出力電流制限が支配的な制約になります。さらに、電流制限は熱の影響を受けます。オペアンプ内部の消費電力が大きくなると、オペアンプの接合部温度が上昇します。これにより、電流制限が減少し、オーディオの歪みが増加します。

この問題は、比較的高い電源電圧でローインピーダンス負荷を駆動する場合に特に顕著です。ローインピーダンス負荷に必要な大出力電流は、急激かつ過剰な消費電力につながり、使用可能な出力電力が大幅に制限されるためです。

出力電力の拡張

ローインピーダンス ヘッドホンに供給される電力は、低い電源電圧を使用することで増加できます。これにより、オペアンプの消費電力が低減されます。ただし、一部のアプリケーションでは、電源電圧が低下すると、ハイインピーダンス ヘッドホンへの電力供給が大幅に劣化するため、実用的な設計にならない場合があります。電力定格の高い車載オペアンプを選択すると、消費電力の影響が軽減されます。とは言え、多くのアプリケーションでは、INA1650-Q1 などの低消費電力オペアンプの優れた性能に多くの利点があります。その場合は、オペアンプの 2 つのチャンネルを並列接続することで、必要な出力電力を供給できます。

ほとんどの一般的なコンシューマ グレードのヘッドホンの電力要件は 10mW ~ 100mW の範囲にあり、ほとんどのユーザーの日常的なリスニング ニーズを満たすことができます。この設計は、さまざまなヘッドホン モデルを駆動するのに十分な値である 100mW という最大電力要件を考慮して最適化されています。この設計では、ポータブル オーディオ ヘッドホンの標準インピーダンス値である、32Ω のヘッドホン インピーダンス RHP が採用されています。したがって、32Ω ヘッドホンに必要な出力電圧は、次のように計算できます。

$$V_o = \sqrt{P_{IN} \times R_{HP}} = \sqrt{100mW \times 32} = 1.789V_{RMS} \quad (4)$$

3 車載 Hi-Fi ヘッドホン オーディオ システムの動作原理と回路設計

車載ハイファイ ヘッドホン アンプの設計における厳格な性能要件を踏まえて、差動出力機能を備えた DAC を選択しています。専用オーディオ アンプ INA1650-Q1 は、DAC からの差動電圧出力をシングルエンド電圧に変換し、その結果として得られるシングルエンド信号によってヘッドホン負荷が駆動され、オーディオ出力が生成されます。

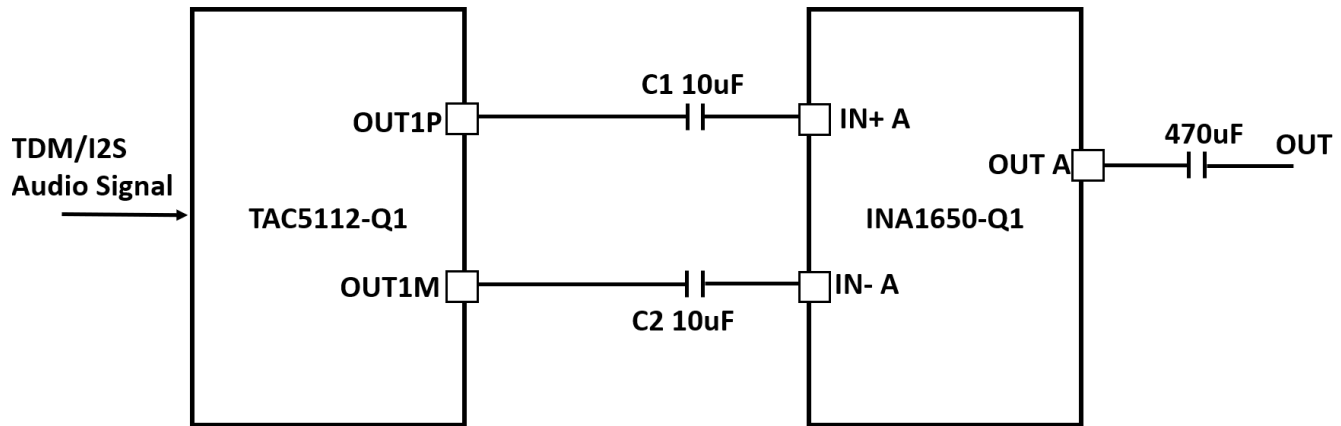


図 3-1. 車載 Hi-Fi ヘッドホン アンプの概略回路図

3.1 DAC 回路設計

TI は、車載アプリケーション向けの TAx5x1x-Q1 シリーズを提供しています。このシリーズは車載グレード高性能オーディオの ADC/DAC/コーデック デバイス ファミリーであり、3 つの主要なサブファミリーが含まれます。主要サブファミリーである TAC、TAA、TAD は、モノラルとステレオの両方のオーディオ構成に対応しています。これらのデバイスは、複数のアナログ入出力チャンネル、高い信号対雑音比 (SNR)、低い全高調波歪み + ノイズ (THD+N) など豊富な機能を内蔵し、各種オーディオフォーマットをサポートしており、車載インフォテインメント、ANC/RNC、eCall、その他の車載オーディオアプリケーション用に設計されています。

このシリーズに含まれる TAC5212-Q1 は車載対応の高性能オーディオ DAC であり、2Vrms の差動出力とステレオチャンネルで 114dB のダイナミックレンジ、クワッドチャンネルで 107dB のダイナミックレンジを持つ 1Vrms のシングルエンド出力を備えています。このデバイスは差動とシングルエンドの両方の入出力構成をサポートしているため、車載オーディオシステムに柔軟に統合できます。

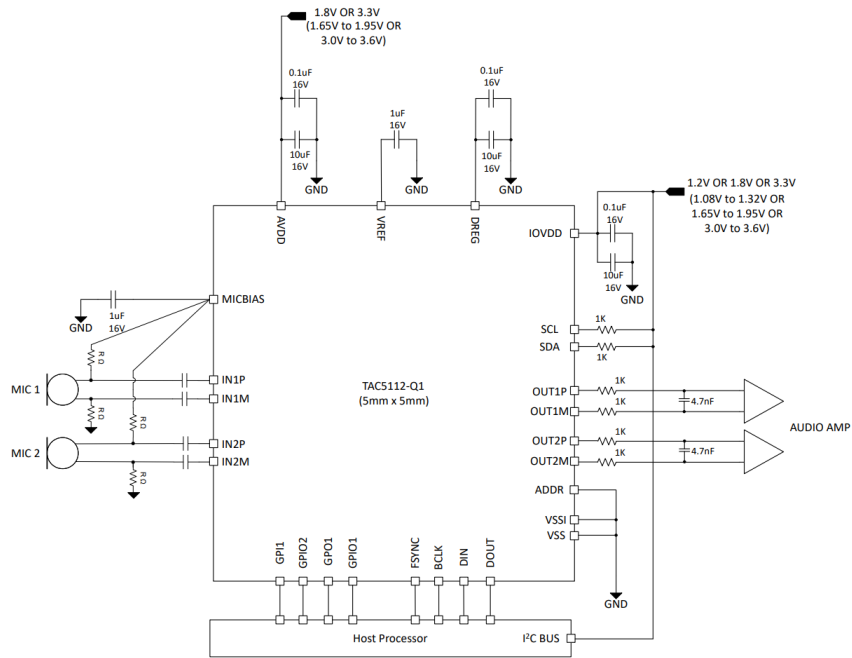


図 3-2. オーディオ コーデック TAC5112-Q1 アプリケーション回路図

3.2 差動からシングルエンドへの回路設計

大半のコンシューマ グレードのヘッドホンは、シングルエンド設計 (3.5V/6.35mm インターフェイス、1 つの信号チャンネルと 1 つのグラウンドラインのみ必要) を採用していますが、プロフェッショナル向けオーディオリンク (たとえば、DAC 出力、プリアンプ) は通常、信号伝送品質を確認するために差動信号を使用します。ハイファイ ヘッドホン オーディオ設計における差動信号の利点を活用するため、この特定アプリケーション向けに差動からシングルエンドへの回路を開発しています。

差動からシングルエンドへの回路は、差動信号の伝送性能を利用するだけでなく、信号変換によってヘッドホンのシングルエンド入力要件に対応し、差動信号の長所を活かしてシングルエンド負荷のアプリケーション要件を満たすものです。この回路は、差動信号の干渉防止と低歪み特性により信号品質を最適化し、信号変換によりヘッドホンのシングルエンド動作モードに適応し、Hi-Fi ヘッドホン アンプの高忠実度な追求を実現します。この設計は、特にハイエンド ヘッドホン アンプで一般的であり、オーディオ品質向上のための重要な技術の 1 つです。

オーディオ アンプは、差動からシングルエンドへのオーディオ回路を実装するために一般的に使用されています。TI は、最も要求の厳しいオーディオ ファンのために設計された一連の高性能オーディオ アンプを開発しました。特に、性能の優れた車載グレード モデルを以下に示します。OPA1642-Q1、OPA1612-Q1、OPA1662-Q1、INA1650-Q1。

表 3-1. 車載グレード オーディオ アンプの主な性能パラメータ

アンプ PN	THD+N (G = +1, f = 1kHz, VO = 3VRMS) (dB)	最大出力電流	単極性電源のサポートの有無
OPA1642-Q1	-126	+ 36/-30mA/CH	あり
OPA1612-Q1	-136	+ 55/-62mA/CH	あり
OPA1662-Q1	-124	+50mA/CH	あり
INA1650-Q1	-108.1	±75mA/CH	あり

差動からシングルエンドへの回路で、オペアンプを選択する際の最も重要な検討事項は、出力電力要件を満たしながら低歪みと低ノイズを維持することです。すでに示したように、設計上の出力電力は 100mW であり、1.789Vrms (2.529V ピーク) に対応するさまざまなヘッドホン モデルを駆動するのに十分な値です。標準的な 32Ω ヘッドホンの場合、必要な最大出力電流は 79mA です。INA1650-Q1 の 2 つのチャンネルは完全に対称で、並列に接続することで出力電力を昇圧できます。出力電力と THD+N 性能を総合的に検討し、INA1650-Q1 がこの設計に採用されています。

実用面において、INA1620 は -132 dB の THD+N、 145 mA の最大出力電流、大型サーマルパッドを備え、性能的に最適な設計となっています。車載グレードの認証取得デバイスの場合、これが第一候補となります。ただし、現在利用可能な車載グレードの設計の中では、THD+N 性能、大出力電流、ユニポーラ電源互換性の面から、INA1650-Q1 が最善の選択肢として位置付けられています。

その他に、INA1650-Q1 には以下に挙げる 3 つの主な利点があります。

1. このデバイスにはオンチップ入力バッファが内蔵されており、外部抵抗 (PCB、コネクタ、ケーブルなどから) が内部 $10\text{ k}\Omega$ 抵抗の高精度な一致を乱すのを防ぎます。不一致になると、差動アンプの高い同相信号除去比 (CMRR) が劣化します。
2. このデバイスには、4 対の高精度マッチング済み薄膜抵抗が内蔵されており、オフチップ抵抗を追加しなくても、差動アンプの外部抵抗として直接使用できます。薄膜抵抗は通常高価で、かなりの PCB 面積を占有します。INA1650-Q1 のオンチップ内蔵抵抗によって、これらの課題を効果的に解決できます。
3. このデバイスはオンチップ EMI フィルタを内蔵しており、EMI の問題を大幅に低減できます。これは、厳格な EMI 要件を課す車載アプリケーションにとって重要な機能です。

INA1650-Q1 はユニポーラ電源をサポートしています。バイポーラ電源は実装コストが高いため、多くの車載アプリケーションではユニポーラ電源が好まれます。TI は、INA1650-Q1 に低ドロップアウトレギュレータ (LDO) で電力を供給することを推奨します。このレギュレータは、Hi-Fi オーディオ システムで要求される超低ノイズかつ高い電源除去比 (PSRR) の電源を実現できます。ヘッドホン アンプ

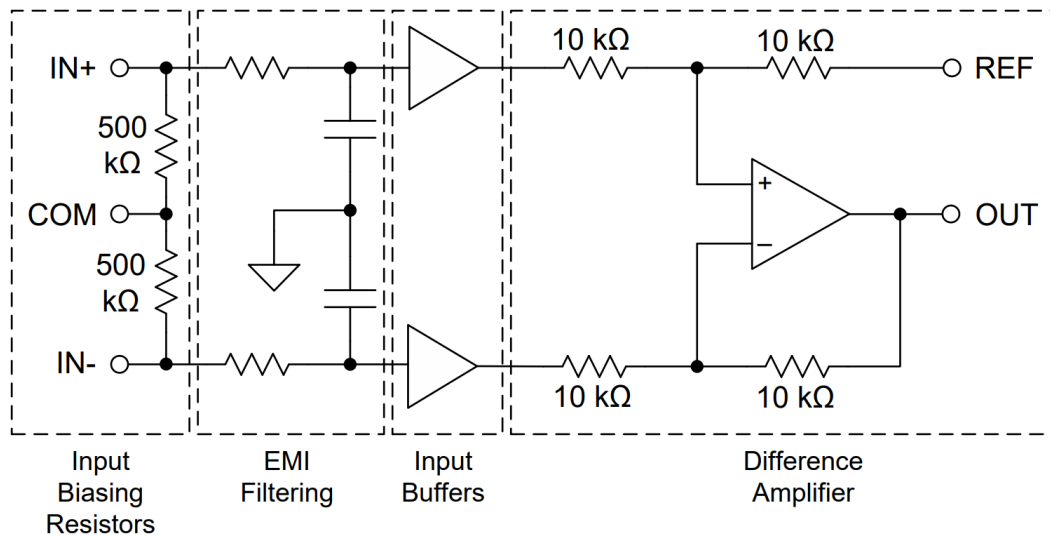
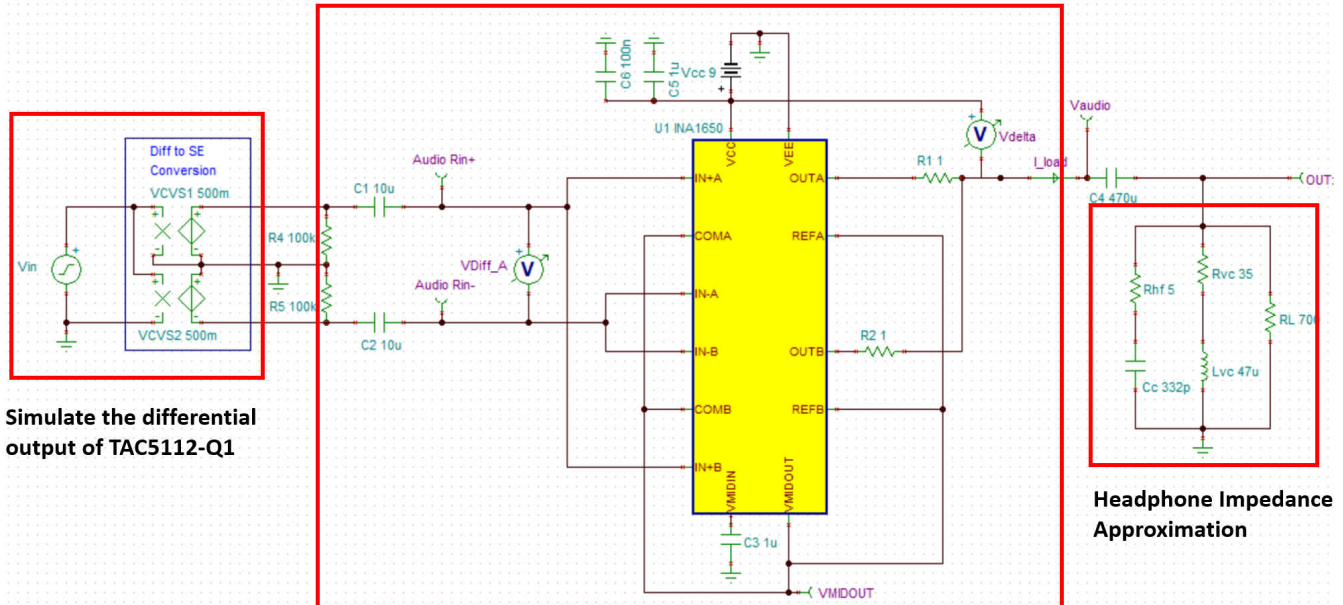


図 3-3. INA1650-Q1 オーディオ信号路 (シングル チャネルを图示)

4 シミュレーション

図 4-1 に、車載 Hi-Fi オーディオ システムのシミュレーション回路図を示します。オーディオ DAC は左側の赤いボックスで囲まれており、INA1650-Q1 のデュアルチャンネル並列動作に基づく差動からシングルエンドへの回路が中央の赤いボックスに、ヘッドホン インピーダンスの等価モデルが右側の赤いボックスに示されています。2 つの並列チャンネルは、 1Ω のバランシング抵抗を経由してチャンネル A とチャンネル B 出力を組み合わせることで、2 つの出力チャンネル間で負荷電流を均等に共有します。この設計用のシミュレーション ソフトウェアとして TINA-TI™ を採用しています。



Differential-to-single-ended circuit based on parallel use of INA1650-Q1 dual channels.

図 4-1. 車載 Hi-Fi オーディオ システムのシミュレーション回路図

4.1 過渡応答シミュレーション

オーディオ コーデック TAC5112-Q1 は、TINA-TI™ でオーディオ アンプの入力としてモデル化され、 10kHz の正弦波、 $1.789\text{V}_{\text{rms}}$ (2.53V ピーク) で入力波形を使用します。このシミュレーション結果は、差動アンプが出力端子に目的の電圧を出力できることを示しています ($V_{\text{out}} = 2.53\text{V} = 1.789\text{VRMS}$)。

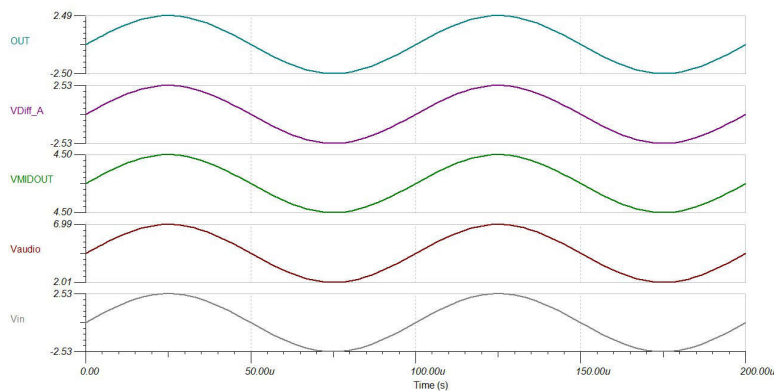


図 4-2. 過渡応答曲線

4.2 ノイズ解析

帯域幅を 1Hz ~ 100kHz に設定した状態で TINA-TI™ のノイズ解析機能を使用しました。シミュレーション結果は、20kHz での合計出力ノイズ電圧 3.34 μ V_{RMS} で、信号対雑音比 (SNR) は 109.52dB に達することを示しています。

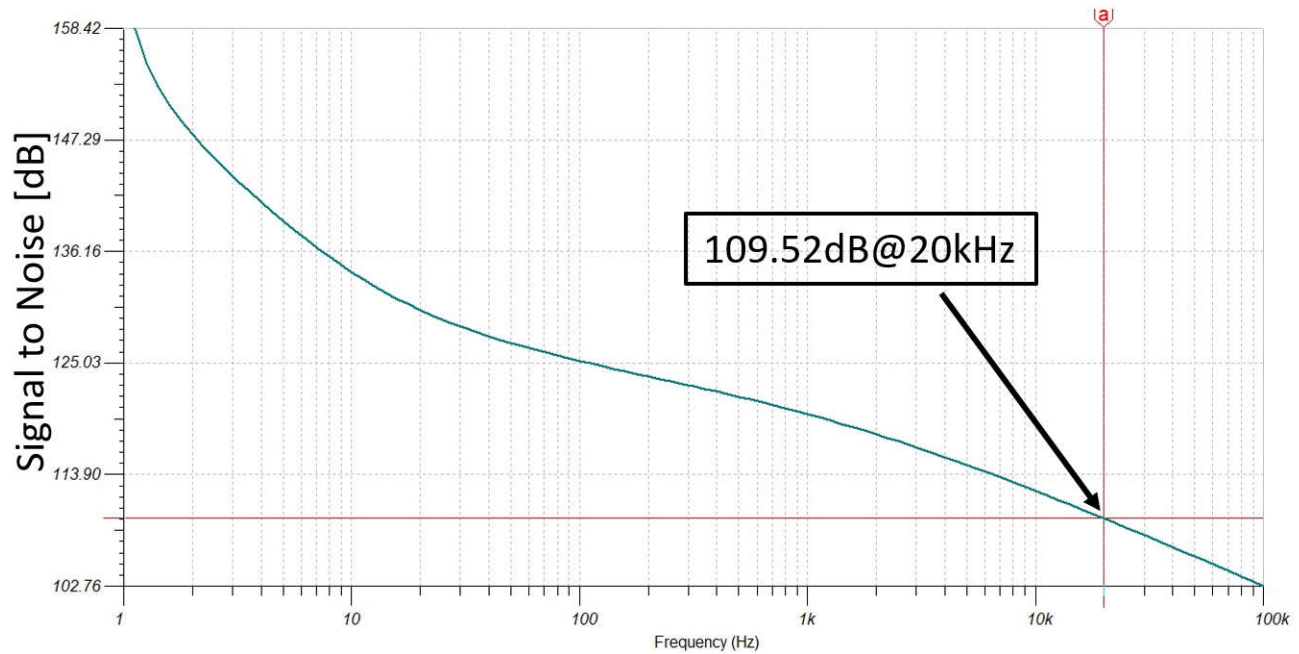


図 4-3. 信号対雑音比のシミュレーション結果曲線

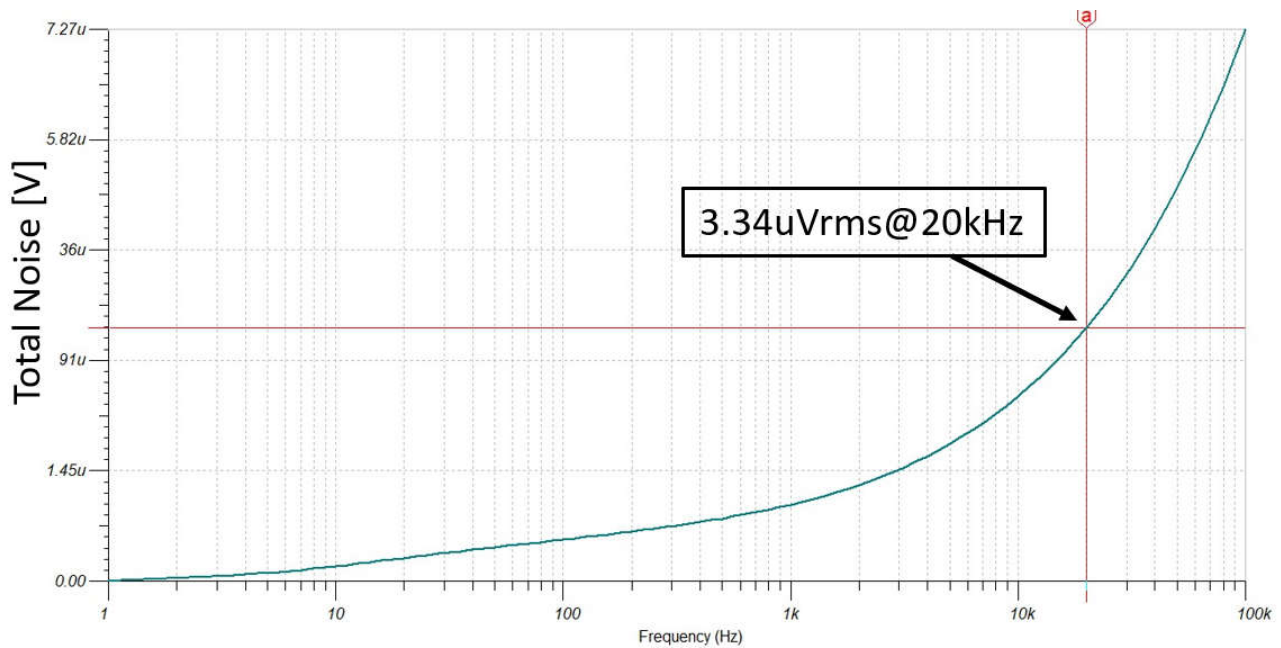


図 4-4. 合計出力ノイズのシミュレーション結果曲線

4.3 消費電力のシミュレーションと熱に関する計算

電力計算を簡素化するため、複雑な計算を実行する代わりに、電力をシミュレーションすることにより電力計算を簡素化できます。その方法は以下のとおりです。

測定値 V_{Δ} (INA1650-Q1 に印加される電圧) と I_{Load} を使用し、Tina の後処理式を使用してそれらを乗算し、電力を求めます。電力曲線をクリックし、「Process」(プロセス)、「Averages」(平均) の順に選択すると、RMS 電力を計算できます。その結果は 258.02mWrms です。

97°C/W の INA1650-Q1 の熱パラメータ θ_{JA} に基づいて温度上昇を推定すると、結果として温度上昇は次のようになります。 $258.02\text{mW} \times 97^{\circ}\text{C/W} = 25.03^{\circ}\text{C}$ 。この温度上昇を 85°C 周囲温度に加えると、ダイ温度は 110.03°C となります。ただし、デバイス自体の消費電力を考慮してください。10mA の I_q と 9V の電源電圧により、さらに 90mW ($10\text{mA} \times 9\text{V}$) の電力がデバイスで消費されます。これにより、ダイ温度に 8.73°C ($90\text{mW} \times 97^{\circ}\text{C/W}$) が追加され、ダイの最終温度は 118.76°C となります。

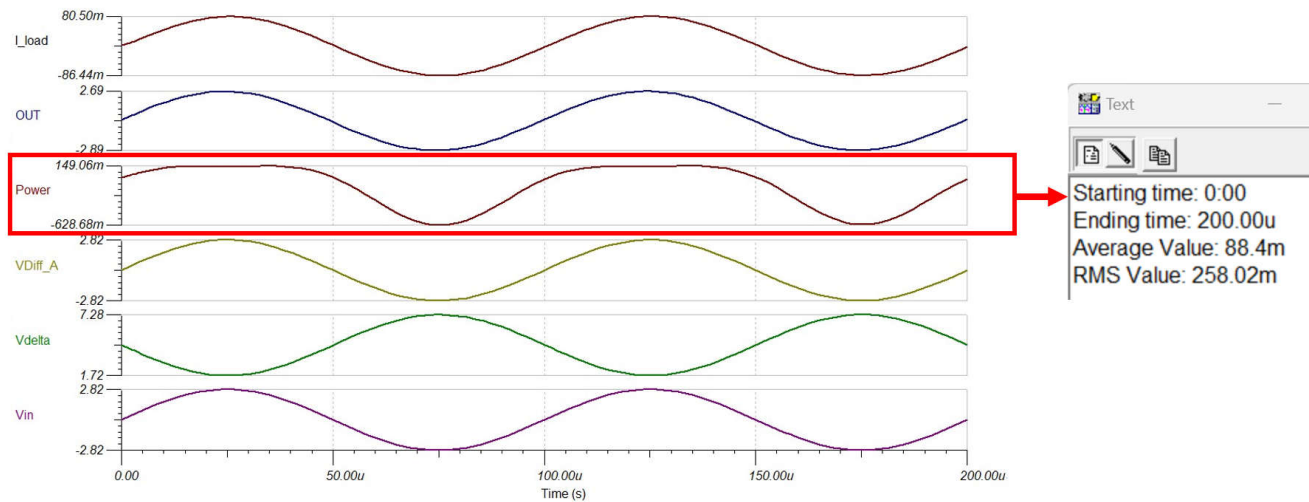


図 4-5. 電源シミュレーションの結果

INA1650-Q1 データシートに基づき、ダイ温度 125°C では、デバイスが供給できる最大電流は約 53mA です。並列アンプを使用することで、正確に 2 倍の電流を得ることはできませんが、1 つのアンプのみの場合よりも多くの電流を得ることができます。この設計で必要とされる最大出力電力は 100mW であるため、80mA のピーク駆動電流が必要です。これは、デュアル チャンネル並列構成で INA1650-Q1 を使用することで実現できます。

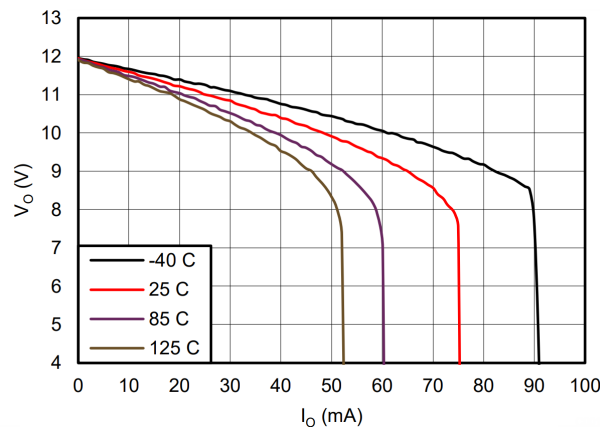


図 4-6. INA1650-Q1 正の出力電圧と出力電流との関係

5 実験テスト

実験回路は、TAC5112-Q1 評価基板 (EVM) と INA1650-Q1 評価基板 (EVM) で構成できます。TAC5112-Q1 の DAC 出力モードは差動出力に構成し、INA1650-Q1 のデュアル チャネル入力は並列に接続します。その後、TAC5112-Q1 の差動出力を INA1650-Q1 の並列入力に接続します。DC 電源を 9V に設定します。このテストではヘッドホン負荷をシミュレートするために 32Ω 金属皮膜抵抗を採用しています。実際のテスト シナリオを図 5-1 に示します。

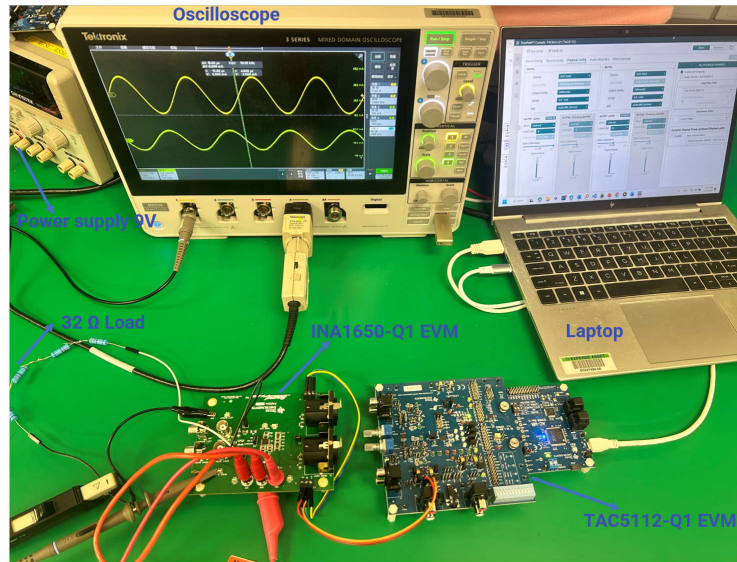


図 5-1. 実験テスト プロトタイプ

図 5-2 に、TAC5112-Q1 の差動出力波形、INA1650-Q1 が差動からシングルエンドへの変換を実行した後の出力波形、および 100mW の電力で 32Ω 負荷を駆動したときの負荷電流波形を示します。このうち、Vout のピークツーピークの値は 5.20V (1.84VRMS) で、Iout のピークツーピークの値は 172mA です。設計した大出力電力 Hi-Fi ヘッドホンアンプの出力波形に歪みや減衰がないことを確認してください。

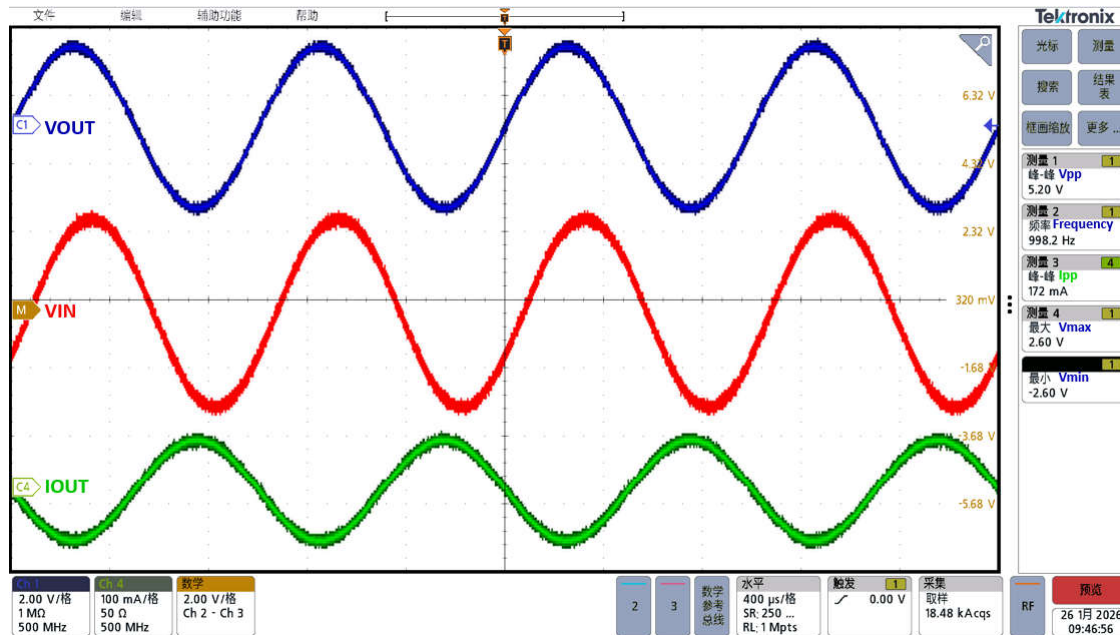


図 5-2. 動的波形テスト

設計した大出力電力 Hi-Fi ヘッドホン アンプのオーディオ性能を評価するため、振幅 1.789Vrms の 1kHz 正弦波差動信号をオーディオ アナライザ (AP) 経由で INA1650-Q1 に直接供給しました。テストは 32Ω の抵抗性負荷で実施しました。実験回路は図 5-3 に示すように構築しました。

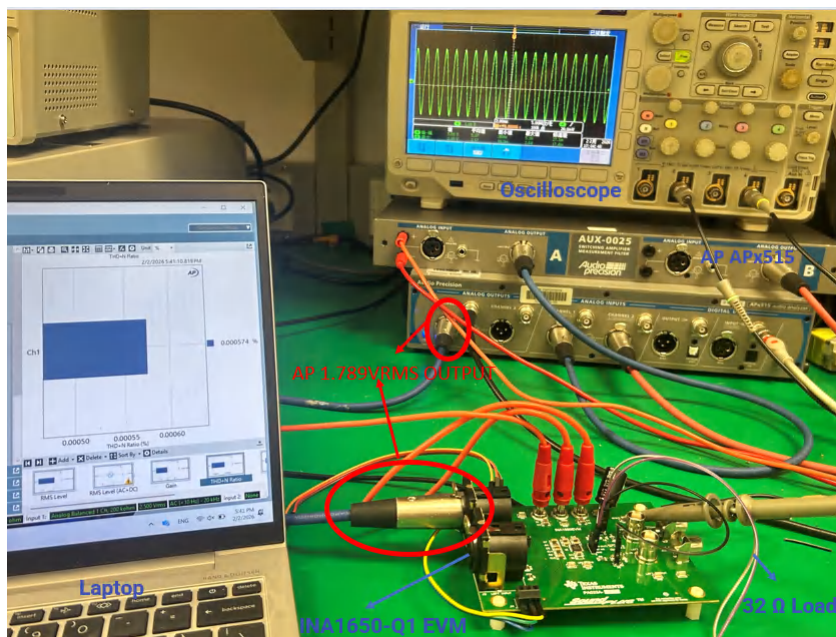


図 5-3. INA1650-Q1 THD+N 実験用テスト ベンチ

出力電力が 100mW (32Ω の両端で 1.789VRMS に対応) の場合、INA1650-Q1 をベースとする高出力電力 Hi-Fi ヘッドホン アンプの全高調波歪み + ノイズ (THD+N) の測定値は 0.000613% です (図 5-4 を参照)。実験結果はシミュレーション結果と良く一致しており、車載 Hi-Fi オーディオ システムに求められる THD+N 仕様である 0.001% 未満を完全に満たしています。

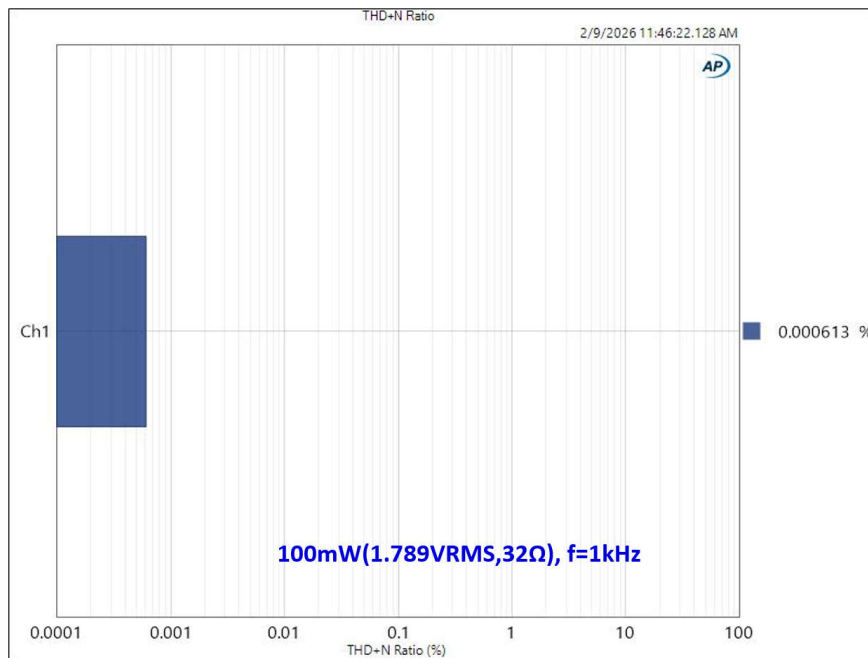


図 5-4. INA1650-Q1 100mW 出力 THD+N テスト結果

さまざまな出力 VRMS 値での THD+N テストデータを、[図 5-5](#) に示します。出力振幅が 0.7VRMS を超えると、THD+N の結果はすべて 0.001% 未満になります。出力振幅が 100mVRMS または 500mVRMS の場合、FFT は 1kHz の基本周波数を示し、高調波はオペアンプのノイズフロア内にあり、目視では確認できません。詳細は[図 5-6](#) に示されています。これは、曲線のノイズが支配的な領域を表しています。出力振幅が大きくなると、高調波は増加し、オペアンプのノイズフロアを上回ります。[図 5-7](#) に示すように、1VRMS と 1.789VRMS の出力振幅に対する FFT プロットに、これらの高調波が明確に現れています。

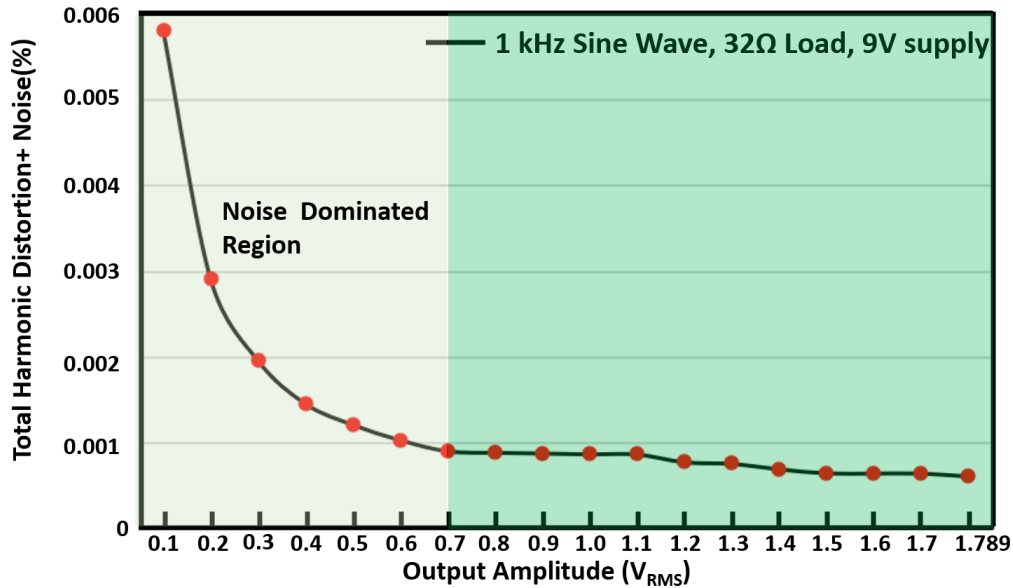


図 5-5. 異なる出力 VRMS 値での THD+N テスト データ

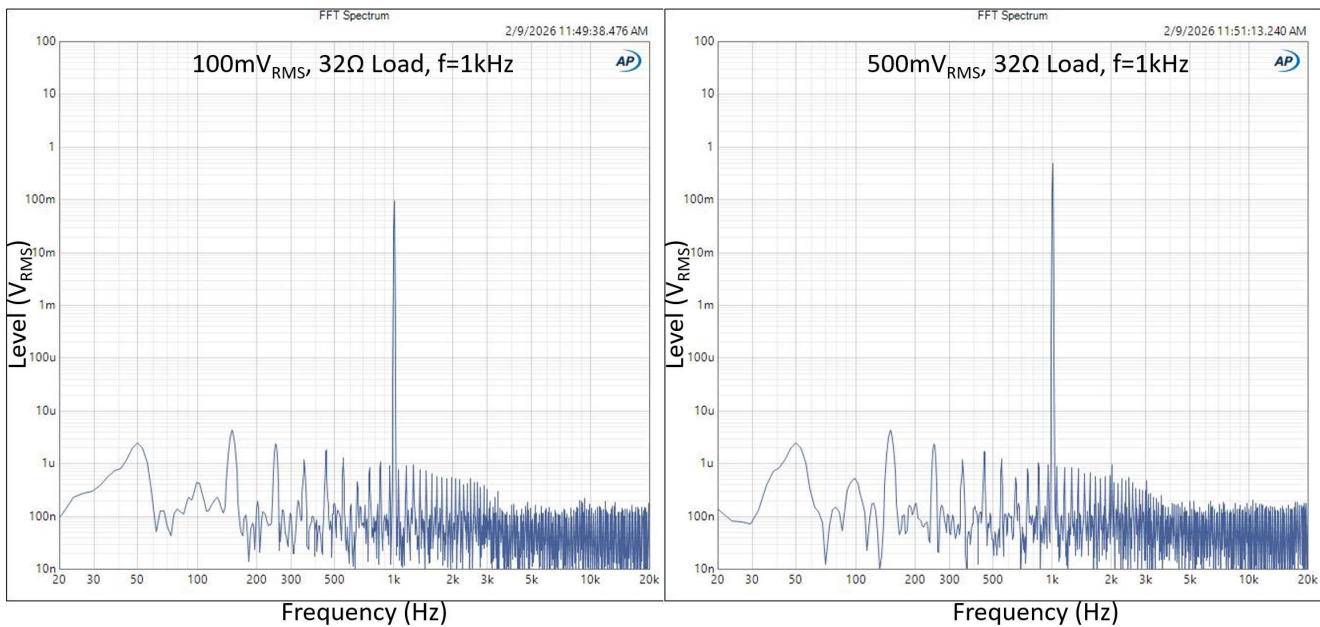


図 5-6. ノイズ支配的領域の FFT テスト波形

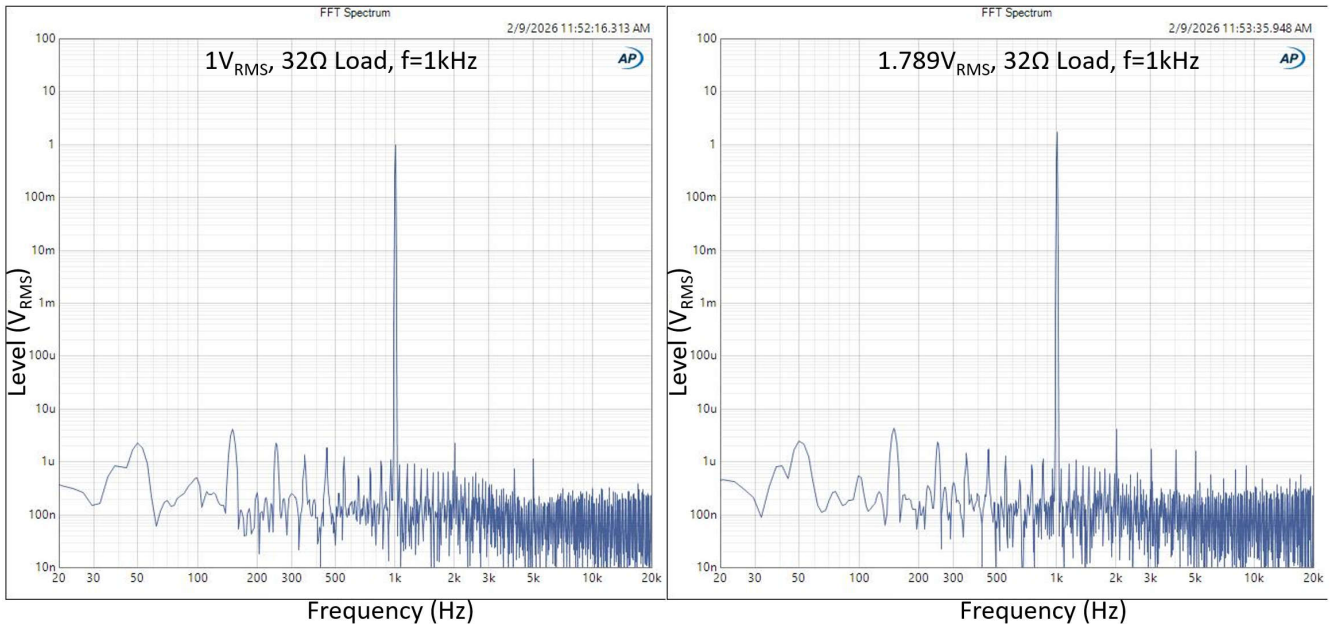


図 5-7. VRMS 出力および 1.789V VRMS 出力 FFT テスト結果

INA1650-Q1 における歪みが支配的な領域を回避しながら、大きな出力電圧振幅を実現するには、まず十分な電源電圧を供給する必要があります。電源電圧が不十分な場合、出力クリッピングが発生し、高調波が急激に増加します。図 5-8 に示す出力特性を使用すると、INA1650-Q1 がリニア領域内で動作することを確認できます。このアプリケーションノートでは、9V 単一電源構成を使用しています。

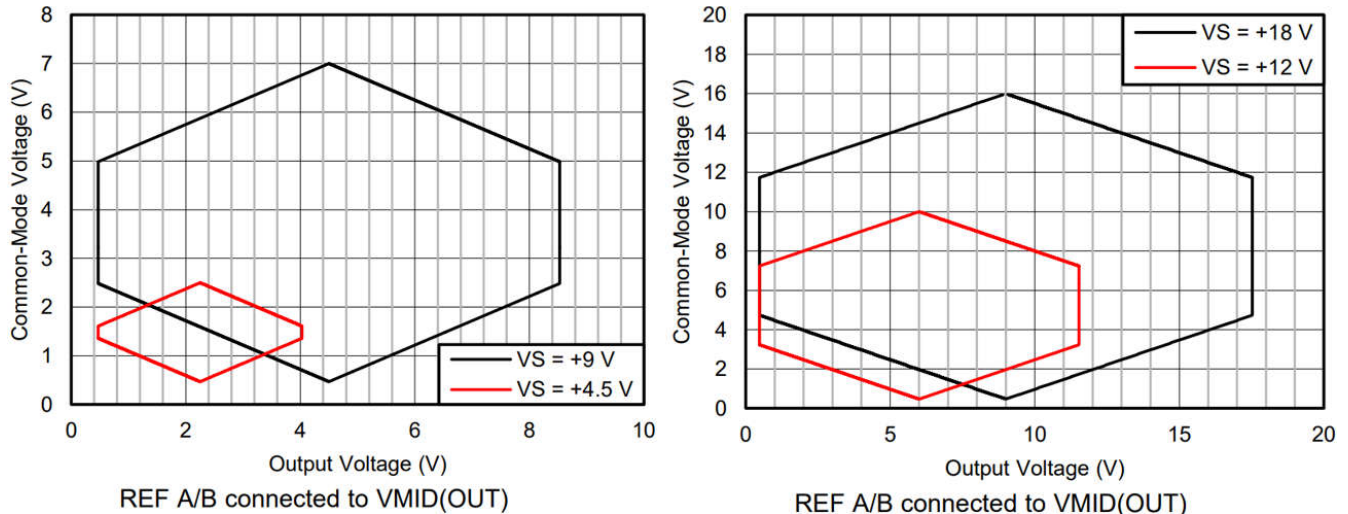


図 5-8. INA1650-Q1 入力同相電圧と出力電圧機能との関係

放熱性能テストは、温度上昇が 14.4°C のみ (36.1°C - 21.7°C) で、100mW 負荷を駆動した場合の INA1650-Q1 の放熱性能を示しています。実験的テストから、INA1650-Q1 は、オーディオ性能に大きな影響を及ぼすことなく、85°C の周囲温度でも通常 100mW 負荷を駆動できることがわかります。



図 5-9. 放熱性能テスト

6 まとめ

このアプリケーション ノートでは、**INA1650-Q1** を使用した車載大出力電力 **Hi-Fi** ヘッドホン アンプ設計を説明しています。これは、以下の厳格な車載要件を満たしています。**12V** 未満の単一電源、**THD+N** が **0.001%** 未満、**100mW** の出力電力。デュアル チャネルの並列構造により、出力電流が増加し、**32Ω** のヘッドホンを駆動します。この設計は、バッファ、高精度抵抗、**EMI** フィルタを内蔵しており、優れたオーディオ性能を実現します。測定結果は、**THD+N** が **0.000613%** (**32Ω**、**100mW**) であることを示しており、低歪みと高出力の能力が確認できています。シミュレーションとテストの両方の結果から、堅牢な高出力動作が確認されており、車載インフォテインメントオーディオ設計の実用的なリファレンスとなります。

7 参考資料

1. テキサス インスツルメンツ、『[TAC5112-Q1 車載低消費電力、ステレオ オーディオ コーデック、105dB ダイナミックレンジ ADC と 114dB ダイナミックレンジ DAC 搭載](#)』、データシート (Rev. A)。
2. テキサス インスツルメンツ、『[INA165x-Q1 SoundPlus™ 高同相信号除去ライン レシーバ](#)』、データシート (Rev. C)。
3. テキサス インスツルメンツ、『[電流出力オーディオ DAC 向け大電力ハイファイ ヘッドホン アンプ](#)』、リファレンス デザイン (Rev. C)。
4. テキサス インスツルメンツ、『[オペアンプの全高調波歪みを測定する方法と THD+N の基礎知識](#)』、アプリケーション ノート。

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むいかなる保証も、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、

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](#) 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