

Design Guide: TIDA-00176

高分解能位置補間機能付き Sin/Cos エンコーダへのインターフェイス



説明

このリファレンス デザインは、Sin/Cos 位置エンコーダに対する EMC 準拠の産業用インターフェイスです。アプリケーションには、高精度の速度制御と位置制御を必要とする産業用ドライブが含まれています。この設計は 16 ビットのデュアル サンプル ADC を使用しており、ドロップイン互換性のある 14 ビットまたは 12 ビットのバージョンが利用できるため、性能とコストを最適化できます。また、TIDA-00176 では、SPI および QEP インターフェイスを使用して外部プロセッサとの接続が容易で、オプションの組込み ADC を使用できます。迅速な評価を実現するために、Piccolo™ F28069M マイコン LaunchPad™ 用のサンプル ファームウェアが提供されています。このファームウェアは、Sin/Cos エンコーダから測定した角度を、マイコンの USB 仮想 COM ポート経由で最大 28 ビットの分解能で出力します。

リソース

TIDA-00176	デザイン フォルダ
ADS8354、THS4531A	プロダクト フォルダ
TLV3202、OPA2365	プロダクト フォルダ
REF2033、TPS54040A	プロダクト フォルダ
TIPD117	ツール フォルダ
Piccolo F28069M マイコン LaunchPad	ツール フォルダ



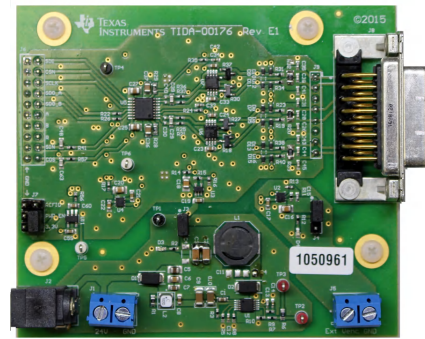
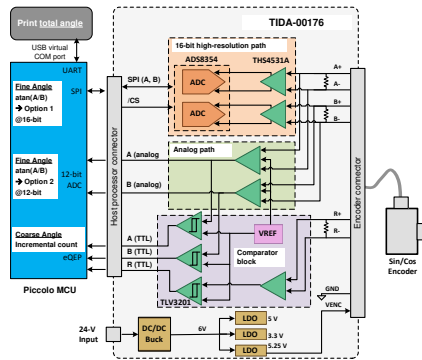
テキサス・インスツルメンツの™ E2E サポート エキスパートにお問い合わせください。

特長

- 2.5V オフセット、最大 500kHz の入力周波数で 1V_{pp} の差動出力を使用する、EMC 規格準拠、Sin/Cos エンコーダ用の産業用インターフェイス設計
- 高分解能の位置補間、最大 28 ビットの分解能、ケーブル長 70m までテスト済み
- デュアル アナログ シグナル チェーンは、16 ビット デュアル SAR ADC とマイコンの組込み ADC との同時使用が可能で、経路の両方を評価し、経路の一方を最適化することで、帯域幅を減らしてノイズ耐性を向上可能
- SPI および QEP インターフェイスでマイコンに簡単に接続できるほか、ドロップイン互換性のある 14 または 12 ビットの ADC により、分解能要件が未決定のコスト最適化オプションも利用可能
- 16kHz で計算された高分解能な角度と USB 仮想 COM ポート経由で送信された角度データを使用した C2000™ マイコン用ファームウェアのサンプルで、性能を簡単に評価可能
- IEC61000-4-2、4-4、4-5 (ESD、EFT、サージに関する EMC 耐性要件) のテスト済み

アプリケーション

- AC ドライブ
- 精密速度 - 可変ドライブ
- サーボドライブ



1 システムの説明

1.1 設計の概要

この TI 設計は、 $1V_{PP}$ の差動アナログ出力信号、最高 500kHz の周波数、5V 電源電圧を使用し、Sin/Cos インクリメンタル ポジション エンコーダに対する産業用温度、EMC 準拠のインターフェイスを実装するものです。この TI 設計の主要なビルディング ブロックは、デュアル パス アナログ シグナル チェーン、高速コンパレータ ブロック、パワー マネージメント ブロック、Sin/Cos エンコーダへのインターフェイス、およびデジタル信号処理と高分解能位置計算用のホスト マイコンへのインターフェイスです。システム ブロック図を簡略化したものを図 1-1 に示します。TI のハードウェア設計は薄緑色のボックスで示されています。

この設計ガイドを容易に評価できるように、TMS320F28069M InstaSPIN™-MOTION LaunchPad にはサンプル ファームウェアが用意されています。TMS320F28069M は、両方のアナログ信号路の高分解能角度位置を計算します。一方のパスは、SPI を介した外部 16 ビット デュアル ADC を活用しています。もう一方のパスでは、F28069M 組み込みデュアル S/H 12 ビット ADC を使用しています。角度は、最大 28 ビットの分解能と、USB 仮想 COM ポート経由で評価できる出力で計算されます。

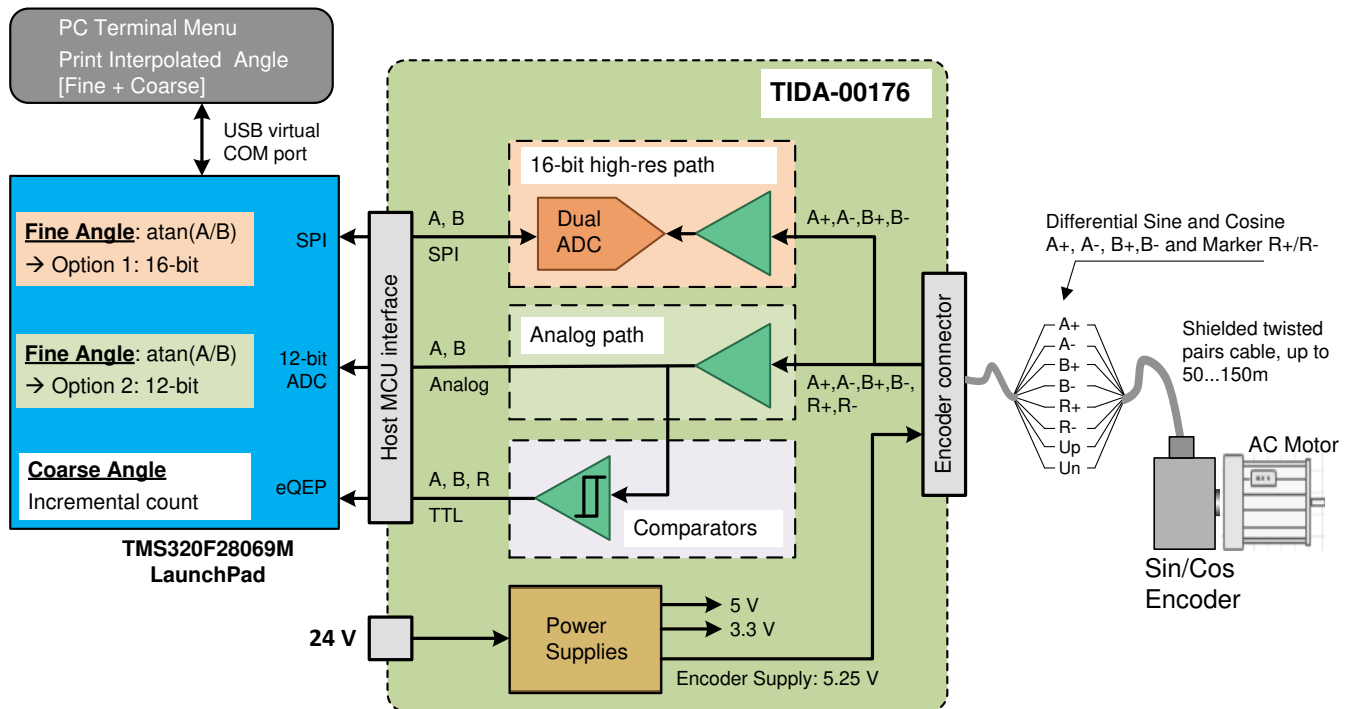


図 1-1. Piccolo F28069M LaunchPad を使用した TIDA-00176 の概略システムブロック図

アナログ シグナル チェーンは、EMC 保護付きで 120Ω の終端を実現します。差動 $1V_{PP}$ のサインおよびコサイン入力信号は、それぞれ増幅およびレベル シフトされます。デュアル信号路オプションは、SPI 付きのオンボード高速デュアル 16 ビット同時サンプリング ADC と、1.65V バイアス電圧を備えたデュアル アナログ シングルエンド出力が含まれており、C2000™ Piccolo リアルタイム MCU ファミリーなどのデュアル S/H ADC 内蔵マイコンとの接続を可能にします。

このコンパレータ ブロックは、高速で低伝搬遅延の調整可能なヒステリシスを採用しており、ノイズ耐性を向上させることができます。また、アナログ信号 A、B、マーカー R を 3.3V TTL レベルでデジタル信号に変換し、C2000 Piccolo MCU 上の QEP モジュールなどの直交エンコーダ パルス モジュールとのインターフェイスを確立します。

入力範囲が広いオンボードの 24V 電源により、アナログ シグナル チェーンに必要な電圧や、Sin/Cos エンコーダに必要な 5.25V 電源電圧を供給します。

Sin/Cos エンコーダを、15 ピンのシールド付き Sub-D コネクタまたは 8 ピン ヘッダーのいずれかに接続できます。ホスト プロセッサへのインターフェイスとして、1.65V バイアス電圧によって 0 ~ 3.3V の範囲でアナログ シングルエンドの信号

A および B を供給し、3.3V I/O を使用して SPI および A、B、R 用のデジタル信号を供給します。デジタル出力信号 A、B、R は、しばしば **ABZ** 信号と呼ばれます。

この設計は、EMC 耐性要件および可変速度、電力駆動システムに適用可能な特定のテスト方法に関する規格 IEC 61800-3 に規定されている IEC61000-4-2、4-4、4-5 (ESD、EFT、サージ) に対してテストされています。

1.2 アナログ Sin/Cos インクリメンタル エンコーダ

多くのアプリケーションで、インクリメンタル ロータリーまたはリニア位置エンコーダは、角度またはリニア位置と速度を測定するために使用されています。アプリケーションに応じて、TTL/HTL 出力信号またはアナログ正弦波出力信号を採用したエンコーダを使用します。後者はしばしば Sin/Cos エンコーダと呼ばれます。アナログ Sin/Cos インクリメンタル エンコーダは、高分解能の位置測定を可能にします。正弦波インクリメンタル信号の高い品質により、デジタル速度制御において高い補間係数を可能にします。応用分野としては、電気モーター、工作機械、印刷機、木工機械、繊維機械、ロボット、ハンドリング デバイス、各種測定装置、試験装置、検査装置などがあります。

1.2.1 Sin/Cos エンコーダ出力信号

通常、エンコーダを使用して実装する 2 つのセンシング方法があり、光学または誘導性センシングのいずれかをベースとします。光学式ロータリー エンコーダでは、エンコーダ ディスクが光線を変調し、その強度が光電管によって感知されます。これらにより、2 つの 90 度位相シフトされた正弦波インクリメンタル信号 A および B が生成されます。B は、エンコーダのシャフトから時計回りに回転すると A から遅れます。力学的回転 1 回転分の信号 A と B の周期数は、エンコーダのライン数 N に等しくなります。さらにトラックには、力学的回転ごとに 1 回発生するリファレンス マーカー R が流れます。リファレンス マーカーを使用すると、絶対角度位置測定が可能です。

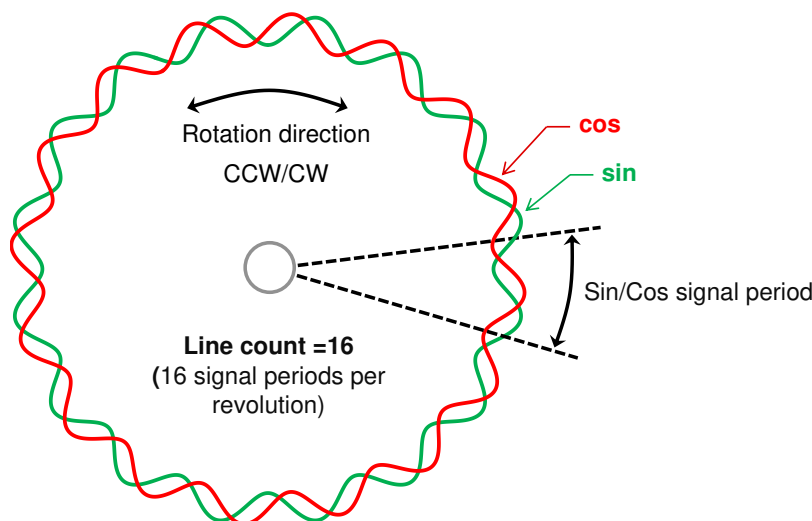


図 1-2. 力学的回転 1 回転分の Sin/Cos エンコーダの単純化されたサインおよびコサイン信号、ライン数 16

1V_{pp} インターフェイスを持つ Sin/Cos エンコーダは、1V_{pp} で差動アナログ出力信号 A (A+, A-) と B (B+, B-) を提供し、通常は 2.5V の DC オフセットを提供します。差動リファレンス マーク信号 R (R+, R-) は一般的に振幅がわずかに小さく、ピークは 1 回転ごとに 1 回だけ発生します。図 1-3 に、差動出力信号 A、B、R を示します。A、B、および R は、それぞれ A+ マイナス A-、B+ マイナス B-、および R+ マイナス R- の差動信号を表しています。

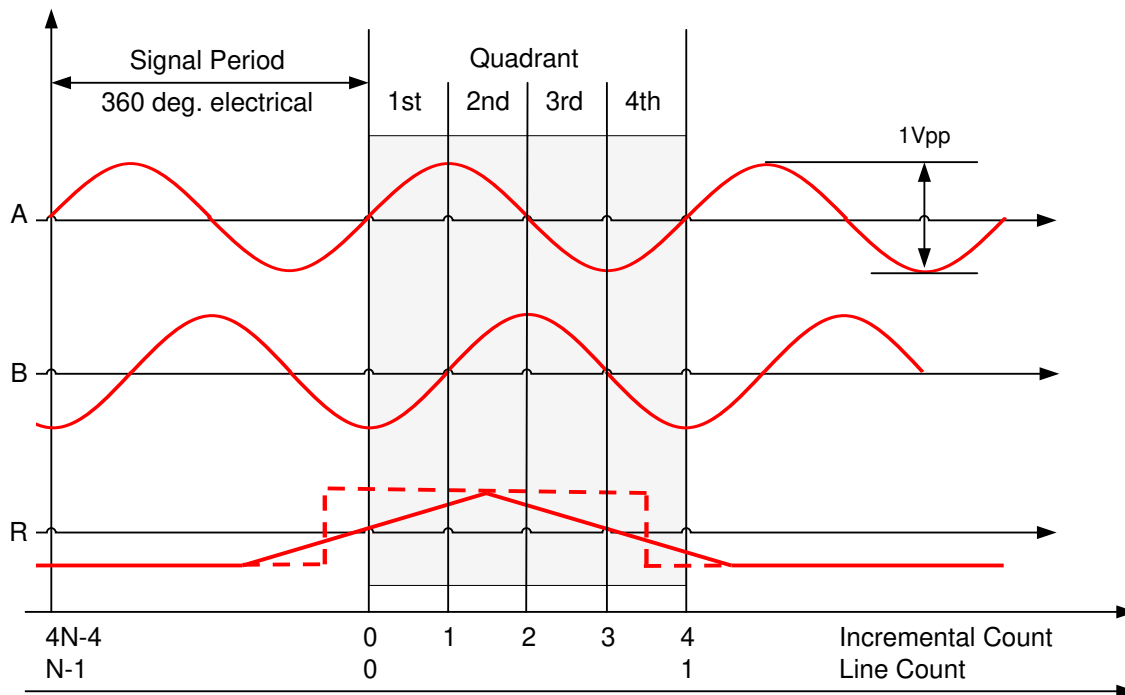


図 1-3. 1 回転あたりのライン数が N の Sin/Cos エンコーダの出力電圧信号 A、B、およびマーカー R

Sin/Cos エンコーダの差動出力信号の周波数は、式 1 に示すように、エンコーダのライン数と機械的速度に依存します。

$$f_{A,B} [\text{Hz}] = N \times v[\text{rpm}] \times \frac{1}{60} \quad (1)$$

N は Sin/Cos エンコーダのライン数を表し、v はエンコーダ シャフトの機械的速度を rpm 単位で表します。

図 1-4 に、ライン数 N = 100、1000、2000 のエンコーダの出力周波数と機械的速度の比較を示します。

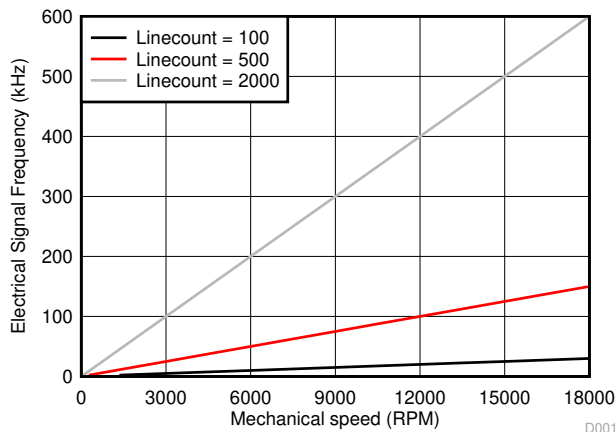


図 1-4. Sin/Cos エンコーダの出力信号 A および B の電氣的周波数と機械的速度およびライン数との関係

たとえば、ライン数 N=2000 の Sin/Cos エンコーダは、12000rpm の機械的速度で動作し、信号 A と信号 B を 400 KHz の周波数で出力します。

1.2.2 Sin/Cos エンコーダの電氣的パラメータの例

Sin/Cos エンコーダへの電気インターフェイス モジュールの要件を理解するために、産業用 Sin/Cos エンコーダ モデルをいくつか分析しました。対応するパラメータを表 1-1 に示します。

表 1-1. エンコーダの電源電圧例

SIN/COS エンコーダ モデル	電源電圧	消費電流
1	5V ± 0.5V DC	120mA 未満
2	5V ± 10%	150mA
3	5V ± 5%	70mA (最小値)

Sin/Cos エンコーダの電源は、この仕様の範囲内である必要があります。

アナログ信号チェーンは、信号の振幅、オフセット、および最大周波数に関して、少なくとも 表 1-2 に示す要件を満たすように規定する必要があります。

表 1-2. エンコーダの出力信号 A、B の例

SIN/COS エンコーダ モデル	信号レベル A、B	DC オフセット	ライン数 N	制限周波数 (-3dB)
1	0.6 ~ 1.2V _{PP} 、1V _{PP} (標準値)	2.5V±0.5V	50~5000	≥180kHz
2	1V _{PP} (+20%、-40%)	2.5V±0.5V		120 kHz
3	1V _{PP} (±10%)	2.5V±100mV	1024 または 2048	400 kHz

表 1-3. エンコーダ出力信号マーカー R の例

SIN/COS エンコーダ モデル	参照マークで使用可能な部品 G	静止値 H は参照マーク外	DC オフセット
1	0.5V _{PP} (標準値)、0.2V _{PP} (最小値)	-1.7V	2.5V

表 1-4. エンコーダの機械的パラメータの例

SIN/COS エンコーダ モデル	システム精度	シャフトの機械的速度
1	格子周期の 1/20	< 16000rpm

1.3 Sin/Cos エンコーダを使用して高分解能位置を計算する方法

1.3.1 理論的アプローチ

1.3.1.1 概要

ハードウェアの観点では、通常は 2 つのアプローチが実現します。これは主に A/D コンバータの要件に影響を及ぼします。

「オーバーサンプリング方式」を使用すると、サイン信号とコサイン信号の両方が、サインおよびコサインの最大周波数の 4 倍以上の高さでサンプリングされます。増分カウントおよび位相計算は、ホスト プロセッサに対する後続のデジタル信号処理によって行われます。この方法では、コンパレータは必要なく、高速デュアル サンプリング ADC を使用します。

通常使用される「アンダーサンプリング」方式では、個別のハードウェア ブロックを使用して増分カウントと補間増分位相を計算します。この方法の利点は、増分カウントに影響を及ぼさずに補間した位相のみを示すため、最初の方法に比べて ADC のサンプリング周波数と帯域幅を低くできることです。ただし、アンダーサンプリング方式では、サインとコサイン用にそれぞれコンパレータがデジタル直交エンコード信号 A と B を生成する必要があり、方向のアップ / ダウン カウンタ (直交エンコード パルス カウンタとも呼ばれます) を駆動します。デュアル サンプリング ADC のアナログ帯域幅は、少なくともサイン / コサインの最大周波数と同じ必要があります。アンダーサンプリング方法の概要を 図 1-5 に示します。

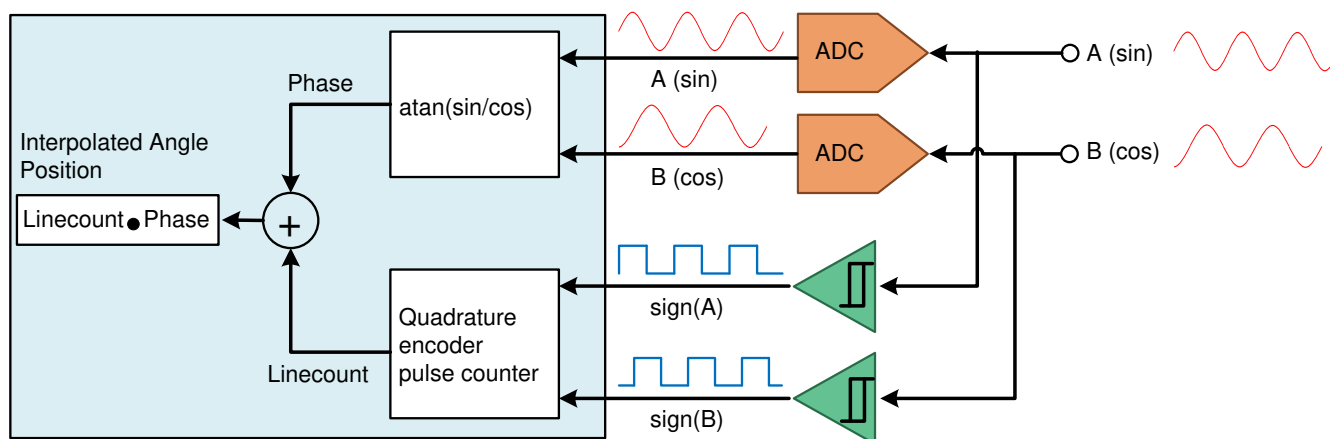


図 1-5. 補間角度計算の信号処理ブロック図

補間した合計角度位置は、粗い角度と細かい角度で構成されます。補間した角度は、実際の増分ライン カウントとこの増分ライン内の位相によって決定されます。増分ライン内の位相は、特定の時間における任意の時点でのアナログ サイン信号とコサイン信号 A および B から導出されます。実際の増分カウントと実際のアナログ サイン信号とコサイン信号の両方を同時にラッチする必要があり、つまり同期してラッチする必要があります。増分ライン カウントは粗い角度を提供し、その増分ライン内のサインとコサインの位相は細かい角度を提供します。補間した合計角度は、図 1-5 の簡略化されたブロック図に示すように、粗い角度と細かい角度の複合です。対応する 式 2 から 式 4 については次の段落で説明します。

1.3.1.2 粗分解能角度の計算

増分カウント、つまり増分粗角はカウンタによって決定できます。カウンタは **A** が先行シーケンスの場合はカウントアップし、**B** が先行シーケンスの場合はカウントダウンします。デジタル化すると、**A** と **B** の両方のエッジがカウントされます。このため、1 回の増分カウントは信号 **A** と **B** の両方の 90° 位相シフトに相当します。図 1-3 を参照してください。増分カウントは 0 から始まり、式 2 あたりの増分カウントの最大値 incr_{MAX} を示します。ここで、**N** はライン カウントです：

$$\text{incr}_{\text{MAX}} = (4 \times \text{N}) - 1 \quad (2)$$

増分位置 Φ_{incr} は次のように計算できます：

$$\Phi_{\text{incr}} [\text{deg}] = \frac{360}{4 \times \text{N}} \times \text{incr} + \Phi_0 \quad (3)$$

ここで、 incr は実際の増分カウント、**N** は合計ライン カウント、 Φ_0 はゼロ角度で、使用する場合はリファレンス マーカー **R** によって決定されます。

1.3.1.3 詳細分解能角度の計算

正弦波信号 **A** と **B** の位相 $\phi_{\text{A,B}}$ は、2 つの連続するライン カウント、つまり 4 つの増分ステップ (互いに等価で) との間の角度を補間するために使用されます。位相 $\phi_{\text{A,B}}$ を次の式 4 で計算できます：

$$\phi_{\text{A,B}} [\text{deg}] = \begin{cases} 90^\circ + \tan^{-1}\left(\frac{\text{B}}{\text{A}}\right) & \text{if } \text{A} \geq 0 \\ 270^\circ + \tan^{-1}\left(\frac{\text{B}}{\text{A}}\right) & \text{if } \text{A} < 0 \end{cases} \quad (4)$$

エンコーダの回転速度と電源電圧に共通の関数である **A** と **B** の振幅比のみが使用されるため、結果には影響しません。

1.3.1.4 補間した高分解能角度計算

表 1-5 に従って増分カウント incr が位相 $\phi_{\text{A,B}}$ と一致すると、次のように合計補間角度 Φ_{TOTAL} がライン カウント **N** で計算されます：

$$\Phi_{\text{TOTAL}} [\text{deg}] = \frac{360^\circ}{\text{N}} \left((\text{incr} \gg 2) + \left(\times \frac{\phi_{\text{A,B}}}{360^\circ} \right) \right) + \Phi_0 \quad (5)$$

注意

正弦波信号 **A** および **B** と増分カウント incr を同時にラッチする必要があります。

表 1-5. 増分カウントと位相および位相象限との関係例

増分カウント	PHASE	象限
0	$0 \leq \text{位相} < 90$	1
1	$90 \leq \text{位相} < 180$	2
2	$180 \leq \text{位相} < 270$	3
3	$270 \leq \text{位相} < 360$	4
4	$0 \leq \text{位相} < 90$	1

1.3.1.5 非理想的な同期の実用化

実際には、直交エンコーダのパルス カウンタに入力されるデジタル信号 A_{TTL} および B_{TTL} は、通常、アナログ信号と比較して位相シフトを持ちます。これは主に、コンパレータのヒステリシスと伝搬遅延、および増分カウントのラッチとアナログ入力 A と B のサンプリングとの間の非理想的な同期によるものです。

ヒステリシスが位相シフトに及ぼす影響は、信号周波数とはほとんど無関係ですが、信号振幅にほぼ反比例します。アナログ信号のサンプリングと増分カウントのラッチとの間の伝搬遅延と非理想的同期の影響は、振幅とはほとんど無関係ですが、周波数に比例します。このため、最大位相シフトは、 Sin/Cos エンコーダ周波数の最大値、最小振幅で発生します。

つまり、次の象限への各遷移では、たとえば 図 1-6 の第 1 象限に示すように、位相遅れのため増分カウンタはすぐに更新されません。

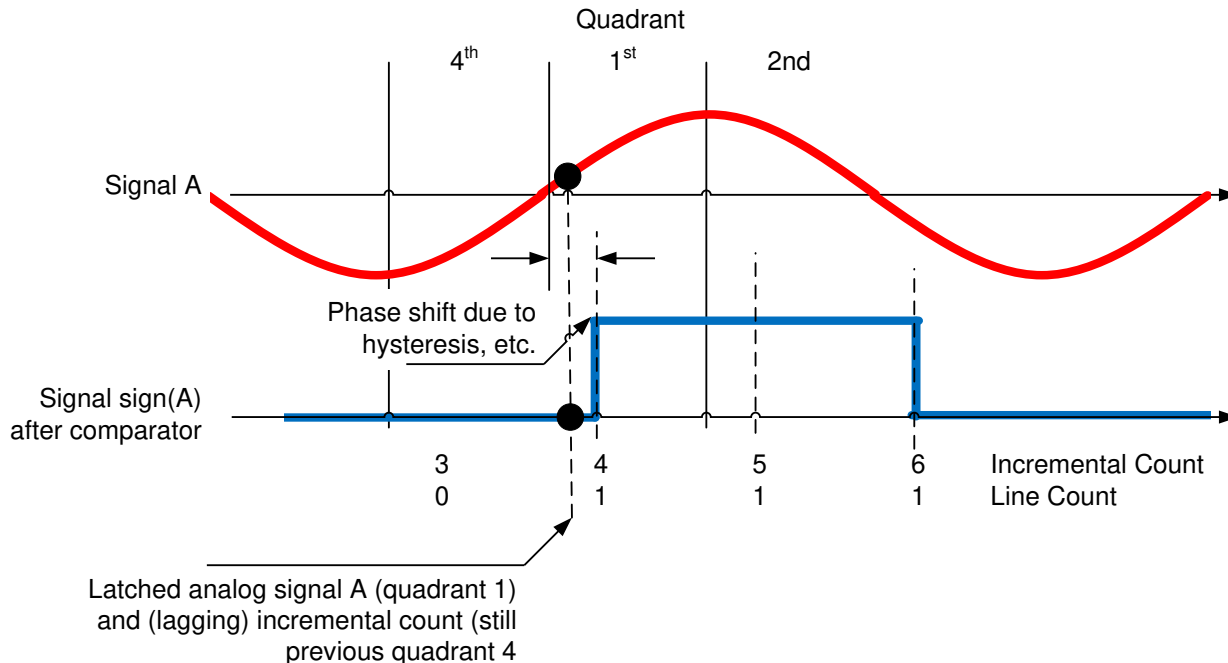


図 1-6. 位相遅れによるアナログ信号 A に対する A_{TTL} の位相シフト

概説されている要因は省略できないため、これらのコーナー ケースを検出して修正するための方法を適用する必要があります。あいまいさがあるか、増分ライン カウントとアナログ位相の下位 2 ビットがあることから、位相シフトが $\pm 90^\circ$ 未満である限り、表 1-6 の概略としての補正方法を適用できます。

象限を識別するのに位相情報のみが使用されるため、考慮すべき例外は 2 つだけです。これらは、回転方向に応じて、第 4 象限から第 1 象限への遷移中または第 1 象限から第 4 象限への遷移中に発生します。

表 1-6. 補正方法

増分カウント [incr]	位相 $\phi_{A,B}$	補正方法
$\text{incr} \% 4 = 3$	$0 \leq \text{位相} < 90$	$\text{incr} = \text{incr} + 1$ $\text{incr} > 4 \times N - 1$ の場合、 $\text{incr} = 0$
$\text{incr} \% 4 = 0$	$270 \leq \text{位相} < 360$	$\text{incr} = \text{incr} - 1$ $\text{incr} < 0$ の場合、 $\text{incr} = 4 \times N - 1$

注意

この補正方法は、アナログ A と B とデジタル信号 A_{TTL} と B_{TTL} との間の位相シフトが $\pm 90^\circ$ 未満の場合にのみ機能します。

この設計のワーストケースの計算について、[セクション 1.4](#) に概説します。

1.3.1.6 分解能、精度、速度に関する検討事項

理想的な補間角度分解能は、Sin/Cos エンコーダのライン カウントとデュアル ADC の分解能の関数です。等価補間した角度分解能は、次のように計算できます。

$$\Phi_{\text{RESOLUTION}} [\text{bit}] = \log_2(2 \times N) + \text{ADC}_{\text{RESOLUTION}} [\text{bit}] \quad (6)$$

図 1-7 に、補間なし、理想的な 12 ビットによる補間、および 16 ビットのデュアル ADC 向けのライン カウントの関数として、達成可能な補間角度分解能を示します。

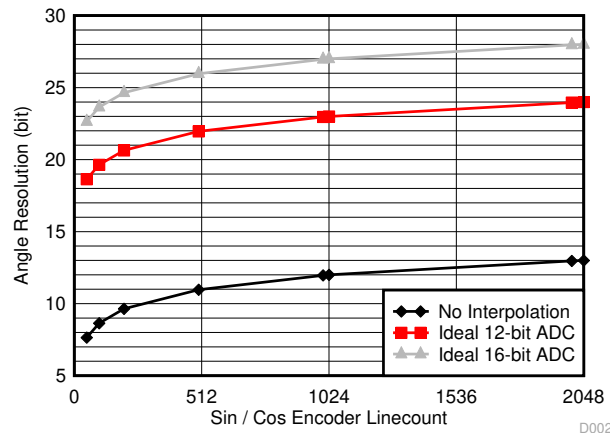


図 1-7. 理想的な補間角度分解能とライン カウントと ADC 分解能との関係

ADC のフルスケール入力範囲を使用する場合、16 ビットのデュアル ADC を使用した 2048 ライン カウントの Sin/Cos エンコーダでの理想的な分解能は、28 ビットに相当します。

この高分解能は通常、位置制御には必要ありませんが、特に機械的速度が低い場合には、非常に正確な速度制御に対してが必要です。図 1-8 に、ローパス フィルタを使用せずにサンプル レート 1.6kHz で得られる理想的な速度分解能の概要を示します。これは、産業用ドライブの速度閉ループ制御が、16kHz 時に電流閉ループ制御や PWM に比べて 10 分の 1 未満で動作すると仮定しています。

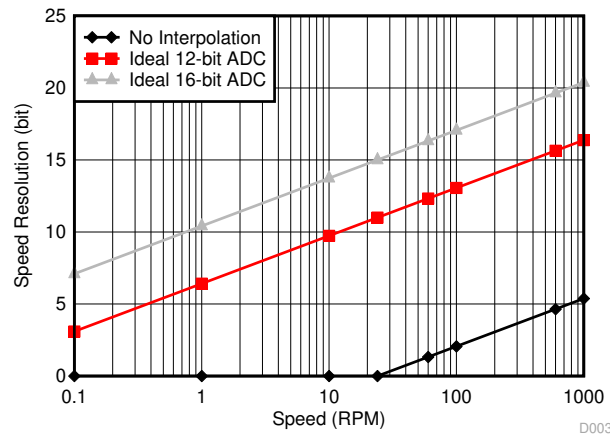


図 1-8. 理想的な速度分解能と機械的速度との関係 (サンプル レート 1.6kHz)、および 1000 ライン カウントのエンコーダ

事実上、ローパス フィルタを適用すると、分解能やノイズ耐性を向上させるものの、フィルタ固有の伝搬 (グループ) 遅延やレイテンシが伴います。

理想的な分解能 表 1-7、図 1-9、図 1-10 に続いて、量子化、オフセット、ゲイン、または位相誤差が補間角度に与える影響の概略を示します。

表 1-7. 位相誤差例の解析

誤差発生源	例	位相誤差 [MAX]
信号 A と信号 B の量子化	12 ビット	0.012% [0.045°]
信号 A および B のオフセット誤差	0.1%	0.05% [0.18°]
信号 A と B のゲイン誤差	0.1%	0.04% [0.15°]
入力信号 A と B との間の位相シフト	90 + 0.36° [0.1%]	0.1% [0.36°]

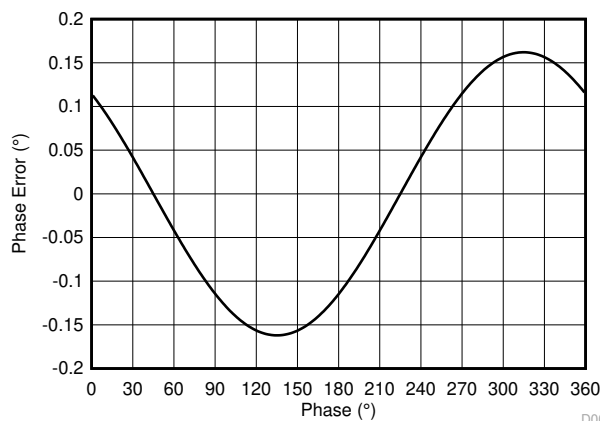


図 1-9. 信号 A および B での +0.1% オフセットの位相誤差

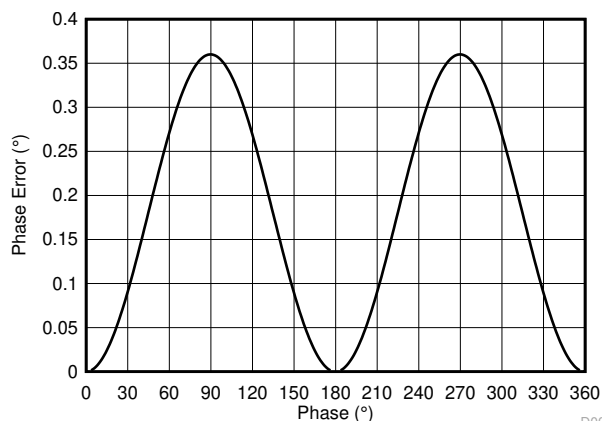


図 1-10. 信号 A と B との間での位相シフト (90 + 0.36°) による位相誤差

入力信号 A と B との間の位相シフトにより発生する位相誤差は二重周期を示すことに注意してください。このシグネチャを活用して、信号処理アルゴリズムを使用して、一定の位相シフトの検出と補正を行うことができます。ただし、これらは本設計ガイドの範囲外です。

1.4 アナログ回路仕様に対する Sin/Cos エンコーダ パラメータの影響

アナログ回路を指定するには、[セクション 4](#) に示すように、次の Sin/Cos エンコーダ信号パラメータ (長いケーブルへの対応を含む) が考慮されています。

- Sin/Cos の最小および最大ピークツーピーク振幅: 差動 0.3 ~ 1.2V_{pp}、フルスケール入力範囲、50% 以上のヘッドルーム (1.8V_{pp})
- Sin/Cos オフセット電圧範囲: 2.5V ± 1V
- Sin/Cos 最大周波数: 500kHz
- Sin/Cos 最大スルーレート: > 2V/μs
- Sin/Cos ライン終端: 120Ω ± 1%
- エンコーダの電源電圧および電流: 5V ± 5%、200mA

1.4.1 位相補間に関するアナログ シグナル チェーン設計の検討事項

特に高精度の速度制御向けに、高分解能アナログ シグナル チェーンは 16 ビットの分解能をサポートし、補間した角度分解能を実現します。

差動アナログ アンプの AC ノイズフロアと歪みは、16 ビットの分解能と一致している必要があります。1V_{PP} 入力に関しては、これは約 15μV に相当します。

- 入力電圧ノイズ: $15\mu\text{V}/\text{SQRT}(1\text{MHz}) = 15\text{nV}/\text{SQRT}(\text{Hz})$
- 入力電流ノイズ: $15\mu\text{V}/\text{SQRT}(1\text{MHz})/R_{\text{INPUT}}$ 、 $R_{\text{INPUT}} = 1\text{k}$ の場合、 $15\text{pA}/\text{SQRT}(\text{Hz})$ に相当

ゲインとオフセットはどちらも DC パラメータであり、そのドリフトは主に温度または経年変化に関係するもので、通常は非常に低速です。初期オフセットとゲインは、初期化時に校正が可能で、実行時でも特定のアルゴリズムを使用できます。したがって、これらのパラメータの要件をわずかに緩和できます。温度範囲全体でのゲインとオフセットのドリフトは、それぞれ 10LSB の範囲にする必要があります。1V_{PP} の入力信号に関しては、これは約 150μV に相当します。

- オフセットのドリフト [0 ~ 85°C]: $150\mu\text{V}/85^\circ\text{C} \sim 2\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
- ゲインドリフト: [0 ~ 85°C]: $160\text{ppm}/85^\circ\text{C} \sim 2\text{ppm}/^\circ\text{C}$

ゲイン設定については、マッチング済み抵抗 (同じパッケージ) を推奨します。

1.4.2 増分カウント用のコンパレータ機能システムの設計

図 1-5 を再度参照してください: アナログ信号とデジタル信号 (500kHz 時の ATT_L および BT_T) との間の総伝搬遅延は 90° 未満、500ns に相当する必要があります。ハードウェアの寄与率は約 50 ~ 70% 以下にする必要があります。これは 250 ~ 350ns に相当し、たとえばハードウェアに起因するオフセットや温度ドリフト、アナログ ローパス / デカップリング フィルタによる位相シフト、以後のホスト プロセッサにおける非理想的な同期などに対応するためのヘッドルームを確保するためです。

コンパレータへの最小 0.3V_{PP} 入力で 160mV のヒステリシス (±80mV) があつたとき、遅延に対するヒステリシスの寄与は約 32 度であり、つまり 500kHz の信号周波数で 180ns です。

コンパレータの伝搬遅延が加算されます。コンパレータの伝搬遅延が短いほど、ヒステリシスを増やすためのヘッドルームや、システムのノイズ耐性を高めるための他の手段を適用することができます。

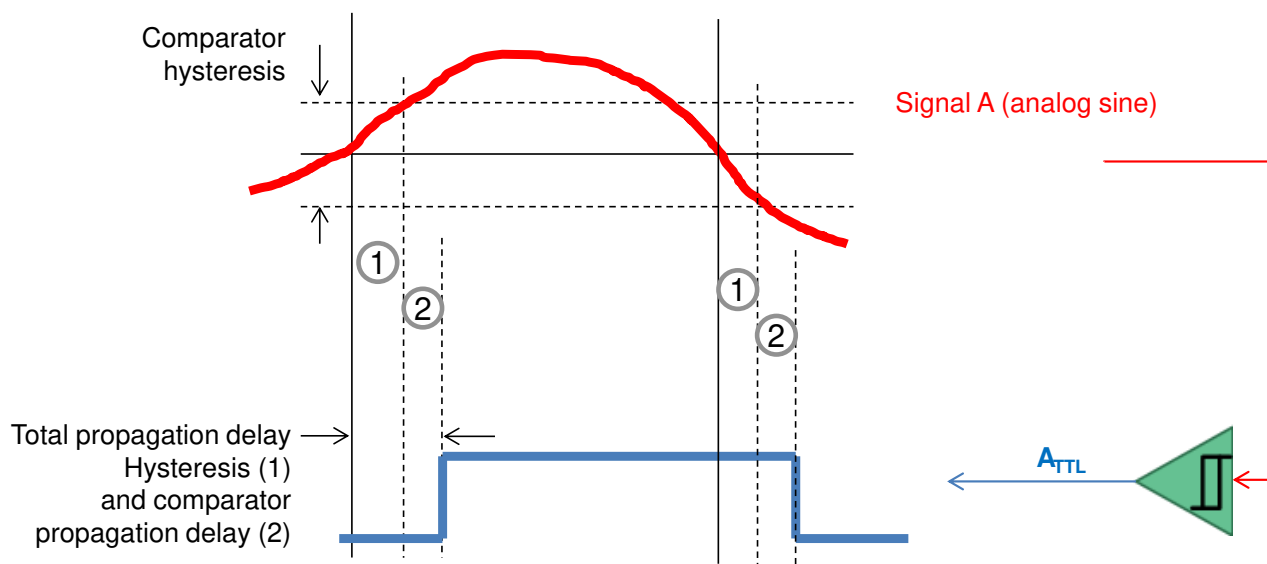


図 1-11. ヒステリシス付きコンパレータでの信号遅延

2 デザインの特長

セクション 1 で概説したように、この TI 設計は、最高 500kHz の入力周波数と 5V 電源電圧による差動 1V_{pp} アナログ出力信号 A、B、索引マーカー R を使用し、Sin/Cos インクリメンタル ポジション エンコーダに対する産業用温度、EMC 準拠のインターフェイスを実現しています。この TI 設計の主要なビルディング ブロックは、デュアル パス アナログ シグナル チェーン、高速コンパレータ ブロック、パワー マネージメント ブロック、Sin/Cos エンコーダへのインターフェイス、および デジタル信号処理と高分解能位置計算用のホスト マイコンへのインターフェイスです。

この TI 設計を容易に評価できるように、TMS320F28069M InstaSPIN-MOTION LaunchPad にはサンプル ファームウェアが用意されています。TMS320F28069M は、SPI 経由の外付け 16 ビット ADC と内蔵のデュアル S/H 12 ビット ADC を使用して、両方の信号路の高分解能角度位置を計算し、USB 仮想 COM ポート経由で最大 28 ビットの分解能で角度位置データを出力します。

TIDA-00176 機能の概要

- 幅広い入力電圧範囲: 逆極性保護機能を備えた 24V (17 ~ 36V) により、アナログ シグナル チェーンに必要な電圧や、Sin/Cos エンコーダに必要な 5.25V の電圧を供給します。
- エンコーダのインターフェイス: 2.5V ±1V オフセットで 0.3V ~ 1.2V_{pp} の差動出力信号 A、B、マーカー R を持つ 5V Sin/Cos エンコーダへの Sub-D15 または 8 ピン ヘッダー インターフェイス、最高 500kHz の入力帯域幅。
- デュアル パス アナログ信号処理: SPI 付きのオンボード高速高分解能デュアル 16 ビット同時サンプリング ADC と、1.65V バイアス電圧を備えたデュアル アナログ出力を備えたデュアル パス オプションにより、外部デュアル S/H ADC との接続を可能にします。ノイズ耐性を高めるために 160mV のヒステリシスを調整可能な高速、低伝搬遅延のコンパレータにより、アナログ信号 A、B、R を 3.3V TTL 信号 (多くの場合 ABZ 信号と呼ばれる) に変換できます。
- 高分解能で角度位置を補間、最大 28 ビットの分解能、ケーブル長 70m までテスト済み。
- EMC 耐性: この設計は、EMC 耐性要件および可変速度、電力駆動システムに適用可能な特定のテスト方法に関する規格 IEC 61800-3 に規定されている IEC61000-4-2、4-4、4-5 (ESD、EFT、サージ) に対してテストされています。
- MCU QEP および SPI への 3.3V デジタル インターフェイス信号と、マイコン内蔵デュアル S/H ADC 用のオプションのシングルエンド アナログ 0 ~ 3.3V 出力によるホスト プロセッサとのインターフェイス。
- 評価用ファームウェア: 16kHz で高分解能デュアル角度位置計算機能を搭載した Piccolo F28069M マイコン向けのサンプル ファームウェア。USB 仮想 COM ポートを介したユーザー インターフェイスにより、性能を簡単に評価できます。

2.1 Sin/Cos エンコーダ インターフェイス

この設計には、HEIDENHAIN エンコーダ テスト機器と互換性のあるシールド付き Sub-D15 メス型コネクタ、または差動出力信号 A、B、およびマーカー R を使用して 5V Sin/Cos エンコーダとのインターフェイスを行うための 8 ピン ヘッダ コネクタが用意されています。

表 2-1. Sin/Cos エンコーダ インターフェイス

パラメータ	標準値	備考
エンコーダの電源電圧	5.25V [±5%], 200mA	長いケーブルでの電圧降下を補償できるよう、追加の 0.25V マージンを得るために 5.25V が選択されています。 帰還抵抗の変更により、5V などに調整可能
入力信号	A+, A-, B+, B-, R+, R-	120Ω 差動ライン終端
A+, A-, B+, B- の入力レベルおよび同相電圧範囲	0.3V – 1.2V _{pp} , 2.5V ± 1.0V 同相モード	
R+, R- の入力レベルおよび同相電圧範囲	0.2V – 0.85V _{pp} , 2.5V ± 1.0V 同相モード	

2.2 ホストプロセッサインターフェイス

信号 A+、A–、B+、B– の高分解能パスは、差動入力と SPI 出力を備えた高速、高分解能のデュアル 16 ビット同時サンプリング ADC が特長です。この機能ブロックの主な特長については、表 2-2 に概説します。

表 2-2. ADC と SPI 出力を備えた 16 ビット高分解能チャネル

パラメータ	標準値	備考
ゲイン A、B	5.0 (0.1%)	整合シングル パッケージ ゲイン設定レジスタ (0.1%)
ゲインドリフト A、B	2ppm/°C	マッチング済みシングル パッケージ抵抗
オフセット、A、B	< 10LSB (16 ビット時)	キャリブレーションなし
オフセットのドリフト、A、B	< 0.15LSB/°C	
帯域幅 (–3dB)	≥ 500kHz	
量子化	16 ビット	FSR = ±5V (ADS8354) ドロップイン互換の 14 または 12 ビット バージョンを利用可能
サンプリング周波数	最大 700kSPS	
データ出力形式 A、B	16 ビットの 2 の補数	
シリアル インターフェイス (SPI スレーブ)	3.3V、最大 24MHz の SPI クロック	SPI フレームあたりデュアル 16 ビット データ

信号 A+、A–、B+ における並列の 2 番目のパスは、1.65V バイアス電圧を持つ A および B のシングルエンドアナログ出力を提供し、外部デュアル S/H ADC (例: C2000 Piccolo などのマイコンに組込み) と接続します。

表 2-3. シングルエンド アナログ出力のアナログ チャネル

パラメータ	標準値	備考
シングルエンド アナログ出力 A および B	0 ~ 3.3V、1.65V バイアス電圧 [50ppm/K]	0 ~ 3V 入力および 1.5V バイアスを持つ ADC に適合するドロップイン互換の 1.5V 基準電圧を利用可能。
ゲイン (A、B)	1.66 (0.1%)	可変、0.1% 抵抗を推奨
オフセット (A、B)	< 1mV	キャリブレーションなし
オフセットのドリフト (A、B)	< 2μV/°C	
帯域幅 (–3dB)	~ 500kHz	帯域幅調整用の調整可能な LP フィルタ

コンパレータ ブロックは、高速で低伝搬遅延のコンパレータが特長であり、ノイズ耐性を高めるために 100mV のヒステリシスを調整可能で、アナログ信号 A、B、R を 3.3V TTL に変換できます。

表 2-4. コンパレータ

パラメータ	標準値	備考
デジタル出力信号 A、B、R	3.3V TTL	
ヒステリシス	~ 160mV (±80mV)	ノイズ耐性を向上するため、帰還抵抗の変更に より調整可能
伝搬遅延	~ 40ns	低伝搬遅延
最大位相遅延 (伝搬遅延およびヒステリシス)	< 60°	0.3V _{PP} 時、500kHz 入力

2.3 評価用ファームウェア

TIDA-00176 設計の迅速な評価を可能にする **Piccolo F28069M** マイコン用のサンプル ファームウェアが提供されています。このファームウェアでは、**16 ビット デュアル ADC** である **ADS8354** と、**F28069M** マイコンの組込みデュアル **S/H 12 ビット ADC** の両方に対して、補間した高分解能角度を計算します。**115000** ボーの **USB 仮想 COM** ポートを介したユーザー インターフェイスにより、性能を簡単に評価できます。

115000 ボーの仮想 **COM** ポートを介したユーザー インターフェイスでは、次の機能がサポートされています。

- **Sin/Cos** エンコーダのライン カウントの選択: 最大 **32000**
- **SPI** を介して外部デュアル サンプリング **16 ビット ADC**、内蔵 **12 ビット デュアル S/H ADC**、同期遅延 **100ns** 未満の増分カウンタを、ハードウェアとソフトウェアで同期サンプリング
- **32 ビット**、分数 **Q28** 形式で高分解能角度を実現。角度を **0 ~ 0.9999999** まで単位ごとにスケールリング、最大 **28 ビット**の補間角度分解能
- 索引マーカー **R** の最初の出現後に、自動的に絶対位置を初期化
- **TIDA-00176** デザインに搭載されている **16 ビット デュアル ADC (ADS8354)** と **C2000** オンチップの **12 ビット デュアル S/H ADC** の両方を使用して、合計角度、増分角度、位相の **10Hz** での表示モードまたは **200Hz** 更新レートでのデータ ダンプ モードをサポートするメニュー
- エンコーダが接続されていない場合、または差動入力電圧が **0.3V_{pp}** を下回った場合の診断エラーメッセージ

2.4 パワー マネージメント

この TI 設計は、**17V ~ 36V** の広い入力電圧範囲に対応し、逆極性保護機能を備えた **24V DC** 入力を特長としています。オンボード パワー マネージメントは、**DC/DC** 降圧コンバータに分割され、中間 **6V** レールと **3** つの **LDO** を生成します。これらの **LDO** は、対応する **3.3V**、**5V**、**5.25V** レールを生成します。

5.25V エンコーダ電源は、超低ノイズ **LDO** およびイネーブル ピンを備えています。このため、**Sin/Cos** エンコーダの電源電圧は、必要に応じて、ホスト プロセッサを介してオフにできます。

表 2-5. TIDA-00176 電圧レール

パラメータ	電圧	CURRENT	備考
入力	24V [17 ~ 36V]	150mA	広い入力電圧範囲に対応し、逆極性保護機能を搭載
中間レール	6V [±5%]	500mA	中間レール。高効率 (>80%) の DC/DC 降圧電源
エンコーダ電源	5V [±5%]	250mA	長いケーブルでの電圧降下を補償できるよう、追加の 0.25V マージンを得るために 5.25V が選択されています。帰還抵抗の変更により、 5V などに調整可能
5V 電源レール	5V [±5%]	100mA	高精度のシグナル チェーン供給
3.3V 電源レール	3.3V [±5%]	100mA	低精度のシグナル チェーン供給

2.5 EMC 耐性

この設計は、IEC61000-4-2、4-4、4-5 の ESD、EFT、サージ要件を満たしており、IEC 61800-3 規格の「可変速度、電力駆動システムに対する EMC 耐性要件」で規定されているレベルで動作します。位置エンコーダへの SubD-15 コネクタのみアクセス可能で、エンコーダへの接続にシールド付きエンコーダ ケーブルを使用することを想定しています。エンコーダ ケーブルは

30m を超える可能性があるため、環境 2 で使用するために、表 2-6 に従って ESD、EFT、サージが適用されます。

表 2-6. EMC 耐性要件

PORT	EMC テスト	EMC 規格	レベル	性能 (合格) 基準
Sin/Cos エンコーダ インターフェイス コネクタ	ESD	IEC61000-4-2	CD が不可能な場合は $\pm 4\text{kV}$ CD または 8kV AD	B
	ファストトランジェント パースト (EFT)	IEC61000-4-4	$\pm 2\text{kV}/5\text{kHz}$ 、容量性クランプ	B
	サージ $1.2/50\mu\text{s}$ 、 $8/20\mu\text{s}$	IEC61000-4-5	$\pm 1\text{kV}$ シールド ケーブルが 20m 超であるため、シールドに直接結合 (2Ω のソースインピーダンス)	B

性能 (合格) 基準を以下のように定義します:

表 2-7. 性能基準

性能 (合格) 基準	説明
A	モジュールは意図した動作を継続すること。テスト実施中も機能や性能の損失がないこと
B	一時的な性能低下は許容される。テスト後、手動による介入なしに、モジュールは意図した動作を継続すること。
C	テスト実施中、機能の損失は許容されるが、ハードウェアやソフトウェアの破損はないこと。テスト後、手動による再起動、電源切断、電源投入のいずれかの後、モジュールは意図した動作を自動的に継続すること。

3 ブロック図

図 3-1 に、この設計のシステム ブロック図を示します。この TI 設計の主要なビルディング ブロックは、アナログ シグナル チェーンのデュアル パス、高速コンパレータ ブロック、パワー マネージメント、デジタル信号処理および高分解能位置計算用の Sin/Cos エンコーダおよびホスト マイコンへのインターフェイスです。TIDA-00176 設計を容易に評価できるように、F28069M Piccolo LaunchPad 向けにサンプル ファームウェアが提供されています。このファームウェアは、仮想 COM ポート経由で角度位置を出力します。

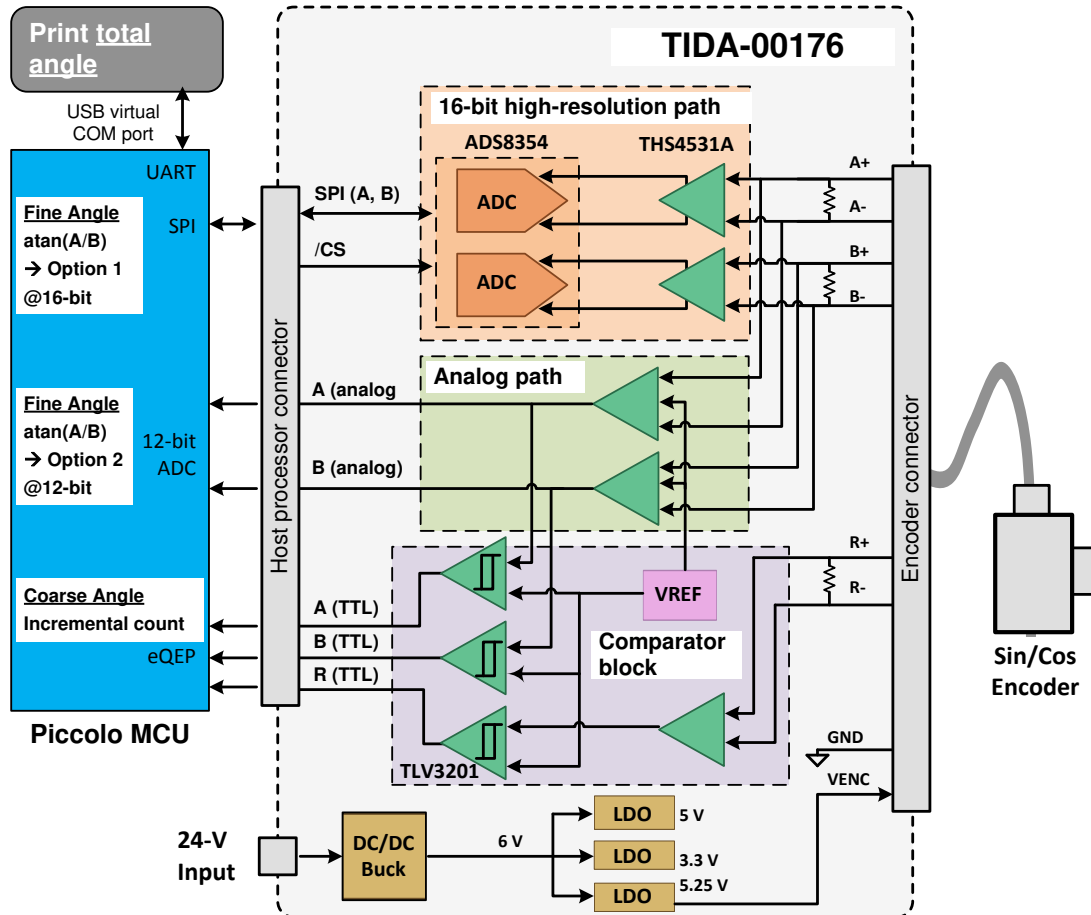


図 3-1. Piccolo F28069M LaunchPad を使用した TIDA-00176 のシステム ブロック図

アナログ シグナル チェーンは、EMC 保護機能付きの 120Ω の終端を実現し、差動 1V_{pp} のサイン入力信号とコサイン入力信号をそれぞれ増幅およびレベル シフトします。デュアル信号路オプションには、SPI 付きのオンボード ADS8354 高速デュアル 16 ビット同時サンプリング ADC と、1.65V バイアス電圧を備えたデュアル アナログ出力を持つアナログ パスが含まれており、たとえば C2000 Piccolo などの MCU に内蔵された外部デュアル S/H ADC との接続を可能にします。

この高速で低伝搬遅延のコンパレータブロックは、調整可能なヒステリシスを採用しており、ノイズ耐性を向上させることができます。また、アナログ信号 A、B、マーカー R を 3.3V TTL レベルでデジタル信号に変換し、C2000™ Piccolo MCU 上の QEP モジュールなどの直交エンコーダ パルス モジュールとのインターフェイスを確立します。

入力範囲が広いオンボードの 24V 電源により、アナログ シグナル チェーンに必要な電圧や、Sin/Cos エンコーダに必要な 5.25V を供給します。

Sin/Cos エンコーダ インターフェイスには、15 ピンのシールド付き Sub-D コネクタまたは 8 ピン ヘッダーがあります。ホスト MCU へのインターフェイスは、SPI、A、B、R 用のデジタル 3.3V TTL 準拠信号のほか、1.65V バイアス電圧で 0 ~ 3.3V にスケールされたアナログ信号 A および B を提供します。

4 回路設計と部品選定

4.1 アナログ シグナル チェーン ガイド

アナログ シグナル チェーン サブシステムとコンパレータ サブシステムの概要を [図 4-1](#) に示します。アナログ シグナル チェーンの場合、次の 2 つのパスが実装されています：

- 完全差動アンプと、SPI 出力を持つ完全差動デュアル 16 ビット ADC を備え、同相モードのノイズ耐性を向上した高分解能の信号路
- コンパレータを駆動するための差動入力シングルエンド アナログ出力を持つアナログ パスと、さらに ADC を内蔵したホスト プロセッサとのインターフェイスとして機能

このデュアル アナログ パスを使用すると、高分解能パスの一部としてオンボード 16 ビット デュアル ADC を使用して設計をテストすること、または ADC 内蔵のマイコンを使用してアナログ差動からシングルエンドへの変換を行うパスを使用することができます。さらに、高分解能パスからバッファでデカップリングされるアナログ パスにより、コンパレータ パスの理想的なデカップリングが実現されます。これにより、正弦波と余弦波のゼロ交差中に出力レベルを切り替えるときに、高分解能アナログ パスへのクロストークが回避されます。

もう 1 つの使用事例では両方のパスを使用します。一方のパスは、HF ノイズをフィルタリングするために帯域幅を狭めてノイズ耐性を向上させ、もう一方のパスは、最高速度まで標準的な帯域幅を提供します。ノイズ耐性が向上した狭帯域幅は高分解能の

16 ビット ADC 専用になり、標準帯域幅を持つもう一方のパスは、ADC 内蔵のマイコンへ接続されます。その後、モーター速度が低い場合 (設定されているカットオフ周波数未満)、補間した位相 (アークタンジェント) は高分解能のパスから取得されますが、高速では、もう一方のパスからの補間した位相が使用されます。ホスト プロセッサは、保留中のモーター速度を使用する角度を決定します。

コンパレータ サブシステムは、非常に短い伝搬遅延で信号 A、B、R の TTL レベル出力を生成します。以下のセクションで、各サブシステムについて説明します。

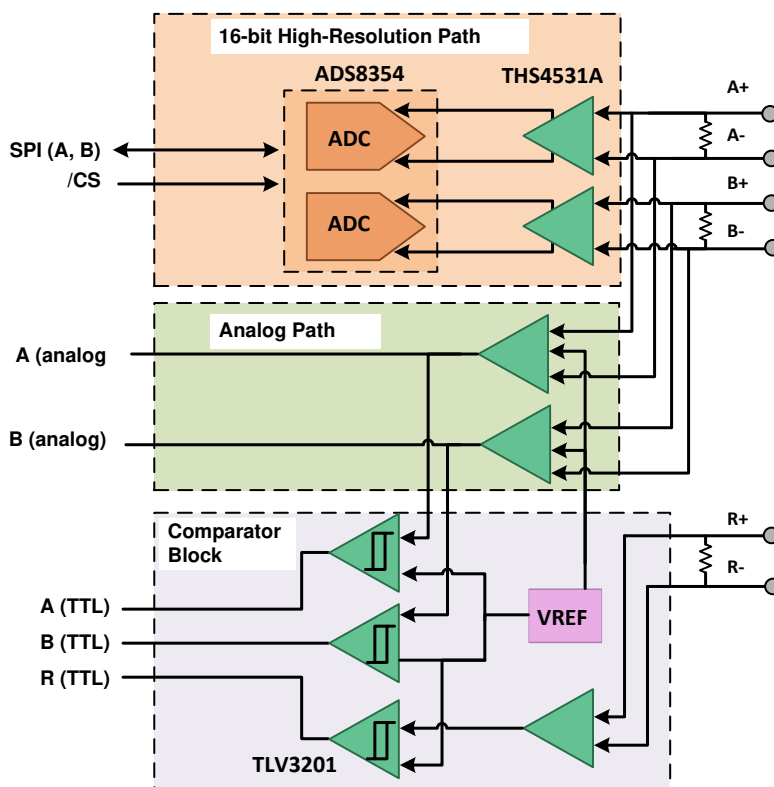


図 4-1. アナログ シグナル チェーン ガイド

4.1.1 16 ビット デュアル サンプリング ADC を使用する高分解能の信号路

4.1.1.1 部品選定

設計要件を満たすには、高精度デュアル チャンネル ADC が必要です。次の理由から、ADS8354 を選択しました。

- 高分解能 (16 ビット)、高精度 (非常に優れた THD および SNR 性能: -93dB SNR、 -100dB THD)
- コスト最適化と比べて、必要な分解能に対するフレキシビリティを実現するドロップイン ピン互換性のある 14 ビットと 12 ビットの各バージョン
- 500kHz 以上のアナログ入力信号をサポートする高速 (700kSPS) と帯域幅
- 真の差動入力とデュアル / 独立したリファレンス電圧を搭載したデュアル チャンネルで、同相ノイズ耐性を改善
- デュアル チャンネル、2 つのチャンネルの同時サンプリングにより、サインおよびコサイン入力信号 A および B との間で位相シフトがゼロであることを保証
- ハードウェア (ICS の立ち下がりエッジ) によってトリガされるサンプル ポイントを使用すると、ホスト プロセッサは増分カウンタ ラッチを使用して、サンプル ポイントを高精度で同期させることができます。
- サンプル / ホールド回路は、変換プロセスが完了した後でサンプル モードに戻るため、比較的長いサンプル時間で 16 ビット精度に安定
- デュアル、プログラマブル、バッファ付き 2.5V 内部リファレンスにより、アンプに同相モード バイアス電圧を供給し、オフセットおよびオフセットのドリフトに関連する誤差をほぼキャンセルできます。
- 最高 24MHz のクロック周波数でのホスト プロセッサ (デュアル データ) へのシリアル インターフェイスにより、レイテンシを最小化
- 拡張産業温度範囲の全体にわたって完全に仕様を規定: $-40^{\circ}\text{C} \sim 125^{\circ}\text{C}$
- 小型パッケージ

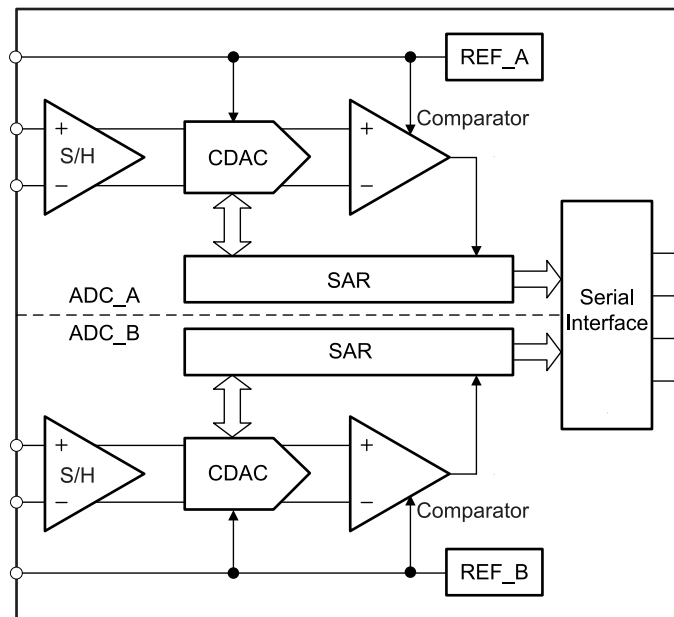


図 4-2. ADS8354 のブロック図

ADS8354 の性能を活用するには、THS45xx ファミリのよう出力同相電圧を構成可能な完全差動高速アンプが必要です。

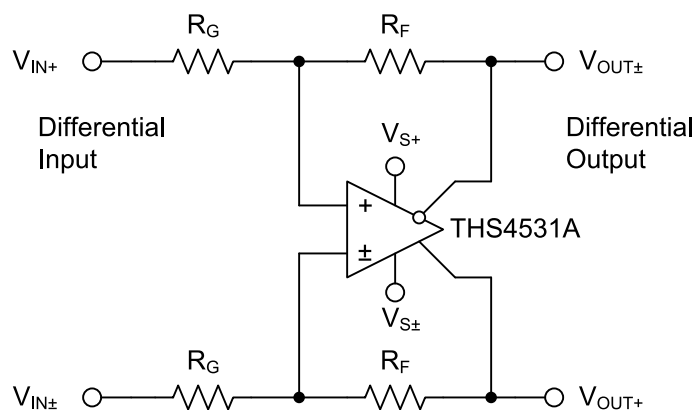


図 4-3. 差動入力 / 差動出力アンプ

信号は完全差動に維持されます。ゲインとオプションのフィルタリングは、入力抵抗と帰還抵抗、およびコンデンサによって定義されます。ゲインは R_F/R_G の比で設定され、出力同相電圧は入力信号 V_{OCM} により設定されます。

THS4531A を選択したのは、トポロジを満たし、ADS8354 を駆動でき、[セクション 1.4](#) で規定されている AC および DC 要件を満たしているからです。THS4532 のようなパッケージ別のデュアル差動アンプではなく、パッケージ別のシングルアンプトポロジを採用することで、柔軟性を高め、PCB 配線を容易にしています。

この設計で使用する THS4531A の主要なパラメータは次のとおりです。

- 可変出力同相電圧を備えた完全差動アーキテクチャ
- 高ゲイン帯域幅: 27MHz ($G = 5$ で 6MHz)
- 低歪み、THD -120dBc (1kHz 時) ($1V_{\text{RMS}}$, $R_L = 2\text{k}\Omega$)
- 小さい入力電圧ノイズ: $10\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ ($f = 1\text{kHz}$)
- 非常に低いオフセット、 $V_{OS}: \pm 100\mu\text{V}$
- 非常に低いオフセットのドリフト、 V_{OS} ドリフト: $\pm 2\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ (産業用温度範囲)
- ADS8354 と同じ電源を活用できる単一 5V 電源
- レール ツー レール出力 (RRO) と負のレール入力 (NRI) により、入力と出力の信号スイングを最大化

4.1.1.2 入力信号の終端と保護

差動入力信号は、それぞれ 120Ω の抵抗で終端されます。差動および同相モード HF ノイズ除去のために、COG コンデンサを追加します。差動ローパスフィルタのカットオフ周波数 (-3dB) は、約 6MHz です。 10Ω (1%) のパルス耐性抵抗とショットキー ダイオードを組み合わせで 5V レールまたは GND にクランプし、入力電流制限による ESD 保護を実現します。図 4-4 に、エンコーダの差動信号 $\text{A}+$ (サイン) と $\text{A}-$ (コサイン) の入力段の TIDA-00176 回路図を示します。

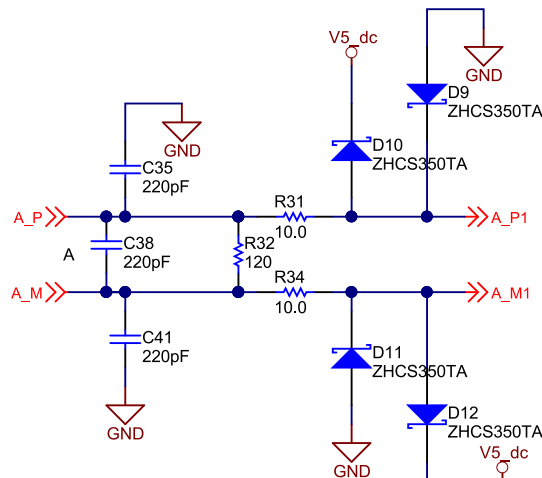


図 4-4. アナログ入力の終端

エンコーダ信号 $\text{A}+/\text{A}-$ (回路図では「 $\text{A}_\text{P}-\text{A}_\text{M}$ 」と名付けられています) シグナル コンディショニング ブロック回路図を左から右に見ると、以下の部品 / 機能を区別できます：

- HF ノイズ抑制 COG コンデンサ: $\text{C}35$ 、 $\text{C}38$ 、 $\text{C}41$ 。同相信号除去を高めるため、各差動入力から GND への 220pF の COG コンデンサと並列に、追加の 2nF の COG コンデンサを配置します。ローパスのカットオフ周波数 (-3dB) は約 6MHz です。
- インピーダンス整合 / 終端抵抗 120Ω : $\text{R}32$
- パルス耐性電流に対応する電流制限抵抗: $\text{R}31$ 、 $\text{R}34$
- クランプ ダイオード / オペアンプの入力保護 ($\text{D}9$ から $\text{D}12$) を 5V レールと GND に接続

LP フィルタは、システム仕様に規定された速度で正しい機能と性能を保証するように設計されています。

4.1.1.3 差動アンプ THS4531A と 16 ビット ADC ADS8354

高精度の逐次比較型 (SAR) ADC の性能を最大化するために必要な 2 つの主要回路は、入力ドライバとリファレンスドライバ回路です。アンプ選択の詳細については、ADS8354 データシートのセクション 9.1 を参照してください。

THS4531A は ADS8354 と組み合わせて動作することを考慮しています。実際、入力信号の同相モードまたは DC レベル (公称 2.5V) は、潜在的なオフセットとドリフト誤差を最小限に抑えるため、ADS8354 自体のリファレンス出力から直接 THS4531A に供給されます。

ADS8354 の差動入力フルスケール レンジは、 $\pm 2 \times V_{REF}$ に構成されます。リファレンス電圧が $V_{REF} = 2.5V$ の場合、FSR は $\pm 5V$ となります。Sin/Cos エンコーダの差動入力電圧の最大値は $1.2V_{PP}$ です。 $1.35V_{PP}$ を超える電圧でも、障害として検出される必要があります。最大ピークツーピーク電圧に 50% の安全マージンを追加すると、電圧は $1.8V_{PP}$ となります。ADC のフルスケール入力範囲を一致させるには、THS4531A のゲインを 5.5 にする必要があります。ただし、5V 電源において THS4531A のリニア出力電圧範囲を維持するには (少なくとも $0.25 \sim 4.8V$)、ゲインを約 10% 低減する必要があるため、理想的な差動アンプのゲインは 5 となります。

最小ゲイン誤差と、特にチャンネル間のドリフトを確実にするには、0.1% 精度と 2ppm/K の温度ドリフトを持つ高精度でマッチングされた抵抗が必要です。ノイズを最小限に抑えるため、低い $k\Omega$ 範囲の帰還抵抗を選択してください (セクション 1.4 を参照)。

高精度のマッチング抵抗分圧器を使用して、潜在的なゲイン誤差を可能な限り小さくします。詳細については、MPMT10015001AT1 のデータシートを参照してください。

ゲインが 5 のため、標準的な $1V_{PP}$ の入力信号は ADC のフルスケール レンジ (FSR) の約 50% を利用し、その結果 1 ビットの精度が低下し、等価な 15 ビットの分解能が得られます。低入力電圧 $0.6V_{PP}$ では、FSR の約 25% を活用します。これは、通常は 14 ビットの分解能に相当します。

図 4-5 に、高精度アナログ信号路の回路図を示します。ここで、整合ゲイン設定抵抗は R18、R27、R30、R37 です。

アンチエイリアシング フィルタの 10Ω 直列抵抗は R21、R25、および $2.2nF$ コンデンサは C29 です (ADS8354 チャンネル B の場合は R33、R36、C39)。ADC 入力に接続されたフィルタ コンデンサ C29 (C39) は、フロントエンドドライブ回路からのノイズをフィルタ処理し、サンプリング チャージ インジェクションを低減して、アキュイジション プロセス中に内部のサンプル/ホールド コンデンサを迅速に充電するためのチャージ バケットを提供します。目安として、このコンデンサの値は ADC サンプリング容量の指定値の 10 倍以上にする必要があります。これらのデバイスの場合、入力サンプリング容量は $40pF$ です。これらのタイプのコンデンサは、高 Q、低温度係数、および電圧、周波数、時間の変化に対して安定した電気的特性を持つため、コンデンサには COG または NPO タイプを使用する必要があります。アンプの安定性の問題を回避するために、アンプの出力に 10Ω の直列絶縁抵抗 R21、R25 (R31、R39) を使用しています。詳細については、ADS8354 データシートのセクション 9.1 を参照してください。

ADC リファレンス REFIO_A と REFIO_B のオフセットのドリフトの影響を最小限に抑えるため、ADC リファレンス電圧を使用して THS4531A のコモン モード出力電圧をバイアスします。THS4531A の V_{OCM} 信号をバッファおよびデカップリングするために、小型の RC フィルタ R24/C32 および R35/C42 R28、R29、C36、C37 を各ピンの近くに追加します。

ADS8354 のリファレンス電圧 REFIO_A と REFIO_B はそれぞれ $10\mu F$ のコンデンサ C36 と C37 でデカップリングされており、 0.22Ω の抵抗を直列に追加して、高周波発振を防止しています。

重要な信号 A+、A-、B+、B- のビアを最小限に抑えてクロストークのレイアウトを最適化するため、以下の接続が行われています。

1. 差動入力信号 A (A+、A-) は THS4531A の入力で反転され、ADS8354 入力チャンネル B に供給されます。
2. THS4531A、B+、B- の差動出力信号は、ADS8354 入力ピン AINP_A から B-、AINM_A から B+ に反転されています。

これにより、次のハードウェア関係が得られます。ADS8354 チャンネル B は反転された Sin/Cos エンコーダ信号 A と等しく、ADS8354 チャンネル A は反転された Sin/Cos エンコーダ信号 B と等しくなります。

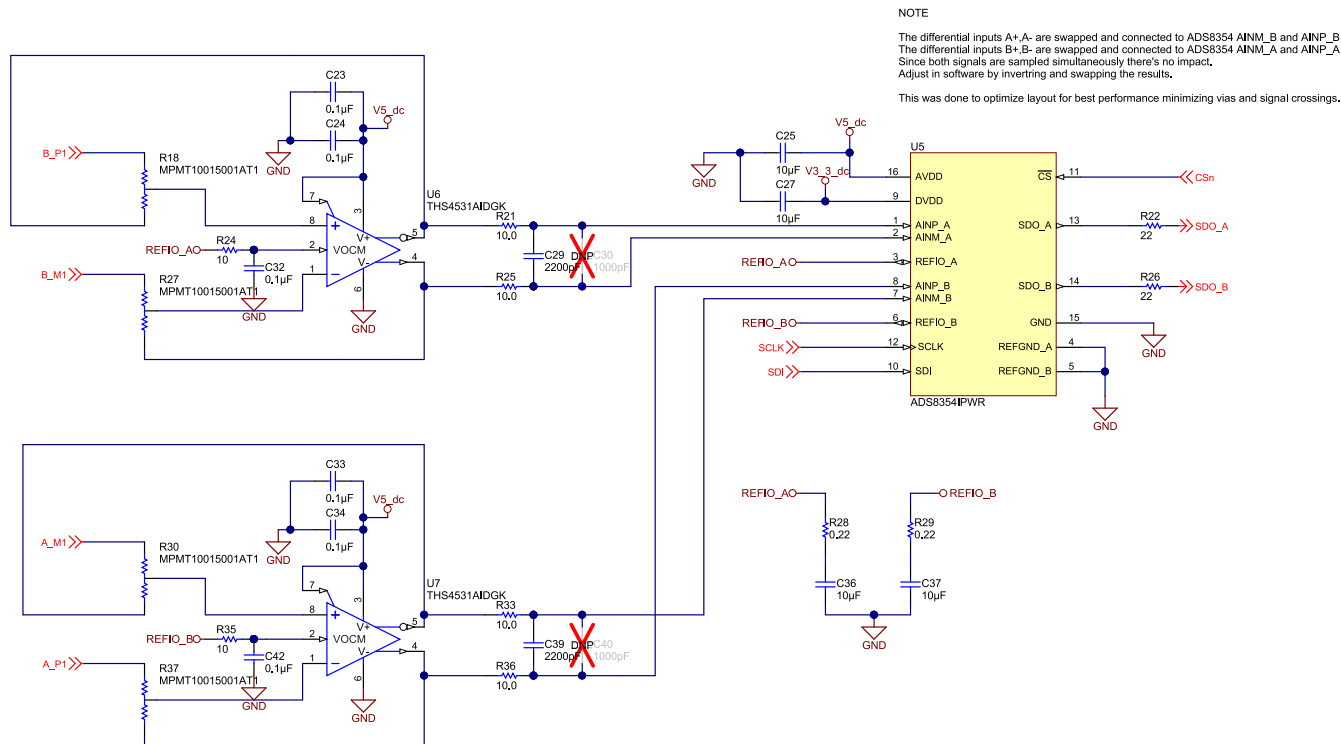


図 4-5. デュアル THS4531A および ADS8354 を使用した Sin および Cos シグナル チェーン

注

最適性能のレイアウトを実現するために、チャンネルは反転および交換されており、ビア数を最小化しています。

帯域幅の低減でノイズ耐性を向上させるには、希望する帯域幅に応じて、10pF 以上のコンデンサ (誤差 1% 以下) を 5kΩ と並列にフィードバックパスへ配置することを推奨します。セクション 4.5 を参照してください。

シリアル インターフェイスを介した ADS8354 レジスタの構成については、セクション 4.3 で説明します。

4.1.2 ADC 内蔵マイコン向けシングルエンド出力のアナログ信号路

並列アナログ信号路は、高分解能パス、特に差動アンプに影響を与えないようにする必要があります。このため、差動信号 A+、A-、B+、B- は、入力終端と保護の後にタップ オフされ、オフセット、特にオフセットのドリフトが非常に小さいユニティゲインアンプでバッファされます。以下のアンプは、差動信号をシングルエンド信号に変換する必要があります。最小帯域幅は 500kHz 以上である必要があります。500kHz

を超える出力信号を持つインクリメンタルエンコーダをサポートするため、理想的にはこれより大きい必要があります。コンパレータへのパスの位相遅延は、最小限のアナログ信号位相シフトを確保するための高分解能パスとほぼ同じにする必要があります。

電源電圧は 5V の単一電源である必要があります。

高分解能チャンネルを一致させるには、両方のオペアンプのオフセットのドリフトの合計が 12 ビット以上の等価精度とする必要があります。理想的には、高分解能チャンネルのアナログ性能と一致する必要があります。入力バッファおよび差動からシングルエンドへの変換については、以下の要因により、OPA2365 を選択しています。

- 5V レールを活用するための 2.2V から 5.5V への動作
- レール ツー レール I/O
- 非常に小さいオフセットおよびオフセットのドリフト: 200 μ V (最大値) と 1 μ V/K (代表値)
- 低い電圧および電流ノイズ: 4.5nV/SQRT (Hz) および 0.004pA/SQRT (Hz)
- 優れた THD+N: 0.0004%
- 大きい同相信号除去 (CMRR): 100dB (最小値)
- スルーレート: 25V/ μ s
- 高速セトリング: 外部 ADC 駆動用、300ns で 0.01% まで

もう 1 つのオプションは OPA2322 です。これは低コストの代替品であり、2mV のオフセット電圧で、AC および DC 性能がわずかに低下しています。

アナログ出力電圧は、1.65V 同相モードを使用して 0 ~ 3.3V の範囲でスケールリングする必要があります。[セクション 4.1.1](#) の最大 1.8V_{PP} 入力電圧と同じ条件を適用し、3.3V の FSR に対して 10% のマージンを適用すると、ゲインは 1.66 となります。

チャンネル A のアナログ信号チェーンを [図 4-6](#) に示します。チャンネル B は同一です。

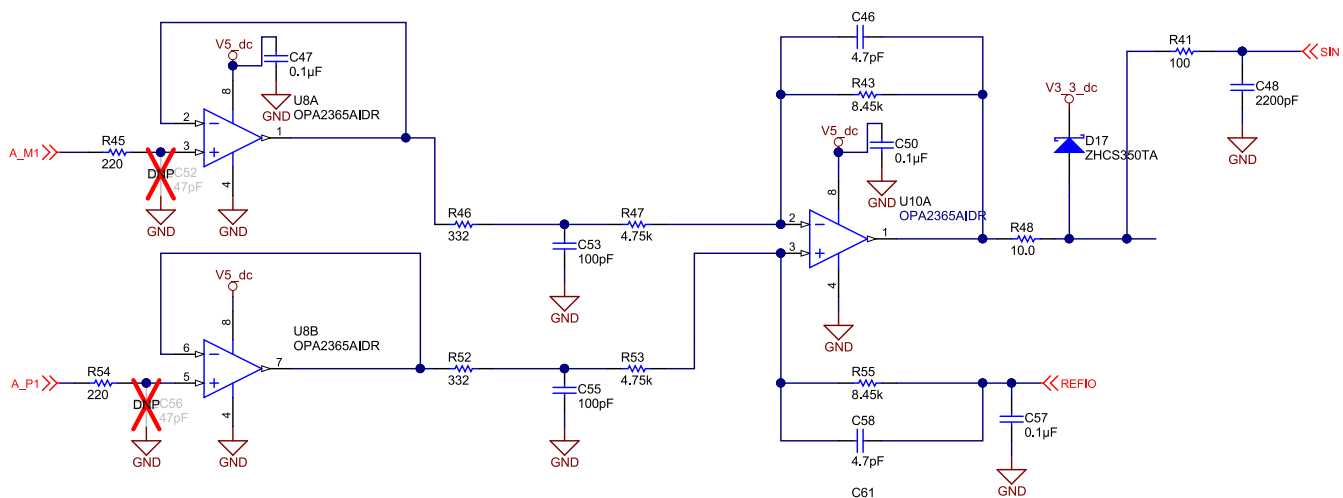


図 4-6. 信号 A (sin) の差動入力からシングルエンド出力へのアナログ信号路、信号 B (cos) は表示されていません

差動信号 A_P と A_N は、220 Ω の抵抗を経由して OPA2365 の非反転入力 (U8A と U8B) に接続されています。OPA2365 (U8A と U8B) は、ソースの負荷や歪みの発生を防止するために、ユニティゲイン バッファとして構成されています。220 Ω の直列抵抗により、過電圧または低電圧の発生時に OPA2365 の非反転入力への電流が制限されます。各バッファの出力は、高周波ノイズを低減するために、たとえば、上の図の R46 と C53 (f-3dB ~ 5MHz) で小型の調整可能な RC フィルタを採用しています。

以下の OPA2365 (U10A) は、差動からシングルエンドへのアンプおよびレベル シフタとして構成されています。ゲインは 1.66 に設定され、出力同相電圧は低ドリフトの電圧リファレンス REF2033 により 1.65V に設定されています。調整可能な 5.6pF の帰還コンデンサを帰還抵抗と並列に追加することで、HF ノイズ フィルタリング (f-3dB ~ 3.5MHz) を実現し、THS4531A の帯域幅と理想的に一致させます。[セクション 4.5](#) を参照してください。

OPA2365 には 5V の電源が供給されるため、直列 10 Ω の電流制限抵抗 (R48) を使用して、アンプの出力は 3.3V (D17) にクランプされます。これは、次のコンパレータ (TLV3202/1) と外部 ADC (通常は 3.3V I/O) を保護するためです。

外部 ADC を駆動するため、アンチエイリアシングおよびデカップリング RC ネットワーク (R41/C48) が追加されています。このフィルタは、C2000 Piccolo マイコン ファミリーに属する組込み 12 ビット デュアル S/H A/ADC で使用するよう最適化されています。他の ADC の場合は、それに応じてフィルタを調整する必要があります。

1.65V バイアス電圧は、100n のコンデンサ (C57) でデカップリングされています。さらに、LP RC フィルタを追加した結果、HF ノイズ成分をより多く低減できるようになりました。特に、スイッチャの TPS54040A の出力を想定しています。

4.1.3 デジタル信号 A、B、R 向けのコンパレータ サブシステム

コンパレータは、アナログ信号 A および B のゼロ交差とマーカー R でのゼロ インデックス パルスを検出し、対応するデジタル 3.3V TTL 互換信号 A_{TTL}、B_{TTL}、R_{TTL} (しばしば ABZ と呼ばれます) を生成するために必要です。セクション 1.4 で概要を示しているように、低伝搬遅延のコンパレータによってシステムにマージンが追加されています。

選択されたコンパレータは、TLV3201 (シングル) および TLV3202 (デュアル)、40ns、マイクロパワー、プッシュプル出力コンパレータであり、以下の主な特性があります。

- 低伝搬遅延: 40ns (標準値)
- 入力オフセット電圧が 1mV (標準値) と低いため、スイッチング スレッショルドの最小ドリフトを保証
- 3.3V I/O ホスト プロセッサの入力を駆動するためのプッシュプル出力
- 産業用温度範囲

250ns の伝搬遅延を実現した TLC372 デュアル コンパレータは、システム全体の伝搬遅延と最大周波数に応じて、より低コストのオプションとなります。TLV320x ファミリーの利点は、他の部品でより多くの遅延を追加でき、同時に 500kHz で要求される最大遅延 500ns を維持できることです。たとえば、ヒステリシスが大きいと伝搬遅延時間が長くなり、同時にノイズ耐性も向上します。

4.1.3.1 ヒステリシス付きの非反転コンパレータ

すべてのコンパレータへの入力信号は、シングルエンドから差動アンプの出力から派生されます。前述のように、出力信号は 3.3V にクランプされ、アナログ シングルエンド信号 A および B とのクロストークを避けるために RC 回路 (信号 A の図 19 の R49、C54 など) でデカップリングされています。

高分解能パスとこのパスとの間で位相が一致し、コンパレータへの入力の RC デカップリング回路が THS4531A 出力の RC フィルタ (2×10Ω と 2.2nF) と一致します。

TLV370x は、アナログ サイン信号とコサイン信号 A および B のゼロ交差とインデックス パルス R を検出するため、非反転コンパレータとして構成されています。図 4-7 に、信号 A に関して対応する回路図を示します。

スイッチング スレッショルドはリファレンス電圧 V_{REF} = 1.65V (REF2033) によって設定されます。この値は、差動からシングルエンドへのアンプのシングルエンド アナログ信号のバイアスにも使用されます。各コンパレータでは、基準入力を REF2033 から取得し、10Ω 直列抵抗 1 個と 100n コンデンサ 1 個でデカップリングします。

ノイズ耐性を高めるため、ヒステリシスが追加されます。非反転コンパレータのヒステリシス (V_{TH+} – V_{TH-}) は、式 7 に従って計算できます。

$$V_{\text{Hysteresis}} = (V_{\text{Out_High}} - V_{\text{Out_Low}}) \times \frac{R_G}{R_F} \quad (7)$$

V_{Out_High} High レベル、V_{Out_Low} Low レベル コンパレータの出力電圧、R_F は帰還抵抗、R_G は非反転コンパレータ入力への入力抵抗です。

この設計の構成では、図 4-7 に示すように、ヒステリシスは式 8 につき約 160mV に設定されています。R49 と R48 の大きさは R50 よりも小さいため、これらは無視できます。

$$V_{\text{Hysteresis}} = 3.3 \text{ V} \times \frac{R_{50}}{R_{51}} \sim 160 \text{ mV} \quad (8)$$

上限と下限のスウィッチング スレッショルド V_{TH+} と V_{TH-} は、リファレンス電圧 $V_{REF} = 1.65V$ の式 9 および 式 10 に従って定義されます。

$$V_{TH+} = 1.65 V \times \left(1 + \frac{R50}{R51}\right) = 1.73 V \quad (9)$$

$$V_{TH-} = (3.3 V - 1.65 V) \times \left(1 - \frac{R50}{R51}\right) = 1.57 V \quad (10)$$

注意

下限スレッショルドは、電源電圧の関数です。ただし、この設計の電源電圧許容誤差は、ほとんどの設計での代表値として 5% です。3.3V 電源電圧に対して $\pm 5\%$ の許容誤差は、下限スレッショルドにわずか $\pm 16mV$ だけ影響を与える可能性があります。ただし、 V_{TH-} の範囲は約 1.56 ~ 1.59V になるため、許容範囲内です。

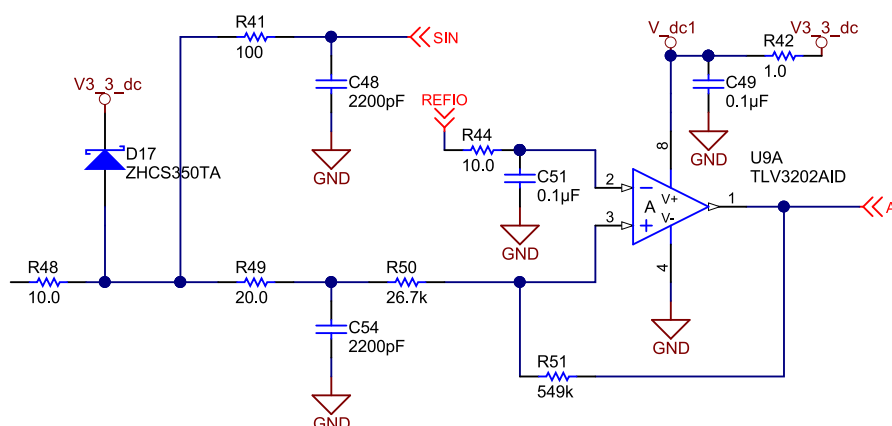


図 4-7. ヒステリシス付き信号 A コンパレータ

各コンパレータの 3.3V 電源は、1Ω の直列抵抗と 100nF のコンデンサでデカップリングされるため、3.3V レールから他のコンパレータへのクロストークを最小限に抑えます。R49 と C54 で構成される RC ローパスは、外部 ADC に接続されるアナログ信号 A/sin からコンパレータ スウィッチング ノードをデカップリングするために追加されます。

ヒステリシスによりクリーンなデジタル信号が可能になるため、ゼロ交差ポイント付近でのノイズによる高速スウィッチングを回避できます。ただし、ヒステリシスには追加の伝搬遅延が発生し、これはコンパレータ入力におけるアナログ信号振幅 $V_{IN_PEAK-PEAK}$ に依存します。

$$f_{\text{Hysteresis}} \sim \sin^{-1} \left(\pm \frac{160 \text{ mV}}{V_{IN_PEAK-PEAK}} \right) \quad (11)$$

最小入力電圧が $0.3V_{PP}$ と仮定すると、次のように動作します: 差動からシングルエンドへのアンプ (ゲイン = 1.66) の出力は、 $0.5V_{PP}$ (0 ~ 100kHz) の振幅を持ち、ローパス フィルタ減衰により 500kHz で約 $0.32V_{PP}$ になります。デジタル信号 A、B、R のヒステリシスに対応する位相遅延は、コンパレータに $0.32V_{PP}$ を入力すると約 30 度になります。その結果、500kHz の場合、コンパレータの総伝搬遅延は約 $170ns + 40ns = 210ns$ になります。

TLV3201 の伝搬遅延がわずか 40ns と小さいため、コンパレータ ブロック全体の遅延は 500kHz まで 45 度未満に維持されます。

信号 B と R のコンパレータの設定は同じです。また、索引マーカー R のバッファリングおよびゲイン段は、信号 A および B と同じです。これは、索引マーカー R の位相が 500kHz の信号周波数までの信号 A および B と正確に同期するためです。これにより、ゼロ インデックス マーカー R が指定されたとおりに、信号 A と B の立ち上がりエッジの少し前に発生

することが保証されます。ゼロ インデックス マーカー R は絶対ゼロ位置を定義します。したがって、位置オフセットを回避するためには、信号 A と信号 B との正確な関係が必要です。

4.2 パワー マネージメント

パワー マネージメントは、24V 入力電圧から 6V 中間レールを生成する DC/DC 降圧回路で構成されています。図 4-8 に示すように、エンコーダの電源電圧と 5V および 3.3V レールは中間電圧から派生します。

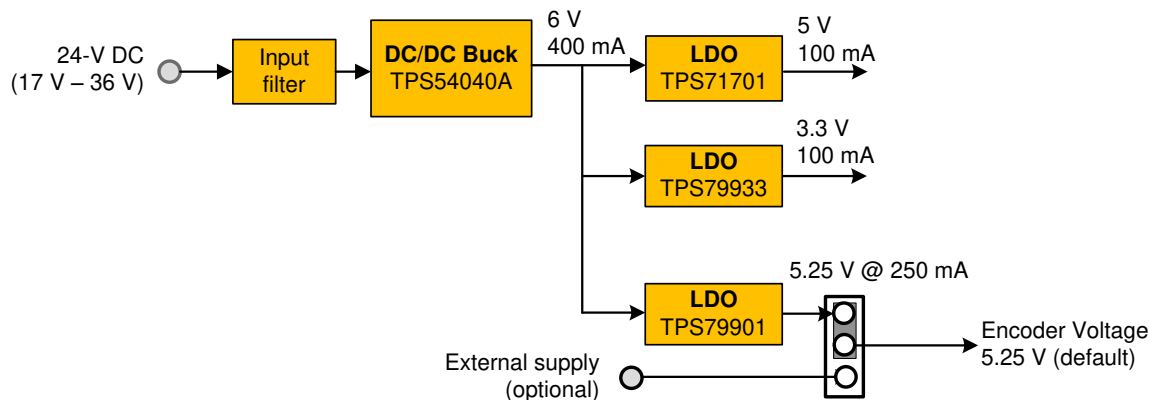


図 4-8. パワー マネージメント ソリューション

システムやソリューションには高性能が必要であるため、ほとんどの電源レールは低ノイズ LDO から供給されています。その欠点は、効率が制限され、低出力電流能力があることです。電力損失が大きくなるため、最大出力電流は放熱性能によって制限されます。

LDO の両端間の電圧降下を低減するために、高効率の DC/DC スイッチング コンバータを使用して 24V 入力から 6V 中間レールを生成する方法を用意しています。適切なレイアウトと部品の選択により、スイッチャ ソリューションが引き起こすノイズを最小限に抑えるよう注意が必要です。

4.2.1 24V 入力から 6V 中間レール

1 個のスイッチング DC/DC コンバータを実装して、3 個の LDO に電力を供給する 6V の中間電圧レールを実現しています。これは基本的に必須の選択肢です。VIN/VOUT 比が高いことから、どの LDO も電力変換には適していないからです。実際、あらゆる LDO の効率は単純に VOUT/VIN として計算できます。ワーストケース (最大 VIN) では、5.25V/36V $\approx 14\%$ になります。消費電力の残りの 86% は、LDO パッケージによって消費されます。実際に最大電流が 200mA の場合、 $36V \times 200mA \times 86\% = 6.2W$ の電力が LDO パッケージで消費されることになり、妥当なパッケージであれば簡単に、そしてすぐに破損してしまうでしょう。

入力フィルタをはじめとして、スイッチング回路の通常の動作によって伝導 EMI が発生することが広く知られています。パワー スイッチのオン / オフが非常に高速に切り替わることによって、大きな非連続性電流が発生します。降圧トポロジでは、コンバータの入力に大きな非連続性電流 (di/dt が大きい) が存在します。図 4-9 に、入力フィルタに対して選択した値を示します。

入力 EMI フィルタの設計方法の詳細については、アプリケーション レポート『AN-2162 DC/DC コンバータから伝導される EMI に対する簡単な対処方法』(SNVA489) をご覧ください。

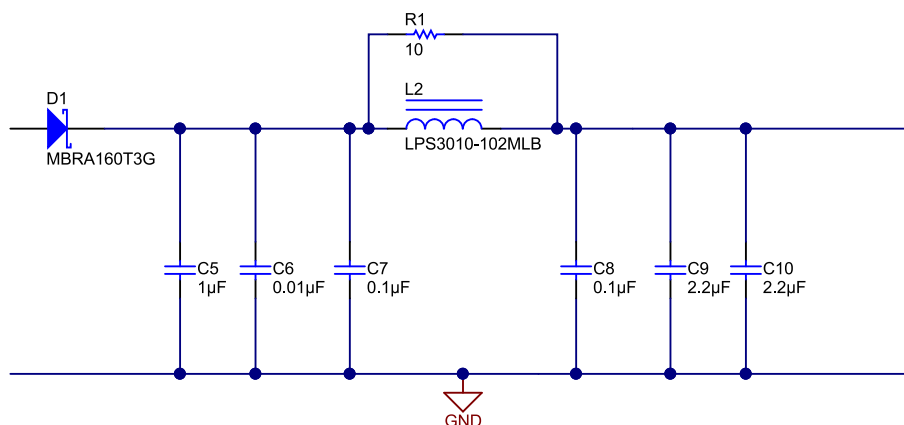


図 4-9. 逆極性保護を含む入力フィルタ

DC/DC 降圧コンバータは、以下の仕様を満たすよう設計されています。

- 入力電圧: $V_{IN} = 17V \sim 36V$ 、公称 24V
- 出力電圧: 6V (500mA 時)
- スイッチング周波数: 公称 500kHz
- 出力電圧リップル: 25mV_{PP} (最大値)
- 効率: 全負荷時で 80% 超
- 非絶縁型トポロジ

TPS54040A は以下の目的のために選択されています: これは、内蔵 FET、3.5 ~ 42V 入力電圧、500mA の出力電流で 0.8 ~ 39V の出力電圧を備えた降圧コンバータです。その周波数は 100kHz ~ 2.5MHz の範囲で変更でき、外部クロックと同期させることもできます。また、有効または無効にすることもできます。これらの特長から TPS54040A は、上記の要件 / 仕様に非常に適合しています。

TPS54040A は TPS5401 とピン互換性があります。TPS54040A からさらに低コストなバージョンで、同様の性能を発揮しますが、出力電圧と有効なスレッシュホールドの精度が低くなります。

また、TPS54040A は TPS54140A、TPS54240、TPS54340、TPS54540 とピン互換性があることにも注意してください。その結果、部品の選択肢が拡大し、(将来のシステム アップグレードに備えて) コストと電力レベルを変調する機能も実現できます。

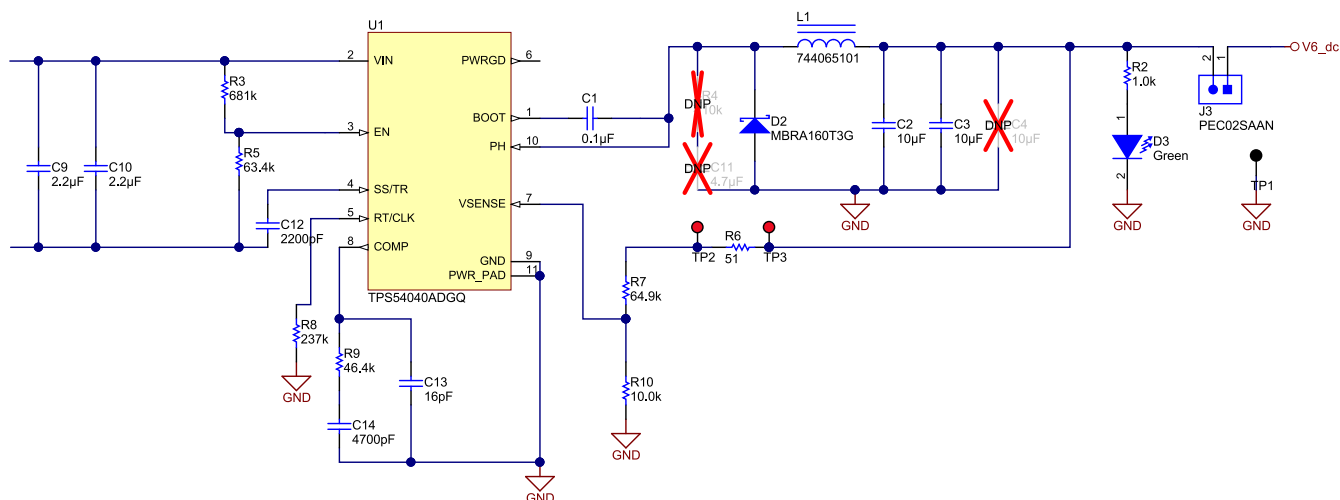


図 4-10. TPS54040A を使用した 24V から 6V への DC/DC 降圧コンバータの回路図

設計プロセスの詳細については、TPS54040A データシートまたは TI Design TIDA-00180 を参照してください。

代表的なアプリケーションでは、単純な抵抗デバイダ回路により出力電圧が設定されます。出力電圧、リファレンス電圧 (TPS54040A では 0.8V)、および下側抵抗 (R10 は通常 10kΩ に固定) に応じた上側抵抗の値を 式 12 に示します。

$$R7 = R10 \times \frac{V_{OUT} - 0.8 \text{ V}}{0.8 \text{ V}} \quad (12)$$

$V_{OUT} = 6\text{V}$ 、 $R10 = 10\text{k}\Omega$ の場合、 $R7$ により 65kΩ が得られます。

6V 出力電圧の許容誤差は $6\text{V} \pm 4\%$ になります。これは、公差 1% の帰還抵抗、TPS54040A の内部バンドギャップ公差 $\pm 2\%$ を想定しています。

スイッチング周波数は、 $R8 = 237\text{k}\Omega \sim 500\text{kHz}$ に設定されています。

TPS54040A の回路図では、一部の部品には未実装 (DNP) とマークされています。これは、 $R4$ と $C11$ によって形成されたスナバ回路の場合です。TPS54040A 設計では、スナバ回路は不要です。スナバ回路は、必要に応じてスイッチ ノードのリンギングと MOSFET のオーバーシュートを低減するソリューションです。他のオプションの詳細については、スナバ回路の使用法と計算方法についてのアプリケーション ノート『NexFET™ 高性能 MOSFET のリンギング低減技法』(SLPA010) を参照してください。

4.2.2 エンコーダ電源

標準的な 5V ($\pm 5\%$) エンコーダ電源仕様を満たし、エンコーダの接続に使用する長いケーブルによる電圧降下を補償する 0.25V のマージンを追加するために、エンコーダ用の 5.25V 電源を選択しました。

5.25V をエンコーダに供給する LDO では、イネーブル ピンも提供する必要があります。このようにして、必要に応じて、ホスト プロセッサからエンコーダ電源をオフにしたり、エンコーダが接続されていない場合にエンコーダ コネクタの電圧をオフにしたりすることができます。

LDO は、安定性を目的とした出力コンデンサと ESR の許容範囲を除き、特別な記述は必要ありません。一方、主な設計には SMPS が関係しますが、これはすべての主な性能 (ノイズ、EMI、効率、コスト、基板面積) に影響するからです。

TPS79901 は、公称 5V (5.25V) よりも少し高い電圧を供給するように設計されており、LDO の高精度の一部を使用して、その熱ストレスを低減します。短時間では、 $5.25\text{V} \pm 2\%$ は、エンコーダの許容電源電圧範囲内です ($5\text{V} \pm 5\%$)。このようにして、消費する電力は以下ようになります。

$$P_{LDO,MAX} = (V_{LDO,IN} - V_{LDO,OUT}) \times i_{LDO,MAX} = (6 \text{ V} - 5.25 \text{ V}) \times 250 \text{ mA} = 187 \text{ mW} \quad (13)$$

5V エンコーダの電圧を使用すると、最大消費電力は 250mW に増加します。

実際、 $R_{thja} \approx 180^\circ\text{C/W}$ の場合、最大負荷電流 250mA で動作しても、TPS79901 の接合部温度は周囲温度に対して 34°C 未満しか上昇しないことになります。たとえば、周囲温度 85°C の場合、接合部は 120°C になります。

TPS79901 LDO の出力電圧は、式 13 に従って、1% 帰還抵抗 $R11$ および $R13$ で設定されます。ここで、1.193V は、TPS79901 のリファレンス電圧の公称値です。

$$V_{ENC_VCC} = 1.193 \text{ V} \times \left(1 + \frac{R11}{R13}\right) = 1.193 \times \left(1 + \frac{340\text{k}}{100\text{k}}\right) = 5.25 \text{ V} \quad (14)$$

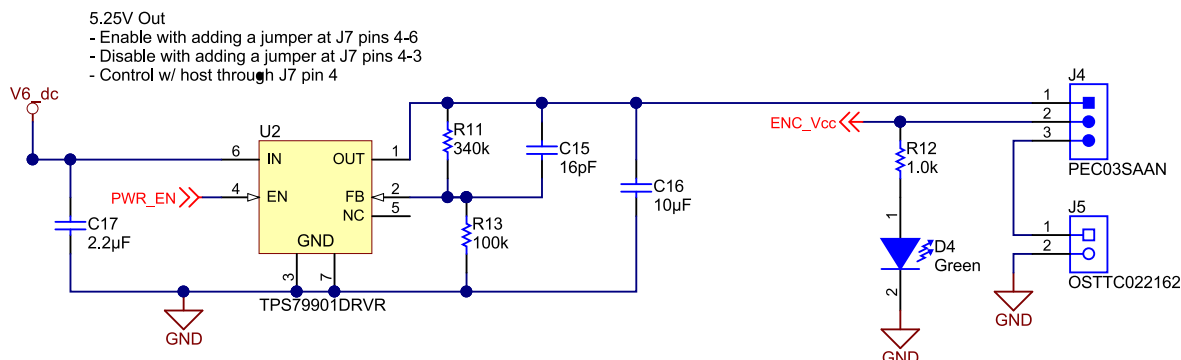


図 4-11. エンコーダ電源用 5.25V LDO の回路図

ジャンパで、5.25V の LDO 出力と、必要に応じてオプションの外部電源のどちらかを選択します。信号 PWR_EN はデフォルトでプルアップされていますが、ホスト マイコンから Low にアサートすることで、エンコーダの電源電圧を無効化するか、電源をパワー サイクルすることができます (セクション 4.3 を参照)。

4.2.3 シグナル チェーン用電源 5V および 3.3V

セクション 4.1 で説明したように、アナログ シグナル チェーンで要求される電流は低いいため、また非常に低いノイズで高性能を実現するには、LDO が再び必須の選択となります。実際、TI の LDO は PSRR が高いため、スイッチャで生成される AC ノイズがブロックされ、ADC や入力バッファやアンプなどノイズに敏感なアナログ部品には影響を与えません。

5V レールは、アナログ バッファ、アンプ、および ADS8354 ADC のアナログ電源電圧専用です。この 3.3V は ADS8354 とコンパレータのデジタル電源専用であり、I/O レベル シフトを必要とせずに、ホスト プロセッサへの 3.3V インターフェイスを確保します。選択した部品の消費電力は低いいため、3.3V および 5V レール用に LDO がそれぞれ選択され、公称出力電流は 100mA です。

3.3V レールには固定 3.3V LDO TPS79933 を使用し、TPS71701 を 5V レールに使用しました。図 4-12 に回路図を示します。式 15 に従って、5V の出力電圧は、TPS71701 $V_{REF} = 0.8V$ における帰還抵抗 R15 および R16 によって設定されます。

$$V_{5V} = V_{REF} \times \left(1 + \frac{R15}{R16}\right) = 0.8V \times \left(1 + \frac{845k}{160k}\right) = 5.02V \quad (15)$$

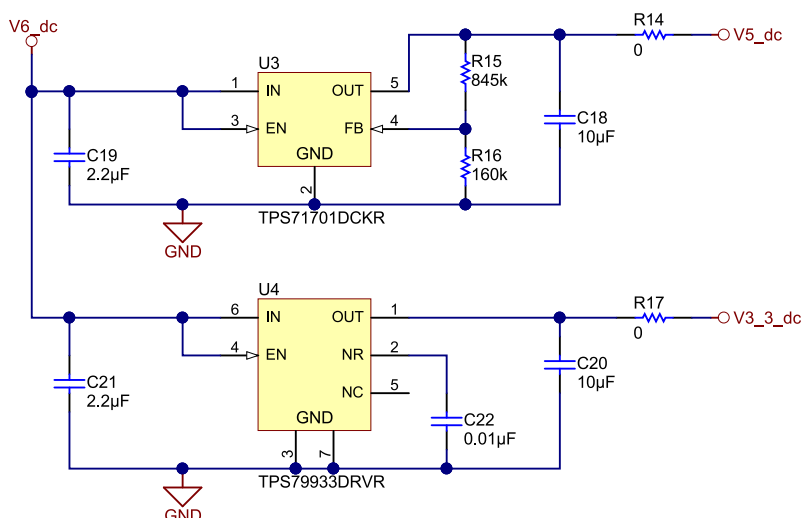


図 4-12. シグナル チェーン用 5V および 3.3V PoL の回路図

4.3 ホストプロセッサインターフェイス

4.3.1 信号の説明

10 ピン ヘッダー インターフェイスをホスト プロセッサへの接続に使用できます。ヘッダーは、ADS8354 デュアル 16 ビット ADC と内蔵デュアル S/H ADC (利用可能な場合) を使用して、両方の信号路の高分解能補間角度を計算するために必要な信号を提供します。

このインターフェイスは 3.3V I/O システムに準拠しています。ソリッド GND 接続を行うには、奇数のピンをすべて GND に割り当てます。利用可能な信号を [表 4-1](#) に示します。

表 4-1. ホスト MCU への TIDA-00176 インターフェイス コネクタ

機能	信号	I/O (3.3V)	備考
ADS8354 と SPI (スレーブ) を使用した A、B の 16 ビット高分解能出力チャネル	SDI (I)	デジタル入力	シリアル通信用データ入力。デュアル サンプリング モードの構成に使用
	/CS (I)	デジタル入力	チップ セレクト信号 (アクティブ Low)。/CS の立ち下がりエッジで、アナログ入力 (ホールド) がラッチされ、新しい変換が開始されます。Piccolo マイコンなど、ホスト プロセッサで QEP カウンタを同期的にラッチするには、/CS の立ち下がりエッジを使用します
	SCLK (I)	デジタル入力、最大 24MHz	シリアル通信用クロック
	SDO_A (O)	デジタル出力	シリアル通信のデータ出力、チャネル A、チャネル B。各チャネル A とチャネル B の 16 ビット 2 の相補データ。入力から出力への信号ゲイン = 5。
	SDO_B (O)	デジタル出力	シリアル通信チャネル B のデータ出力
デジタル直交エンコード信号 A、B、および索引マーカー R	ATTL (O)	デジタル出力	A、B、R のヒステリシス 160mV、構成可能
	BTTL (O)	デジタル出力	
	RTTL (O)	デジタル出力	
A および B のアナログ シングルエンド出力チャネル	A/sin (O)	アナログ出力: 0 ~ 3.3V、1.65V バイアス (シングルエンド)	公称出力範囲: 1V _{PP} に対して 0.82V ~ 2.48V (1.65V ± 0.83V)、ゲイン = 1.66、バイアス電圧 = 1.65V
	B/cos (O)	アナログ出力: 0 ~ 3.3V、1.65V バイアス (シングルエンド)	公称出力範囲: 1V _{PP} に対して 0.82V ~ 2.48V (1.65V ± 0.83V)、ゲイン = 1.66、バイアス電圧 = 1.65V

コネクタ ピン構成の詳細については、[セクション 6](#) を参照してください。

注意

ADS8354 16 ビット デュアル サンプリング ADC のアナログ入力サンプルを QEP 増分カウンタ モジュールと同期するには、ADS8354 への /CS 信号を使用して QEP カウンタもラッチします。Piccolo などのマイコンの場合、/CS を eQEP ストローブ入力ピン EPEPxS に接続する必要があります。ここで、x はモジュール番号です。Piccolo eQEPx モジュールは、EQEPxS ピンの立ち下がりエッジで QEP カウンタをラッチするように構成することができます。

4.3.2 16 ビットのデュアル ADC ADS8354 とシリアル出力を使用した高分解能パス

このセクションでは、シリアル インターフェイスを介した ADS8354 の構成の概要を示します。これは、内部 ADS8354 リファレンスによるフルスケール入力電圧範囲のプログラミングとシリアル データ転送に分けられます。

4.3.2.1 ADS8354 入力フルスケール レンジ出力データ形式

この設計で使用するために、ADS8354 は $\pm 2 \times V_{REF}$ の入力電圧範囲になるように構成します。内部リファレンス電圧 V_{REF} を 2.5V に設定して、 $\pm 5V$ FSR を生成する必要があります。

表 4-2. TIDA-00176 の ADS8354 伝達特性

入力電圧: AINP_x - AINM_x	モード	入力電圧	出力コード (HEX)
< -5V	$\pm 2 \times V_{REF}$ 範囲	NFSC	8000
-5V + 1LSB		NFSR	8001
-1 LSB		-1 LSB	FFFF
0		0	0000
> 5V - 1LSB		PFSR - 1LSB	7FFF

各チャンネル A および B の出力日付フォーマットは、16 ビット符号付き整数出力 (2 の補数) です。

4.3.2.2 ADS8354 シリアル インターフェイス

ADS8354 は、シリアル クロック (SCLK) を使用して、デバイス内外のデータ転送を同期します。CS 信号は、1 つの変換フレームとシリアル転送フレームを定義します。フレームは、CS の立ち下がりエッジで開始し、CS の立ち上がりエッジで終了します。読み取りまたは書き込み動作を検証するには、フレームの開始と終了の間に、最小 N 個の SCLK の立ち下がりエッジが必要です。表 4-3 に示すように、N は変換結果の読み取りに使用されるインターフェイス モードに依存します。N 個の SCLK 立ち下がりエッジが供給されている場合、フレーム内の書き込み動作が検証され、次の CS 立ち上がりエッジで、内部のユーザー プログラマブル レジスタが更新されます。この CS の立ち上がりエッジでフレームも終了します。CS が High になってから N 個の SCLK の立ち下がりエッジを供給する場合、フレームの書き込み動作は有効ではありません。

表 4-3. ADS8354 SCLK の立ち下がりエッジによる有効な書き込み動作

インターフェイス モード	書き込み動作を検証するために必要な最小 SCLK 立ち下がりエッジ数 N
32-CLK、デュアル SDO モード (デフォルト)	32
32-CLK、シングル SDO モード	48
16-CLK、デュアル SDO モード	16
16-CLK、シングル SDO モード	32

F28069M Piccolo MCU のサンプル ファームウェアは、ADS8354 を 32-CLK のシングル SDO モードで初期化します。

シリアル インターフェイス モードと読み書き動作の詳細については、ADxx54 のデータシートを参照してください。

4.3.2.3 ADS8354 変換データの読み取り

表 4-3 に概説しているように、このデバイスでは 4 種類のインターフェイス モードが用意されています。これらは、変換結果の読み取りにも適用できます。これらのモードにより、フレキシブルなハードウェア接続とファームウェア プログラミングが可能になります。32-CLK インターフェイス モードでは、デバイスは内部クロックを使用して、サンプリングされたアナログ信号を変換します。変換は SCLK の最初の 16 周期中に完了し、以後の SCLK の立ち上がりエッジで変換結果を読み取り可能です。ファミリのすべてのデバイス (ADS8354、ADS7854、ADS7254) が、32-CLK インターフェイス モードをサポートしています。32-CLK のインターフェイス モードに加えて、ADS7854 と ADS7254 は 16-CLK インターフェイス モードもサポートしています。16-CLK

インターフェイス モードを使用することで、同じスループットを、はるかに低い SCLK 速度で実現できます。

F28069M Piccolo MCU のサンプル ファームウェアは、ADS8354 を 32-CLK のシングル SDO モードで初期化します。

32-CLK、シングル SDO モードでは、1 つの SDO ピン (SDO_A) のみを使って、両方の ADC (ADC_A および ADC_B) から変換結果を読み取ることもできます。SDO_B は 3-state にとどまり、未接続 (NC) ピンとして扱うことができます。このモードの詳細なタイミング図を、図 4-13 に示します。

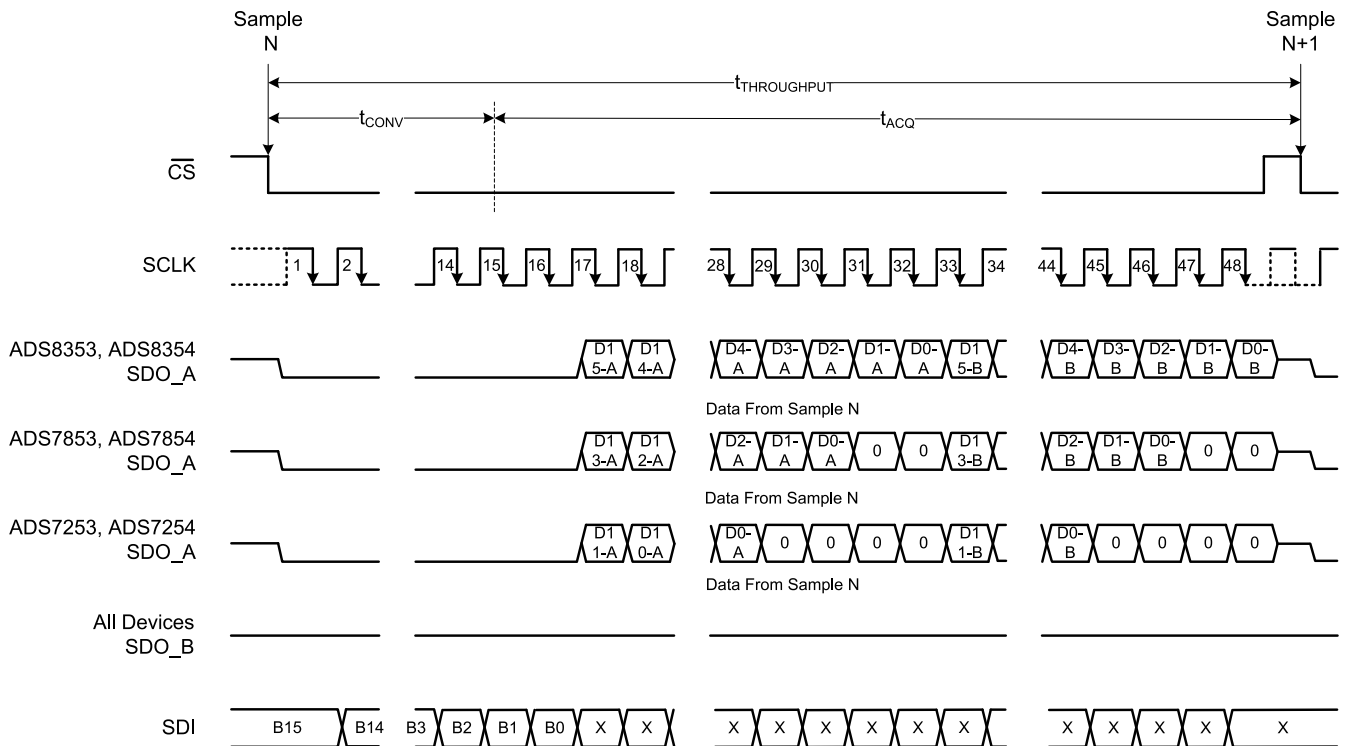


図 4-13. 32-CLK、シングル SDO モードのタイミング図

CS の立ち下がりエッジによって、シリアル データ バスが 3-state から復帰し、SDO_A ピンに 0 を出力します。デバイスは、変換時間 (t_{CONV}) 中にサンプリングされたアナログ入力を変換します。SDO_A は、この期間中に 0 を読み取ります。変換プロセスが完了すると、サンプル / ホールド回路はサンプル モードに戻ります。デバイスは、16th SCLK の立ち下がりエッジで SDO_A ピンに ADC_A の MSB を出力します。以後の SCLK 立ち下がりエッジは、ADC_A の変換結果をシフトアウトし、その後 SDO_A ピンで ADC_B の変換結果をシフトアウトするために使用されます。このモードでは、読み取りまたは書き込みフレームを有効にするために、少なくとも 48 個の SCLK 立ち下がりエッジを割り当てる必要があります。CS の立ち上がりエッジによってフレームは終了し、シリアル バスが 3-state になります。

詳細については、ADSxx54 のデータシートを参照してください。

4.3.2.4 ADS8354 のレジスタ構成

前のセクションで述べたようにモードを選択するには、ADS8354 レジスタ REFDAC_A、REFDAC_B、および CFR を次のようにプログラムします。

REFDAC_X および CFR は 16 ビットのレジスタであり、表 4-4 に示すようにプログラムされます。上位 4 ビットで書き込み / 読み取りモードと、それに対応するレジスタが選択されます。

表 4-4. ADS8354 のレジスタ構成

レジスタ	データ (HEX)	備考
REFDAC_A	9FF8	REFDAC_A への書き込みモード、VREF_A = 2.5V を選択
REFDAC_B	AFF8	REFDAC_B への書き込みモード、VREF_B = 2.5V を選択
CFR	8640	CFR への書き込みモード、SDO_A で A と B の 32-CLK デュアル SDO モードを選択、FSR = $\pm 2 \times V_{REF}$ 、内部 V_{REF} を選択

詳細については、ADSxx54 のデータシートを参照してください。

4.4 エンコーダ コネクタ

Sin/Cos エンコーダへのインターフェイスとして、2 つのコネクタ オプションが利用可能です。デフォルトのコネクタは、シールド付き SubD-15 メス型コネクタです。もう 1 つのオプションは 8 ピンヘッダーです。コネクタ割り当ての詳細については、セクション 6 を参照してください。

4.5 設計のアップグレード

高分解能パス: 高分解能チャネルのノイズ耐性をさらに高めるため、差動アンプ THS4531A では 1 次ローパス フィルタを推奨します。最大 500kHz の高分解能チャネルを使用する場合は、5k Ω マッチング済み抵抗と並列に 33pF、1% NPO/COG コンデンサを THS4531A 帰還パスにそれぞれ推奨します。カットオフ周波数が低い場合、それぞれ容量の値を高くする必要があります。

信号 PWR_EN による出力イネーブルを備えた 5.25V LDO: コネクタ J-7、ピン 4 を使用可能ですが、LDO への入力に常にプルアップ (ジャンパ: J7 4-6) またはプルダウン (ジャンパ: J7 4-3) のいずれかで終端されるように、U2、ピン 4 から 3.3V (V3_3_dc) への 10k の追加プルアップを推奨します。

5 ソフトウェア設計

5.1 概要

直交エンコードされたパルス カウンタと SPI が組み込まれた任意の組込みプロセッサまたはマイコンは、TIDA-00176 ハードウェア設計と組み合わせて使用できます。

ただし、TIDA-00176 ハードウェア リファレンス デザインを容易に評価できるように、C2000 F28069M Piccolo LaunchPad 用のサンプル ファームウェアが提供されています。その結果、Sin/Cos インクリメンタル ポジション エンコーダを使用して TIDA-00176 を評価することができます。USB 仮想 COM ポートを介したユーザー メニューが提供され、選択した Sin/Cos エンコーダのライン カウントを初期化し、計算された高分解能角度情報を他のユーザーが選択可能なデータとともに印刷します。

F28069M で利用されている主なペリフェラルは、SPI-A ペリフェラルで、デュアル高分解能 16 ビット データ信号 ($A_{16\text{-bit}}$ および $B_{16\text{-bit}}$) を読み取ることができます。組込みのデュアル S/H ADC を使用して、シングルエンド アナログ信号 $A_{12\text{-bit}}$ および $B_{12\text{-bit}}$ を変換できます。直交エンコーダ パルス (eQEP2) モジュールは、信号 A_{TTL} および B_{TTL} およびゼロ インデックス マーカー R_{TTL} に基づく、絶対位置の初期化用の方向アップダウン インクリメンタル カウントに使用されます。ePWM1 タイマは、周期的な割り込みを生成し、新しい角度測定をトリガするために使われます。16kHz の周期が選択されました。SCI-A ペリフェラルを使用して、仮想 COM ポート経由で 115000 ボーの UART ベースのユーザー インターフェイスを実装しました。

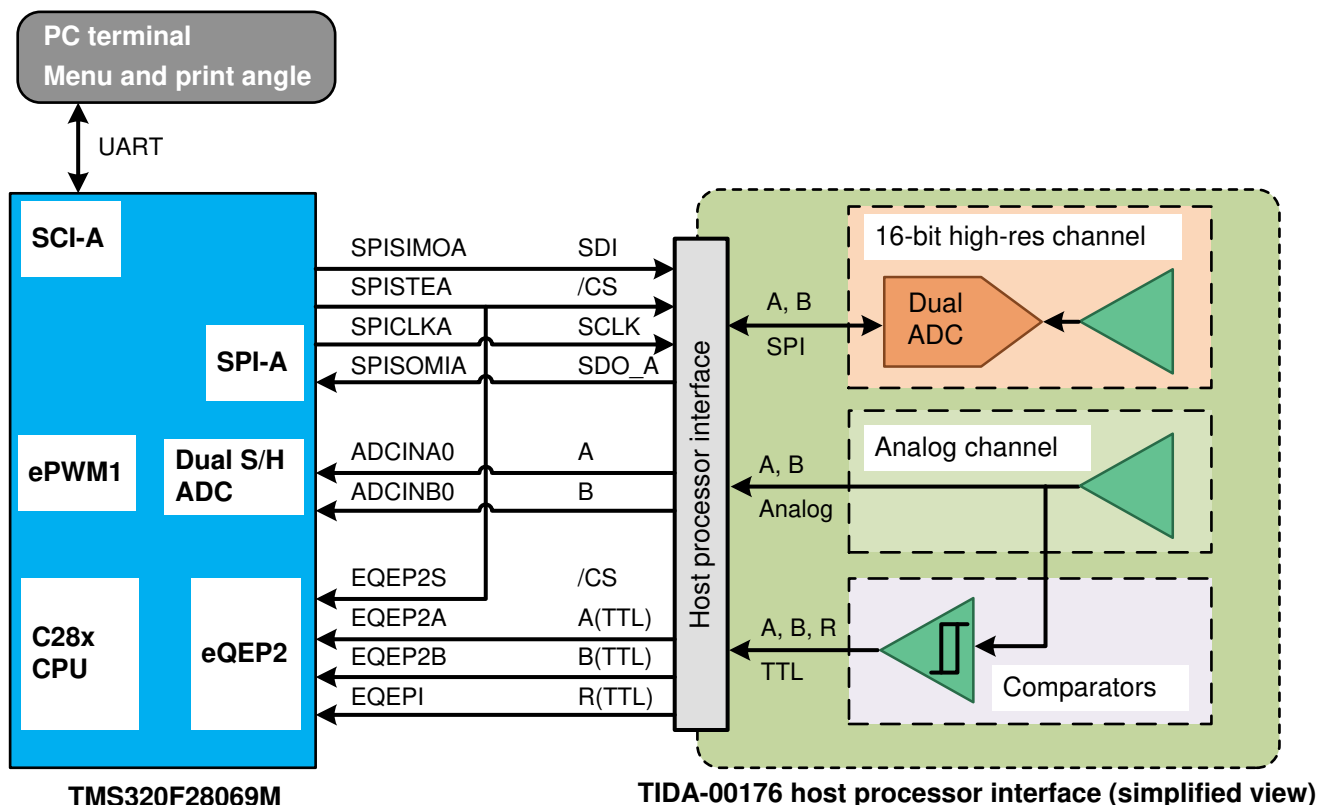


図 5-1. TMS320F28069M のペリフェラル モジュールと、TIDA-00176 ホスト プロセッサ インターフェイスへのピン構成

5.2 C2000 Piccolo ファームウェア

Piccolo TMS320F28069M 用のサンプル ファームウェアの開発とコンパイルが行われており、[図 5-1](#) で概要を示したペリフェラル モジュールを活用します。

ファームウェアは C2000 controlSUITE™ を活用します。ファームウェアは基本的に、3 つの機能ブロックで構成されています。F28069M フレームワークは、[図 5-2](#) に概説しているように、必要なデータを同期的にサンプリングし、補間角度を計算するアルゴリズムであり、UART 端末ベースのユーザー インターフェイスです。

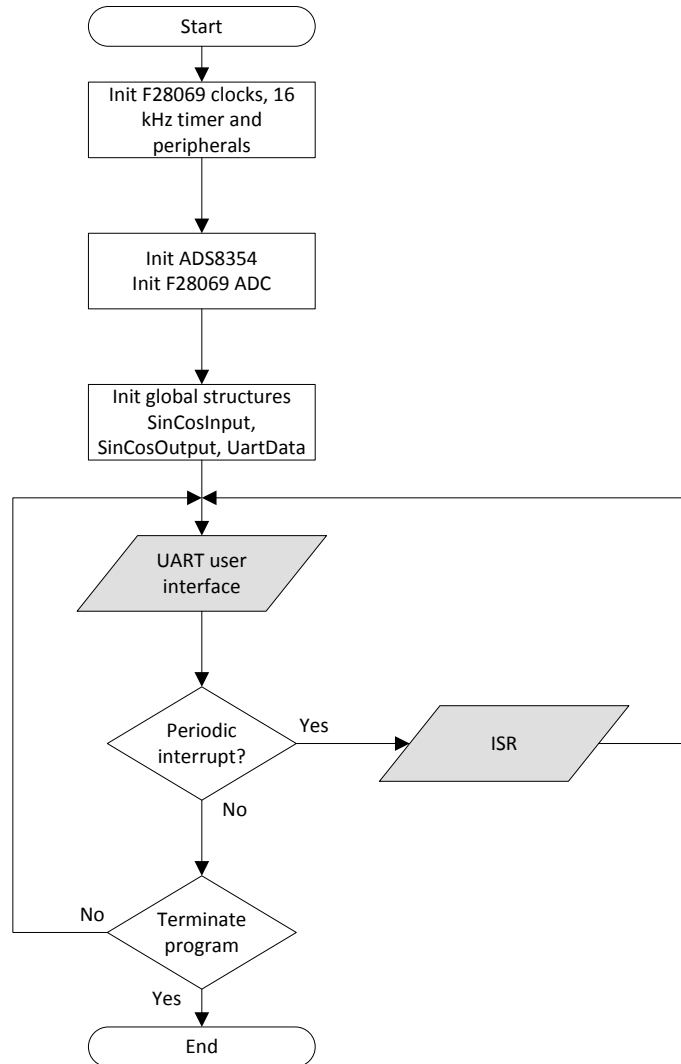


図 5-2. Sin/Cos エンコーダ フレームワークのフローチャート

TMS320F28069M フレームワークは、TMS320F26069M CPU クロックを 80MHz に初期化し、GPIO マルチプレクサ、SPI-A、SCI-A (UART) などのペリフェラル、ePWM1 ベースの周期タイマと割り込み、組込みの 12 ビット デュアル S/H ADC を初期化します。また、[セクション 4.3.2.4](#) に概要を示すように、SPI-A を通して外部 16 ビット デュアル ADC ADS8354 を構成します。SPI-A は、10MHz のシリアル クロックにより SPI マスタとして構成されます。これは Piccolo F28069M の最大 SPI クロックです。Sitara AM437x や Delfino F287x など他のプロセッサの場合、SPI クロックを最大 24MHz にすることができます。

初期化後、プログラムは UART ベースのユーザー インターフェイスを起動し、周期割り込みサービス ルーチン (ISR) を提供します。周期 ISR は、外部 16 ビット ADC ADS8354 と内部 12 ビット ADC の両方を基準とした同期データ キャプチャ、中間位相の計算、合計補間角度を実装しています。[セクション 1](#) に概要を示すアルゴリズムに従います。このコード

は、TI の IQmath ライブラリを使用して、32 ビットの整数形式である Q28 固定小数点数を用いて記述されています。32 ビットの固定小数点数を

32 ビットの IEEE 浮動小数点と比較した場合の利点は、データ範囲にかかわらず、分解能が一定に保たれることです。データ範囲は角度 (ユニットごと) と ADC 入力データに対して 0 ~ 1.0 に制限されており、また入力最大 ± 5 (V) にスケールされているため、整数範囲が ± 8.0 の Q28 の数値により十分なヘッドルームが得られ、すべてのデータについて精度は一定に保たれます。

図 5-3 に、ISR のフローチャートを示します。

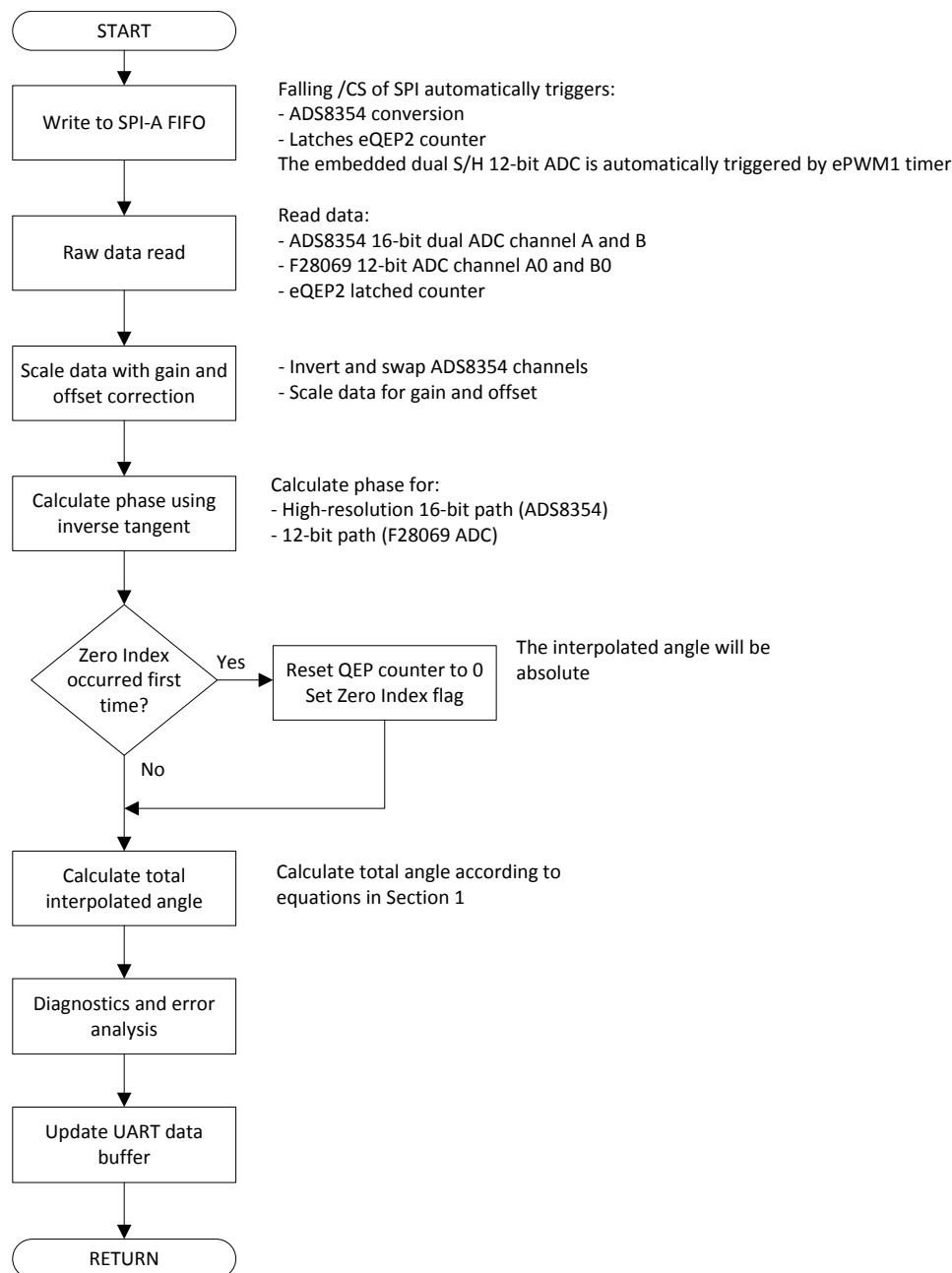


図 5-3. 補間角度計算を含む Sin/Cos エンコーダ メイン ISR のフローチャート

5.3 ユーザー インターフェイス

迅速な評価を可能にするために、仮想 COM ポート ベースのユーザー インターフェイスが実装されています。Tera Term のような 115000 ボーの任意の端末インタフェースを使用できます。

ユーザー インターフェイスを使用すると、プログラムがメイン メニューに到達する前に、Sin/Cos エンコーダ接続のライン カウントを入力できます。このメニューには、高解像度のアングルだけで基本表示モードを選択するか、またはエキスパート表示モードを選択するためのメニュー項目オプションがあります。どちらも 10Hz の更新レートで表示されます。さらにメニュー項目は 200Hz の更新レートでのデータ ダンプ モードであり、後分析のためにファイルに書き込むことを意図しています。

ユーザー インターフェイスのフローチャートを 図 5-4 に示します。

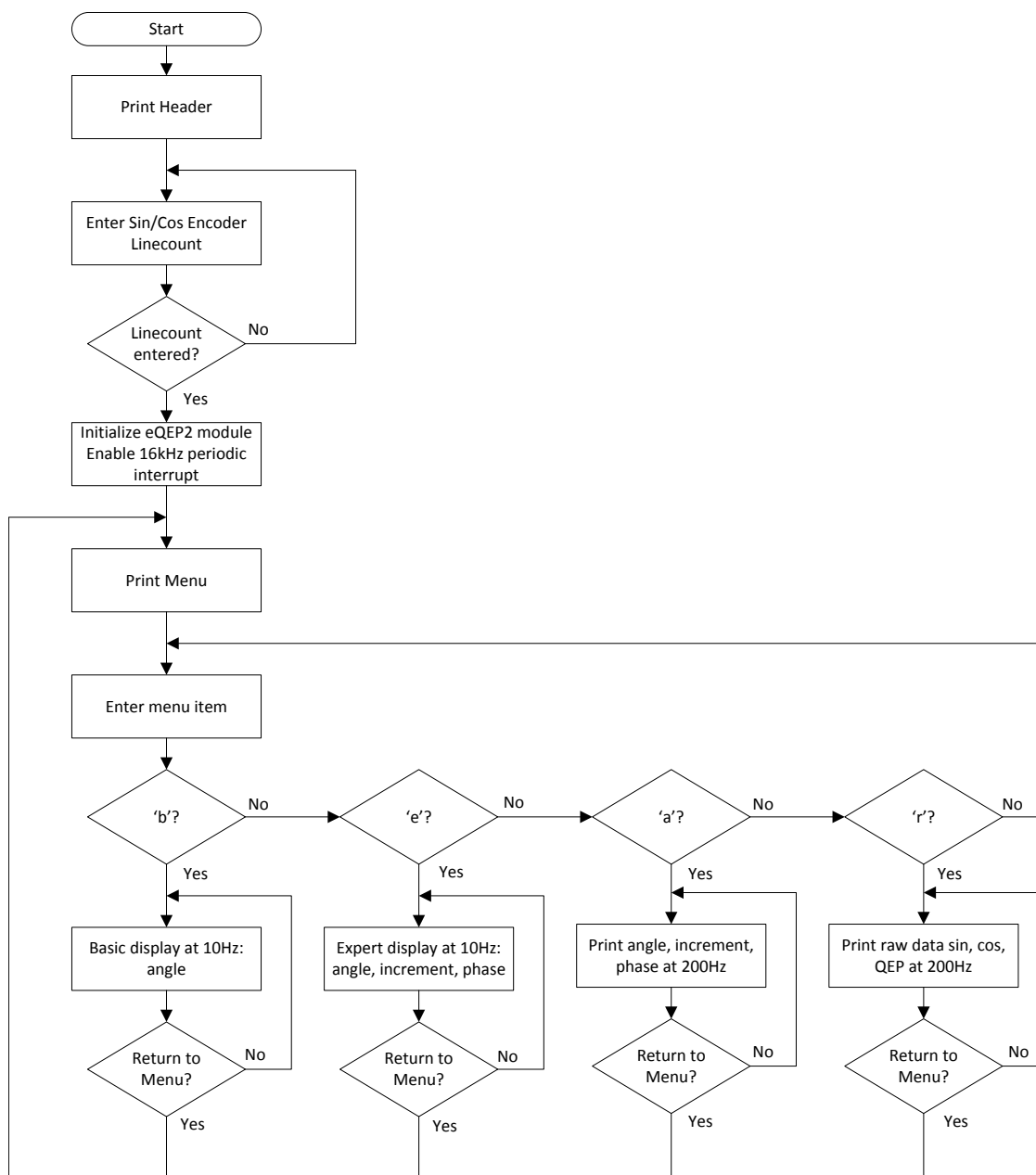


図 5-4. UART 端末ユーザー インターフェイスのフローチャート

表 5-1 から表 5-4 に、4 つのメニュー項目それぞれのデータ出力形式の概要を示します。データ ダンプ モードでは、各行のデータ間の区切り文字として「タブ」が含まれます。

表 5-1. 基本表示モードの出力形式とデータ スケーリング

メニュー	COLUMN 1	COLUMN 2	COLUMN 3	COLUMN 4	COLUMN 5
「b」基本表示	ADS8354 を使用した 総角度 (スケール)	—	—	—	—
データ形式	フロート (0 ~ 360 度)	—	—	—	—

表 5-2. エキスパート表示モードの出力形式とデータ スケーリング

メニュー	COLUMN 1	COLUMN 2	COLUMN 3	COLUMN 4	COLUMN 5
「e」エキスパート表示	ADS8354 を使用した 総角度 (スケール)	マーカー インデックス R が発生しました	増分カウント	位相 ADS8354 (スケール)	位相 F28069M ADC (スケール)
データ形式	フロート (0 ~ 360 度)	フラグ (はい / いいえ)	整数	浮動小数点数 (0 ~ 1.0)	浮動小数点数 (0 ~ 1.0)

表 5-3. 角度データ ダンプ メニューの形式とスケーリング

メニュー	COLUMN 1	COLUMN 2	COLUMN 3	COLUMN 4	COLUMN 5	COLUMN 6
「d」角度ダンプ	ADS8354 を使用した 総角度 (スケール)	F28069 ADC を使用した 総角度 (スケール)	増分カウント	位相 ADS8354 (スケール)	位相 F28069M ADC (スケール)	周期的なティック (スケール)
データ形式	フロート (0 ~ 360 度)	フロート (0 ~ 360 度)	整数	浮動小数点数 (0 ~ 1.0)	浮動小数点数 (0 ~ 1.0)	整数 (66μs)

表 5-4. 未加工データ ダンプ メニューのフォーマットとスケーリング

メニュー	COLUMN 1	COLUMN 2	COLUMN 3	COLUMN 4	COLUMN 5	COLUMN 6	COLUMN 7
「R」未加工データ	増分カウント (SW)	増分カウント (ラッチ オン / CS)	入力 A+/A-、 ADS8354 (スケール)	入力 B+/B-、 ADS8354 (スケール)	入力 A+/A-、 F28069 (スケール)	入力 A+/A-、 F28069 (スケール)	周期的なティック (スケール)
	整数	整数	浮動電圧 (V _{PP})	浮動電圧 (V _{PP})	浮動電圧 (V _{PP})	浮動電圧 (V _{PP})	整数 (66μs)

6 はじめに

6.1 TIDA-00176 の PCB の概要

図 6-1 に、TIDA-00176 PCB の上面の写真を示します。ヘッダおよびデフォルトのジャンパ設定については、[セクション 6.2](#) で説明します。

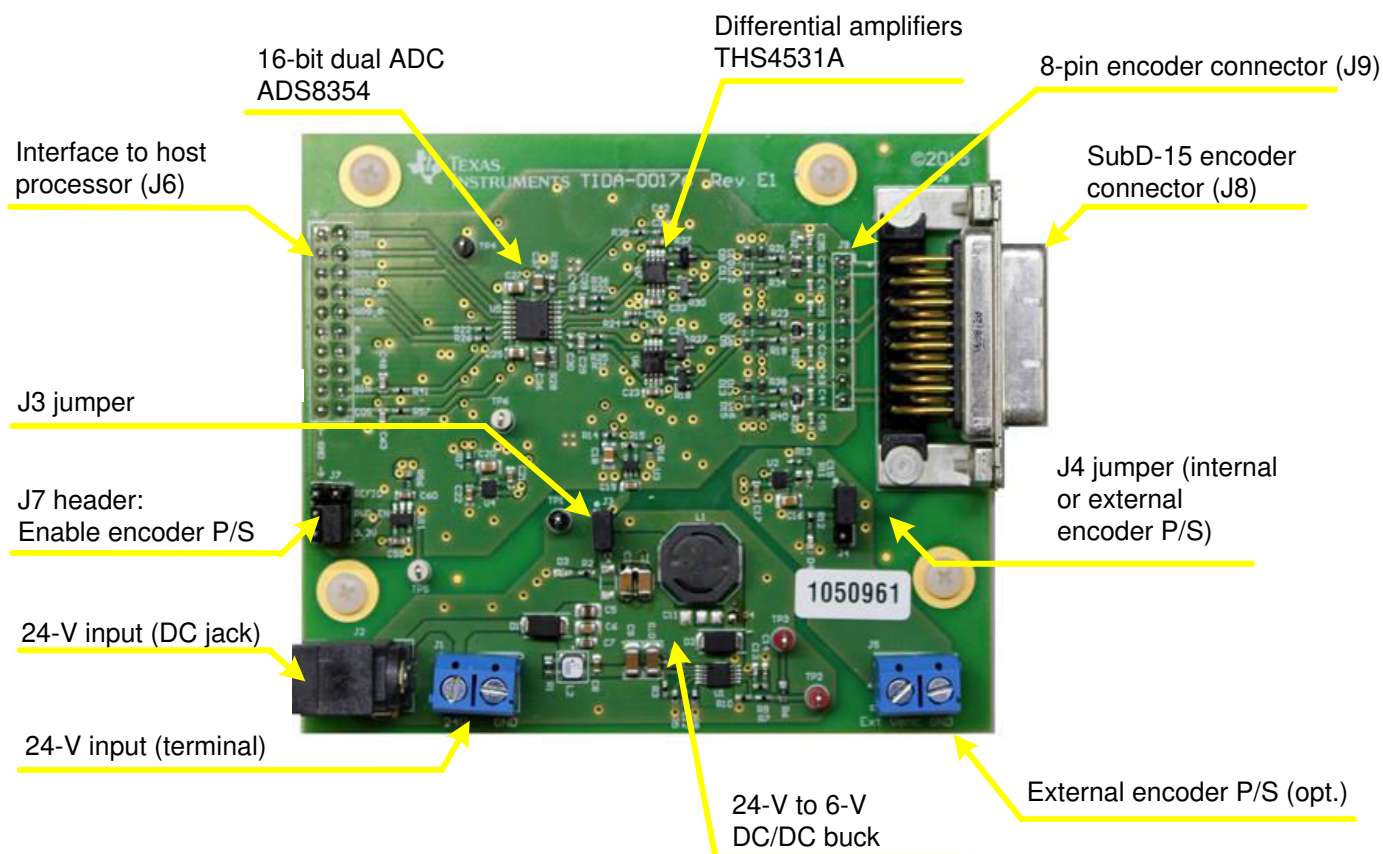


図 6-1. TIDA-00176 基板の画像

6.2 コネクタおよびジャンパ設定

6.2.1 コネクタとジャンパの概要

表 6-1 から 表 6-4 に、コネクタの割り当てとジャンパ設定の概要を示します。

24V の公称入力電圧は、コネクタ J1 または J2 を介して供給できます。

表 6-1. コネクタの割り当てとジャンパ設定 (J1 ~ J4)

コネクタとピンの割り当て		説明
24V 入力 (端子:J1)		
1		24V 入力電圧 (17 ~ 36V)
2		GND
24V 入力 (DC ジャック:J2)		
内部		24V 入力電圧 (17 ~ 36V)
外部		GND
J3		
1		TPS54040A の出力 (デフォルト 6V)
2		6V 電源レール
J4		
1		5.25V 電源 (デフォルト)
2		V_ENC (エンコーダの電源電圧)
3		外部電源

必要に応じて、コネクタ J5 を通して、5.25V エンコーダの電源電圧以外の外部電源電圧を印加できます。

表 6-2. 外部エンコーダ電源コネクタ (J5)

ピン	説明
1	エンコーダ電源 VCC
2	エンコーダ電源 GND

表 6-3. ホスト プロセッサ インターフェイス (J6)

ピン	説明	ピン	説明 (3.3V I/O)
1	GND	2	SDI (ADS8354)
3	GND	4	/CS (ADS8354)
5	GND	6	SCLK (ADS8354)
7	GND	8	SDO_A (ADS8354)
9	GND	10	SDO_B (ADS8354)
11	GND	12	A (TTL)
13	GND	14	B (TTL)
15	GND	16	R (TTL)
17	GND	18	A (シングル エンド アナログ 0 ~ 3.3V)
19	GND	20	B (シングル エンド アナログ 0 ~ 3.3V)

ホスト プロセッサ インターフェイスの信号の詳細については、[セクション 4.3](#) を参照してください。

表 6-4. コネクタの割り当てとジャンパ設定 (J7 ~ J9)

ピン	説明	ピン	説明
エンコーダ電源イネーブル (J7) 付きヘッダ J7			
1	GND	2	REFIO (1.65V)
3	GND	4	エンコーダのイネーブル電源電圧 (5.25V)
5	GND	6	3.3V
エンコーダ DSUB15 コネクタ (J8)			
1	A+	2	エンコーダ電源 GND
3	B+	4	エンコーダ電源 VCC (デフォルト 5.25V)
5	NC	6	NC
7	R-	8	NC
9	A-	10	予約済み
11	B-	12	予約済み
13	NC	14	R+
15	NC	—	—
エンコーダ 8SIL100 コネクタ (J9)			
1	A+	2	A-
3	エンコーダ電源 GND	4	B-
5	B+	6	エンコーダ電源 VCC (デフォルト 5.25V)
7	R-	8	R+

6.2.2 デフォルトのジャンパ構成

TIDA-00176 基板を使用する前に、以下のデフォルトのジャンパ設定が適用されていることを確認してください。基板画像 [図 6-1](#) を参照してください。

表 6-5. デフォルトのジャンパ設定

ヘッダ	ジャンパ設定
J3	J3 のピン 1 ~ 2 の間にジャンパを挿入して、3 個の LDO に接続された 6V 中間レールを有効にします
J4	J4 ピン 1 ~ 2 の間にジャンパを挿入して、オンボードの 5.25V エンコーダ電源をエンコーダ コネクタにルーティングします
J7	J7 ピン 4 ~ 6 の間にジャンパを挿入して、5.25V エンコーダ電源を有効にします。

6.3 設計評価

6.3.1 前提条件

TIDA-00176 の

TI 設計を評価するためには、以下のハードウェア機器とソフトウェアが必要です。

表 6-6. 前提条件

装置	備考
24V 電源	250mA 以上の出力電流を供給する 24V 出力電源ブリック 出力コネクタ内径 2.1mm× 外径 5.5mm× 9.5mm メス
TIDA-00176 ハードウェア	セクション 6.2 に基づくデフォルトのジャンパ設定に使用。
ボード設定用の 3 個のジャンパ	2 ピン、100mil
TIDA-00176 ファームウェア	TIDA-00176 設計フォルダからダウンロード
InstaSPIN-MOTION F28069M LaunchPad	TI eStore で入手可能
USB ケーブル	ミニ USB Type-A から USB Type-A へのケーブル
TIDA-00176 から LaunchPad へのアダプタ	TI 社内用 (オプション)
Code Composer Studio 6	www.ti.com からダウンロード
PC ターミナル プログラム	Tera Term などの任意のターミナル プログラム
1V _{pp} 出力信号を使用した Sin/Cos エンコーダ	たとえば、ROD480 など

6.3.2 ハードウェア設定

TIDA-00176 と InstaSPIN-MOTION LaunchPad との間には、以下の接続が必要です。

表 6-7. TIDA-00176 ホストプロセッサ インターフェイス (J6) から InstaSPIN -LaunchPad への接続

TIDA-00176 ホストプロセッサ インターフェイス (J6)		接続先 →	InstaSPIN-MOTION LAUNCHPAD	
J6-PIN	説明		ヘッダー ピン	説明 (3.3-V I/O)
1	GND		J3 - ピン 22	GND
19	GND		J2 - ピン 20	GND
2	SDI (ADS8354)		J2 - ピン 15	GPIO16/SPISIMOA
4	/CS (ADS8354)		J2 - ピン 19 J6 - ピン 59	GPIO27/eQEP2S および GPIO19/SPISTEA
6	SCLK (ADS8354)		J1 - ピン 7	GPIO18/SPICLKA
8	SDO_A (ADS8354)		J2 - ピン 14	GPIO17/SPISOMIA
10	SDO_B (ADS8354)	NC	NC	NC
12	A (TTL)		J6 - ピン 55	GPIO24/eQEP2A
14	B (TTL)		J6 - ピン 54	GPIO25/eQEP2B
16	R (TTL)		J6 - ピン 58	GPIO26/eQEP2I
18	A (シングル エンド アナログ 0 ~ 3.3V)		J3 - ピン 27	ADCIN_A0
20	B (シングル エンド アナログ 0 ~ 3.3V)		J3 - ピン 28	ADCIN_B0

以下の手順に従って、ハードウェアをセットアップします：

1. 適切なコネクタまたはアダプタを使用して TIDA-00176 ボードを InstaSPIN-MOTION LaunchPad に接続します。

注

内部テストでは、[図 6-2](#) に示すように、TIDA-00176

と InstaSPIN-MOTION LaunchPad とのインターフェイスとしてアダプタ ボードが設計されています。

2. [セクション 6.2.2](#) に示されているデフォルトの 3 つのジャンパ設定で、TIDA-00176 が構成されていることを確認します。
3. SubD-15 コネクタ (J8) または SIL-8 コネクタ (J9) のいずれかを使用して、Sin/Cos エンコーダをボードに接続します。
4. 24V 入力を J1 コネクタに電源ブリックから挿入するか、外部電源 (17 ~ 36V) の場合は J2 コネクタを使用します。
5. ミニ USB ケーブルを InstaSPIN-MOTION LaunchPad から PC に接続します。

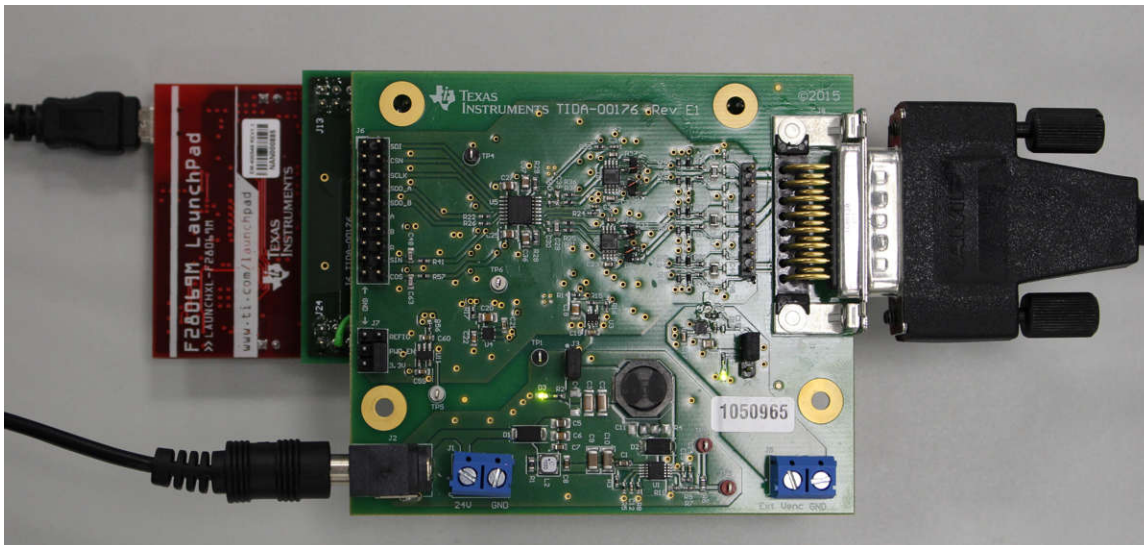


図 6-2. InstaSPIN-MOTION LaunchPad に搭載された TIDA-00176 ボード

また、<http://www.ti.com/tool/launchxl-f28069m> で InstaSPIN-MOTION LaunchPad の前提条件も参照してください。

F28069 LaunchPad 上にある以下のジャンパが設定されていることを確認します：JP1、JP2、JP3、JP7。JP4、JP5、JP6 を設定しないでください。つまり、これらを接続しないでください。

6.3.3 ソフトウェアの設定

以下の手順に従って、ソフトウェアをセットアップします：

1. まだ終わっていないければ、TIDA-00176 SinCosEncoder ファームウェアを TIDA-00176 設計フォルダからダウンロードし、c:\ti\tida-00176\bin などのフォルダに展開します。
2. Tera Term のように、仮想 COM ポートに接続できるターミナル プログラムを呼び出します。
3. ターミナル プログラムをシリアル コンソール モードでセットアップし、パラメータを次のように設定します：
 - ボーレート = 115200、データ = 8 ビット、パリティ = なし、ストップ = 1 ビット、フロー制御 = なし
4. Code Composer Studio (CCS) を起動します。
5. CCS では、InstaSPIN-MOTION F28069M LaunchPad で XDS100 JTAG ターゲットを設定します。
6. CCS で、TMS320F28069M に接続し、TIDA-00176 バイナリ出力ファイルをダウンロードします。実行 → 負荷プログラム → TIDA-00176_SinCosEncoder_Firmware_rev1_0.out
7. CCS でターゲットを実行します。

ターミナル プログラムには、[図 6-3](#) に示すように、TIDA-00176 の開始画面が表示されます。

注

バイナリファイルを F28069M にロードした後、ステップ 4 ～ 7 は不要になります。LaunchPad をリセットするだけで、プログラムを再起動できます。F28069M が、内部フラッシュからブートするように構成されていることを確認します。InstaSPIN-MOTION LaunchPad のマニュアルを参照してください。

トラブルシューティング：接続が確立されない場合、USB 仮想 COM ポートである TI XDS100 チャンネル B の VCP ドライバを、Windows®7 のデバイス マネージャで有効にする必要があります。詳細については、InstaSPIN-MOTION LaunchPad のマニュアルを参照してください。

```

+-----+
| TIDA-00176                                     |
| Interface to Sin/Cos Position Encoders with High-Resolution Position Interpolation |
| TIDA-00176_SinCosEncoder_Firmware_F28069M_rev1_0 |
+-----+

+-----+
| Sin/Cos Encoder Init                         |
+-----+

-> Enter Sin/Cos Encoder LINECOUNT: █

```

図 6-3. TIDA-00176 スタートアップ時のユーザー インターフェイス

6.3.4 ユーザー インターフェイス

起動後、ユーザー インターフェイスでは、Sin/Cos エンコーダのライン カウントを 10 進数で入力する必要があります。ライン カウントを入力すると、[図 6-4](#) に示すようにメイン メニューが使用可能になります。

```

| Interface to Sin/Cos Position Encoders with High-Resolution Position Interpolation |
| TIDA-00176_SinCosEncoder_Firmware_F28069M_rev1_0 |
+-----+
| Sin/Cos Encoder Init |
+-----+
-> Enter Sin/Cos Encoder LINECOUNT: 2000
LINECOUNT entered: 2000
+-----+
| Main Menu |
+-----+

key  mode                                format
---  ---                                ---
b    basic display mode                 [angle]
e    expert display mode                [angle index incr phase16 phase12 tick]
r    raw data dump at 200Hz            [QEP QEPL sin16 cos16 sin12 cos12 tick]
a    angle dump at 200Hz               [angle incr phase16 phase12 tick]
x    reserved
---  ---                                ---
any  any other key returns to this main menu

-> press key

```

図 6-4. TIDA-00176 ユーザー インターフェイスのメイン メニュー

4 種類のメニューが用意されています。各文字 **b**、**e**、**r**、**a** のいずれかを押して選択できます。メニュー項目 **x** は、ソフトウェア開発中の内部テストモード用に予約済みです。

「**b**」または「**e**」を押して基本表示モードまたはエキスパート表示モードを選択します。エキスパート表示モードでは、補間した角度を度または追加情報で印刷します。索引が発生していないため、最初は、合計角度は絶対値ではないことに注意してください。これは、エキスパート表示モードで増分マーカーが「いいえ」に設定されていることで認識できます。増分マーカーが「はい」になるまで、エンコーダを時計回りにゆっくりと回します。これで、補間角度は索引 マーカー位置に対して絶対値になります。メイン メニューに戻るには、任意のキーを押します。

```

+-----+
| High-resolution angle [degree] |
+-----+
359.9804
+-----+
| Main Menu |
+-----+

key  mode                                format
---  ---                                ---
b    basic display mode                 [angle]
e    expert display mode                [angle index incr phase16 phase12 tick]
r    raw data dump at 200Hz            [QEP QEPL sin16 cos16 sin12 cos12 tick]
a    angle dump at 200Hz               [angle incr phase16 phase12 tick]
x    reserved
---  ---                                ---
any  any other key returns to this main menu

-> press key

+-----+
| Expert display mode [10Hz update rate] |
+-----+
+-----+
| High-resolution angle | Increments | Phase/atan [PU] |
| [degree]             | Marker Count | AD8354 F28069 |
+-----+
359.9804               No      0      0.8914  0.8926

```

図 6-5. 基本角度表示およびエキスパート表示モード

「a」を押して、200Hz の更新レートで角度データ ダンプを開始します。データ フォーマットについては、[セクション 5](#) に記載しています。スクリーンショットを [図 6-6](#) に示します。いずれかのキーを押して停止し、メイン メニューに戻ります。

```

=====+
| Data dump at 200 Hz |
=====+
Angle16PU    Angle12PU    Incr    Phase16PU    Phase12PU    Tick[32kHz]
0.85510715   0.85510683   7005    0.25946 0.25879 9190
0.85510674   0.85510638   7005    0.25862 0.25788 9270
0.85510715   0.85510668   7005    0.25945 0.25851 9350
0.85510679   0.85510661   7005    0.25871 0.25835 9430
0.85510692   0.85510671   7005    0.25898 0.25854 9510
0.85510753   0.85510694   7005    0.26022 0.25902 9590
0.85510702   0.85510659   7005    0.25919 0.25830 9670
0.85510717   0.85510682   7005    0.25949 0.25878 9750
0.85510726   0.85510671   7005    0.25967 0.25857 9830
0.85510681   0.85510660   7005    0.25876 0.25833 9910
0.85510682   0.85510658   7005    0.25877 0.25829 9990
0.85510727   0.85510681   7005    0.25970 0.25877 10070
0.85510728   0.85510672   7005    0.25972 0.25858 10150
0.85510755   0.85510694   7005    0.26027 0.25902 10230

```

図 6-6. 更新レート 200Hz での角度ダンプ モード

「r」を押して、200Hz の更新レートで未加工データ ダンプを開始します。データ フォーマットについては、[セクション 5](#) に記載しています。スクリーンショットを [図 6-7](#) に示します。いずれかのキーを押して停止し、メイン メニューに戻ります。

```

=====+
| Raw data dump at 200 Hz |
=====+
QEP    QEPL    Vsin16    Vcos16    Vsin12    Vcos12    Tick[32kHz]
7005    7005    1.0044    0.0631    1.0280    0.0583    1542
7005    7005    1.0108    0.0631    1.0280    0.0583    1622
7005    7005    1.0069    0.0616    1.0280    0.0583    1622
7005    7005    1.0150    0.0662    1.0309    0.0597    1702
7005    7005    1.0089    0.0627    1.0324    0.0612    1782
7005    7005    1.0083    0.0643    1.0280    0.0597    1862
7005    7005    1.0101    0.0680    1.0295    0.0612    1942
7005    7005    1.0066    0.0636    1.0265    0.0597    2022
7005    7005    1.0072    0.0666    1.0265    0.0597    2102
7005    7005    1.0083    0.0595    1.0295    0.0568    2182
7005    7005    1.0047    0.0605    1.0251    0.0554    2262
7005    7005    1.0032    0.0610    1.0251    0.0583    2342
7005    7005    1.0040    0.0671    1.0280    0.0612    2422
7005    7005    1.0110    0.0643    1.0324    0.0597    2502

```

図 6-7. 更新レート 200Hz での未加工データ ダンプ モード

7 テスト結果

各機能ブロックと基板全体を特性評価するためにテストを実施しました。特に次のテストを行いました。

- アナログ シグナル チェーン ガイド
- パワー マネージメント
- Sin/Cos エンコーダ シグナル ミュレーションと Sin/Cos エンコーダを搭載したフル システム
- EMC 耐性 (ED、EFT、サージ)

テストは室温約 22 ~ 23 度、または 75 度か 85 度で実施しました。特に記載がない場合は、室温が適用されます。

以下に、TIDA-00176 のテスト セッションで使用した機器を示します：

表 7-1. TIDA-00176 性能テスト用の試験装置

試験装置	部品番号
プログラマブルな 16 ビット波形発生器	Keysight (アジレント) 33600A
低速オシロスコープ (電源テストに最適)	Tektronix TDS2024B
高速オシロスコープ (アナログ信号テストに最適)	Tektronix TDS784C
調整可能な SMPS	Knuerr-Heinzinger Polaris 125-5
24V、2.5A 時 SMPS (電源ブリック)	V-infinity 3A-621DN24
真の実効値マルチメータ	Fluke 179
差動プローブ	Tektronix P6630
シングルエンド プローブ	Tektronix P6139A
プログラマブル サーマル チャンバー	Voetsch VT 4002
プログラマブル電子負荷モジュール	Chroma 63103
電子負荷モジュール用制御モジュール	Chroma 6314
温度カメラ	Fluke TI40
制御システムのループ アナライザ	Venable 3120
HEIDENHAIN シールド ケーブル、PUR M23 オス / メス (4 × 2 × 0.14mm、4 × 0.5mm)、10m、20m、50m	298399-10、-20、-50
HEIDENHAIN M23/Sub-D15 オス アダプタ ケーブル、1m	310196-01
HEIDENHAIN Sin/Cos エンコーダ	ROD480-2000、ROD480-1024、ROD486-2048

7.1 アナログ性能テスト

図 7-1 に、TIDA-00176 アナログ シグナル チェーンのテスト画像を示します。

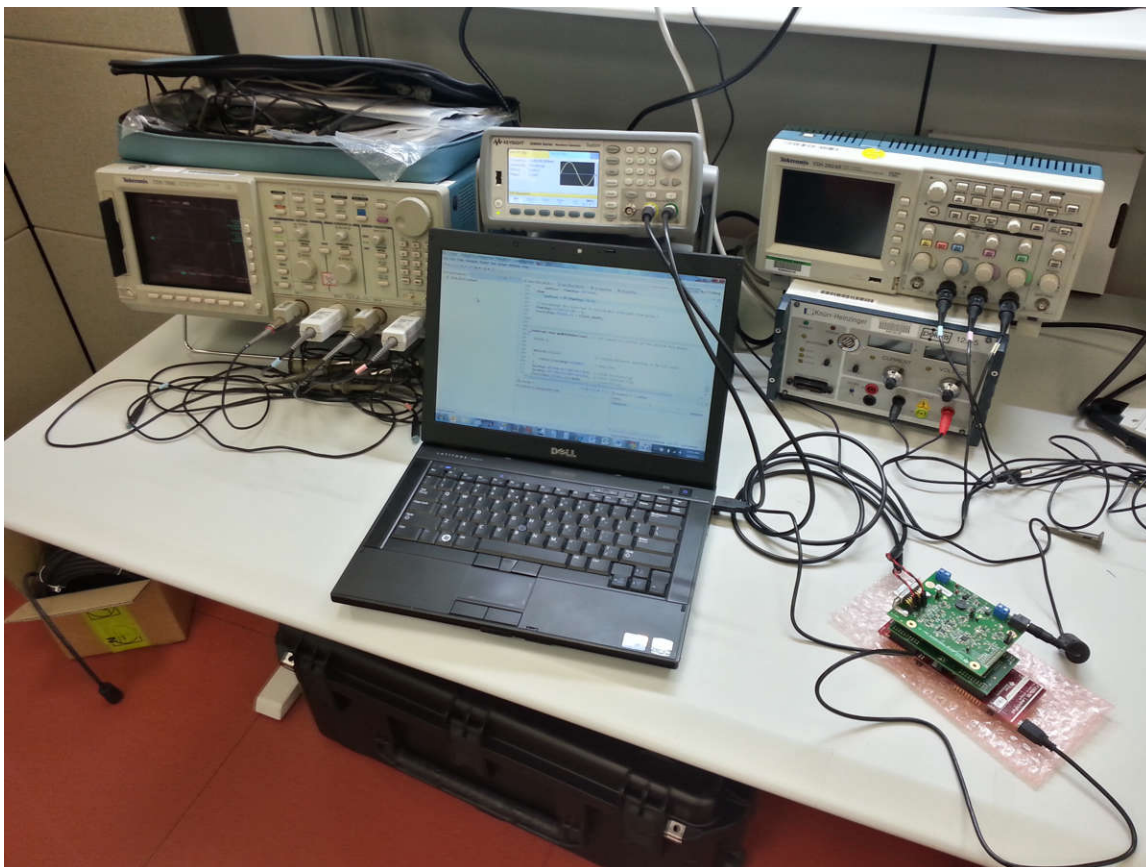


図 7-1. TIDA-00176 アナログ シグナル チェーンの性能テストのテスト設定

完全差動アンプ THS4531A とデュアル 16 ビット ADC ADS8353 を採用した高分解能の 16 ビット信号路と、差動からシングルエンドへのアナログ信号路がテスト済みです。目的のため、デュアル出力のプログラマブル ファンクション ジェネレータを使用しています。入力信号をコネクタ J8 (差動入力 A、B、R) に印加します。出力波形は、分析された信号路に応じて、さまざまなプローブ ポイントで収集されています。

7.1.1 高分解能信号路

測定は、高精度、高分解能の信号路で実施されました。1V_{PP} の正弦波信号をエンコーダ コネクタ J8 入力 A+、A-、B+、B- に注入し、差動アナログ信号を ADS8354 の差動入力で測定しました。図 7-2 に、テスト用に測定された入力信号と出力信号の概要を示します。

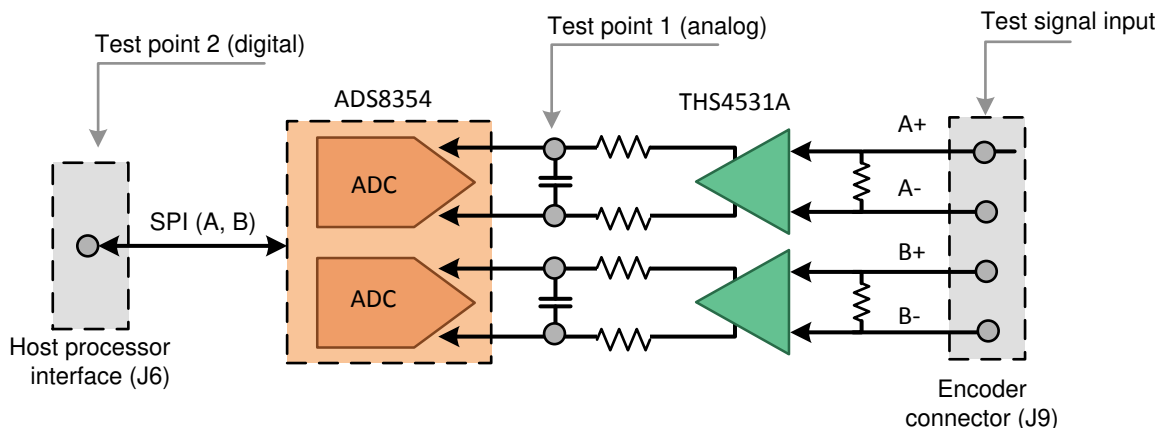


図 7-2. 高分解能シグナル チェーン測定ポイント

7.1.1.1 エンコーダ コネクタから ADS8354 入力までのアナログパスのボード線図

図 7-3 に、振幅と位相応答を示します。この値は主に THS4531A のゲイン設定 2、パッシブ 1 次ローパス フィルタにより定義されます。このフィルタは、2 つの 10Ω 直列抵抗と 2.2nF の並列コンデンサで構成されます。

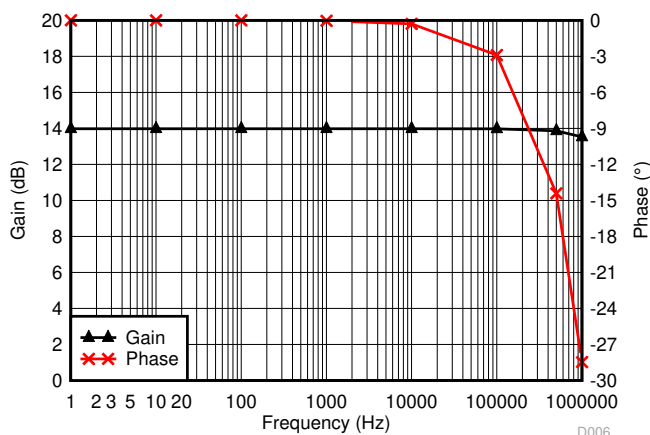


図 7-3. エンコーダ差動入力から ADS8354 差動入力までの高分解能アナログのボード線図

7.1.1.2 高分解能信号路全体の性能プロット (DFT)

以下のテストでは、差動アンプの THS4531A を RC フィルタ経由でデュアル 16 ビット ADC ADS8354 に接続した高分解能シグナル チェーン全体でテストしました。エンコーダの差動入力ピンに正弦波テスト信号が注入され、16 ビットのデジタル データが解析されました。

この分析は、信号対雑音比 (SNR)、全高調波歪み (THD)、信号対雑音歪み比 (SINAD)、有効ビット数 (ENOB) の性能を評価するために周波数ドメインで実施しました。本質的に、これらすべてのパラメータは、高速フーリエ変換 (FFT) 解析に基づいて ADC のノイズおよび歪み性能を定量化する異なる方法です。このセクションの末尾には、ADC による信号対雑音比測定理論について簡単な紹介があります。

テストでは、次の 2 種類の入力信号を使用しました:

- 1.8V の超低ノイズの DC ソース
- 振幅が 0.6V_{pp} の 1kHz の正弦波。これは Sin/Cos エンコーダの低い出力を表しています

入力信号は、一度に入力チャンネル A+、A–、B+、B– のいずれかに印加され、もう一方のチャンネルは未接続です。目的は、2 つのチャンネル A と B (またはサインとコサインそれぞれ) の間で超低クロストーク レベルを測定して強調することです。

DC 入力を使用して、最良のノイズ性能を確保します (入力 / ソースからノイズが発生しないため)。1kHz の正弦波を使用して、2 つの並列チャンネルの有効ビット数を測定します。

チャンネル A および B は、両方とも 32kHz でサンプリングされ、チャンネル A および B について連続して 8192 個の 16 ビット サンプルが取得されました。収集されたデータのうち、SNR と THD を測定するため、DFT を計算しました。

結果は次の図に示します。

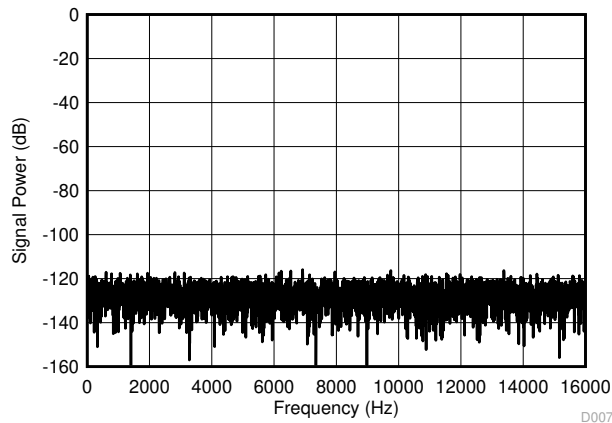


図 7-4. 入力 A で 1.8V DC を使用した 16 ビット チャンネル A 出力の DFT

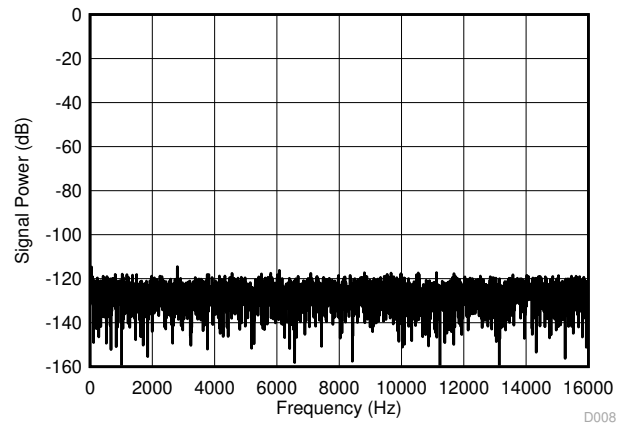


図 7-5. 入力 B で 1.8V DC を使用した 16 ビット チャンネル B 出力の DFT

前の図で、測定されたノイズフロアは **120dB** 未満であり、これは達成可能な最高の性能を示しています。また、プロットはフルスケール入力範囲、すなわち最大振幅を基準としています。**0dB** は **ADS8354** で可能な最大入力に対応し、この構成では **2V_{pp}** となります。

以下の図は、振幅 **0.6V_{pp}**、**1kHz** の正弦波入力電圧での高分解能チャネル全体の **DFT** を示しています。これは、約 **-6dB** の入力レベルと、理論上のフルスケール レンジの入力との関係に相当します。

入力信号をチャネル **A** またはチャネル **B** のいずれかに印加しました。もう 1 つのチャネルは、クロストークを測定するためにオープンのままにしました。

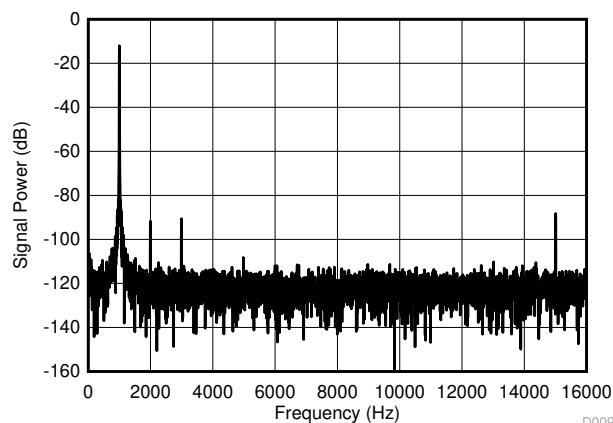


図 7-6. 600mV_{pp}、1kHz の正弦波入力を入力 A に印加した場合の 16 ビット チャネル A 出力の DFT

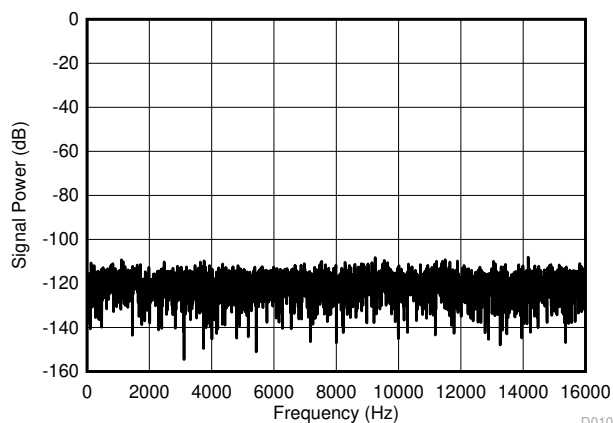


図 7-7. 600mV_{pp}、1kHz の正弦波入力を入力 A に印加した場合の 16 ビット チャネル B 出力の DFT

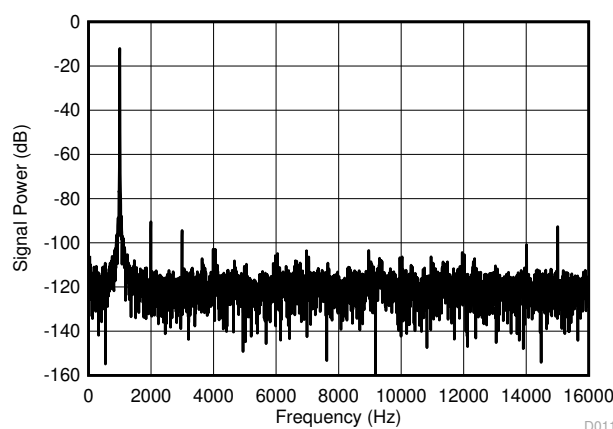


図 7-8. 600mV_{pp}、1kHz の正弦波入力を入力 B に印加した場合の 16 ビット チャネル B 出力の DFT

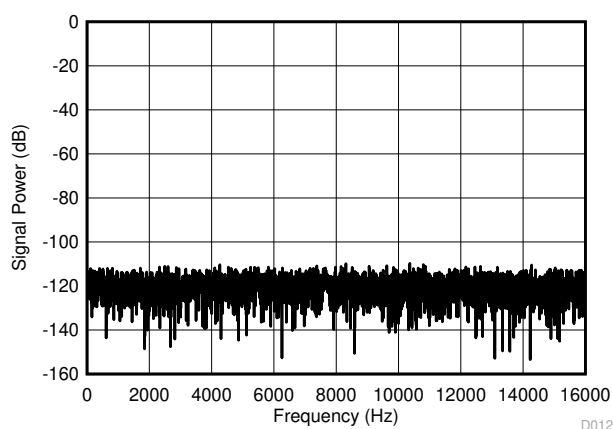


図 7-9. 600mV_{pp}、1kHz の正弦波入力を入力 B に印加した場合の 16 ビット チャネル A 出力の DFT

これらの値は、理論上のフルスケール入力範囲を参照しています。1kHz の正弦波信号の 1 次高調波と 2 次高調波は、信号源自体によるものであることに注意してください (通常、テスト信号の周波数を分離するために、非常に強力なノッチフィルタを使用します。例として [SLAU515](#) も参照してください)。

また、1kHz 信号の周波数がわずかに変化していることにも注意してください。これは TIDA-00176 ハードウェアによるものではなく、F28069 ソフトウェア実装のジッタによるもので、ADS8354 の変換 (ホールドモード) を開始する SPI 転送のトリガは、12.5ns に相当する CPU の 1 クロック サイクルのジッタで発生します。

前の写真では、サイン (信号 A +、A-) とコサイン (B +、B-) の 2 つのアナログ チャネル間にクロストークが基本的に存在しないことも強調しました。スペクトル (DFT) はサンプリング周波数の半分です (スペクトルの後半は前半の鏡面コピーなので、プロットには表示されません)。Hann 関数 (http://en.wikipedia.org/wiki/Hann_function) は、データをウィンドウ化して、周波数ドメインのよりクリーンなプロットを取得する目的で使います。

この設計について、THD、SNR、ENOB とフルスケール信号との関係を計算できます。これらを [表 7-2](#) に示します。

表 7-2. 高分解能信号路 (THS4531A と ADS8354) の代表的性能

パラメータ	値 (測定値)
SNR	89.1 dB
SINAD	88.5 dB
ENOB	14.4 ビット
クロストーク	-107 ~ -109dB

7.1.1.3 ADC を使用した AC 性能の定義に関する背景

ADC の代表的な FFT プロットを 図 7-10 に示します。

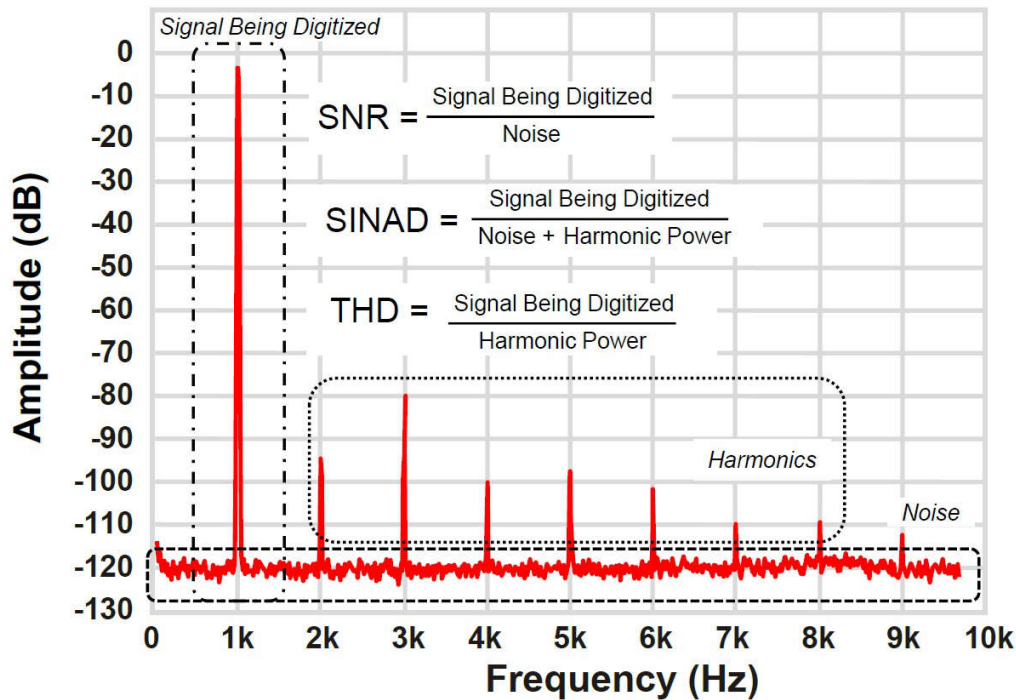


図 7-10. 性能の定義

信号対雑音比は、システムの合計ノイズへの詳しい情報を提供します。データ アクイジション システムの合計ノイズは、フロント エンド アンプのノイズと ADC ノイズの 2 乗和平方根 (rss) です。ADC ノイズには、量子化ノイズと、ADC 内部回路が寄与するノイズが含まれます。これらすべてのソースからの合計ノイズの寄与 ($V_{n_TOT_RMS}$ と呼ばれます) は、システムの合計信号対雑音比を計算するために、ADC の入力を基準にします。

$$SNR = \frac{V_{SIGNAL_RMS}}{V_{NOISE_RMS}} \quad (16)$$

THD は、すべての高調波成分 (一般に 9 つの高調波を使用) の rss と、基本信号周波数の出力との比として定義されます。一般にフルスケール (FS) 付近の入力信号で規定されますが、この設計ではクリッピングを防止するため、入力を FS より 0.5dB 低く維持します。

入力信号の実効値 (rms) を V_{SIGNAL_RMS} と表し、(基本波を除く) 最初の 9 つの高調波の合計電力を $V_{HARMONICS_RMS}$ と表すと、THD は次のように計算できます：

$$THD = \frac{V_{SIGNAL_RMS}}{V_{HARMONICS_RMS}} \quad (17)$$

SINAD は歪みとノイズの影響を組み合わせ、システム全体の動的性能の累積測定値を提供します。

$$SINAD = \frac{V_{SIGNAL_RMS}}{\sqrt{V_{NOISE_RMS}^2 + V_{HARMONICS_RMS}^2}} \quad (18)$$

最後に重要な点ですが、ENOB はノイズフロアを上回るビット数を指定するため、ADC からデジタル化された信号の品質を測定する指標として効果的です。(dB で表される SINAD から) 次のように計算されます:

$$\text{ENOB} = \frac{\text{SINAD}_{\text{dB}} - 1.76 \text{ dB}}{6.02 \text{ dB}} \quad (19)$$

パラメータの計算方法の詳細については、[SLAU515](#) を参照してください。

7.1.2 差動からシングルエンドへのアナログ信号路

デュアル チャネル信号発生器を使用して、2 つの結合されたサイン波 (同じ振幅、同じ周波数で、それらの間で位相シフトは 90 度) が生成され、J9 コネクタを使用してアナログ差動信号 A+、A-、B+、B- に印加されます。2 つの差動プローブを使用して、入力に印加されている差動信号を取得し、2 つのシングルエンド プローブを、コネクタ J6 のピン 18 とピン 20 にそれぞれあるアナログパスのシングルエンド アナログ出力 A および B に接続しています。

入力に対する出力の振幅はこのように測定され、同時に差動入力とそれぞれのシングルエンド出力との間の位相シフトが測定されます。これにより、アナログ シグナル コンディショニング パスのボード線図を計算できます。

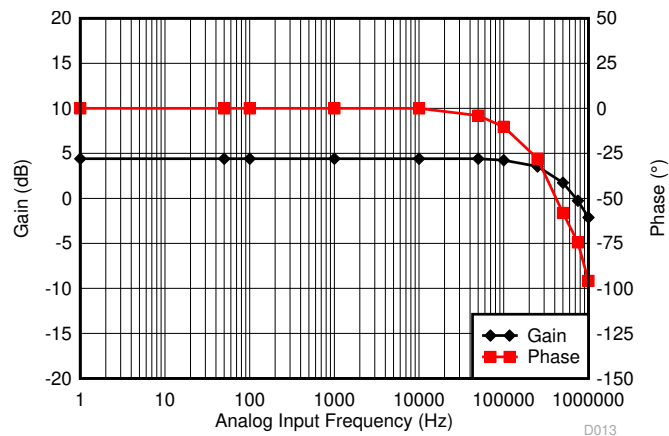


図 7-11. 差動からシングルエンドへのアナログ信号路の伝達関数 — チャネル A および B

マーカ信号 (R+/R-) についても同様の測定が行われました。コンパレータへの入力での出力を測定しているため、R 信号の位相は A と B の等価値よりも小さくなることに注意してください。ここでのデカップリングフィルタは、A および B の出力フィルタに対して、カットオフ周波数 (R = 20Ω、C = 2.2nF) が 5 倍高くなっています (R = 100Ω、C = 2.2nF)。

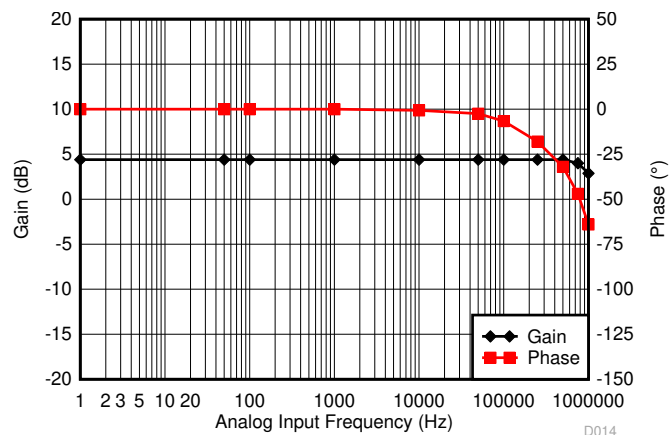


図 7-12. 差動からシングルエンドへの索引マーカ R の伝達関数

7.1.3 デジタル出力信号 A_{TTL} 、 B_{TTL} 、 R_{TTL} のコンパレータ サブシステム

このセクションでは、シングルエンド アナログ信号 A、B、R をデジタル信号に変換するヒステリシス付きコンパレータの性能をテストします。

主に、ホスト コネクタ J6 におけるコンパレータの出力信号 A_{TTL} 、 B_{TTL} 、 R_{TTL} と、高分解能パスの ADS8354 アナログ入力と、アナログ パス用のシングルエンド アナログ信号との伝搬遅延に重点を置いています。

このテストの目的は、コンパレータ パスとアナログパスとの間の信号遅延の全体的な測定を行うことで、ヒステリシスによって生じる遅延、ローパス フィルタリングによる位相シフト、およびコンパレータ自体の伝搬遅延を考慮することです。

3 つのチャンネル A、B、R はすべて、コンパレータの出力に関して絶対的に対称となっているため、測定はチャンネル A のみ実施しました。

アナログ信号はどちらもシングルエンド プローブで測定したため、ADS8354 の差動入力では正の差動信号のみが GND に対して測定されました。

テストでは、エンコーダ コネクタ J9、A_P、A_M (サイン) と B_P、B_M (コサイン)、P_M と R_P に正弦波入力信号を注入しました。

高分解能パスの場合、伝搬遅延のワーストケース シナリオをテストするため、振幅を $1.0V_{PP}$ (標準値) および $0.3V_{PP}$ (最小値)、100Hz および 500kHz (最大値) に設定しました。アナログ パスの測定は、コーナー ケースとして、100Hz および 500kHz で $0.3V_{PP}$ で実施しました。

テスト結果を次の図に示します。高分解能パス (ADS8354 の差動入力) とシングルエンド アナログ パス (コネクタ J6、ピン 12) の両方が、コンパレータ出力 (コネクタ J6、ピン 18) と比較されていることに注意してください。

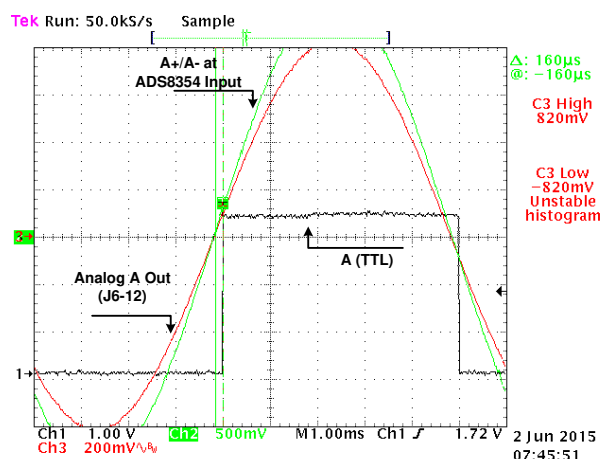


図 7-13. コンパレータ出力 A_{TTL} 対 ADS8354 への差動入力とアナログ出力 A (J6-12) (入力 $1.0V_{PP}$ 、エンコーダ コネクタ J9-1、J9-2 で 100Hz の場合)

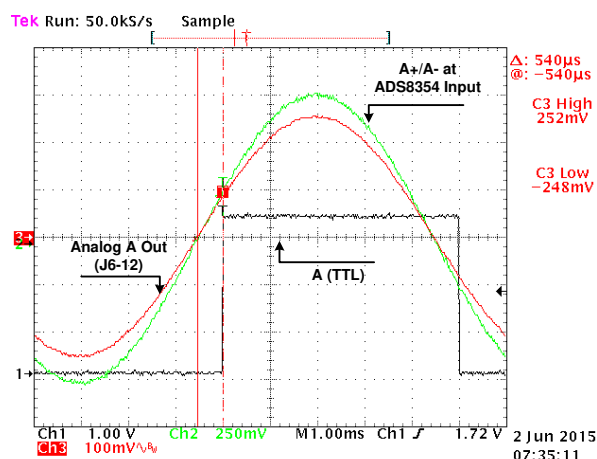


図 7-14. コンパレータ出力 A_{TTL} 対 ADS8354 への差動入力とアナログ出力 A (J6-12) (入力 $0.3V_{PP}$ 、エンコーダ コネクタ J9-1、J9-2 で 100Hz の場合)

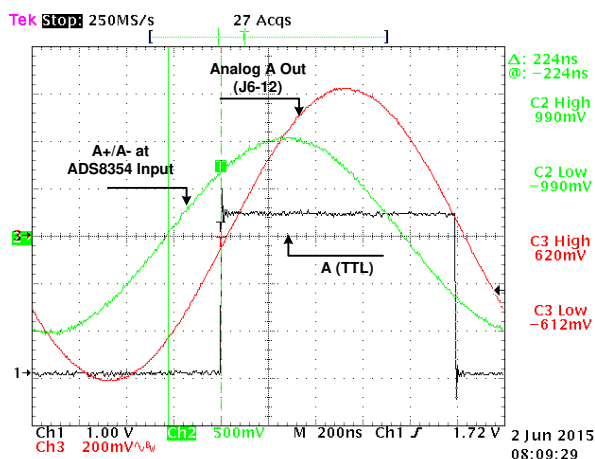


図 7-15. コンパレータ出力 A_{TTL} 対 ADS8354 への差動入力とアナログ出力 A (J6-12) (入力 1.0V_{PP}、エンコーダコネクタ J9-1、J9-2 で 500kHz の場合)

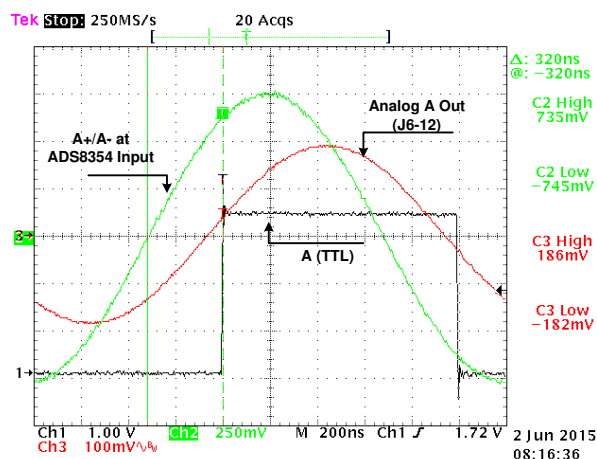


図 7-16. コンパレータ出力 A_{TTL} 対 ADS8354 への差動入力とアナログ出力 A (J6-12) (入力 0.3V_{PP}、エンコーダコネクタ J9-1、J9-2 で 500kHz の場合)

予想されるように、RC フィルタ デカッパリング ネットワークを含めた全体的な最大位相シフトは 500kHz で発生し、入力振幅は最小となり、合計で約 320ns (57 度) です。これは 90 度より十分低く、[セクション 2](#) の 60 度仕様内です。TLV3201 の伝搬遅延が通常 40ns と非常に小さいことが、この低い数値に大きく影響しています。これにより、ローパスフィルタなどの位相遅延の量に影響を与えるパラメータで可能なすべてのスプレッドを補償する主要なマージンも得られます。

100Hz での伝搬遅延は、高分解能チャンネルの場合とほぼ同じです。これは、低い周波数での遅延が振幅に依存するヒステリシスによって支配されるためです。

シングルエンド アナログ パスでは、コンパレータの伝搬遅延が **250ns** であり、ヒステリシス自体が存在しているにもかかわらず、**500kHz** でほとんど遅延が生じません。これは、**Piccolo MCU** のような組込みスイッチト キャパシタ **ADC** を駆動する、シングルエンド アナログ出力 (**R = 100Ω**, **C = 4.7nF**) に強力なローパス フィルタがあるためです。この周波数に依存する位相遅延により、より高い周波数でのコンパレータからの遅延がわずかに補償されます。

2 番目のステップでは、ヒステリシスを持つコンパレータに関連する遅延のみを測定しました。遅延は、コンパレータへの入力 (R50 のアナログ信号) とコンパレータの出力として指定されています。前段のアンプ段のゲインが 1.66 であるため、エンコーダ入力で 0.3V_{PP} は、コンパレータ入力で約 0.5V_{PP} に等しいことに注意してください。

コンパレータブロックによって生じる遅延 (ヒステリシスとコンパレータの伝搬遅延) の測定結果を [表 7-3](#) に示します。

表 7-3. ヒステリシス コンパレータ サブシステムの遅延

エンコーダ コネクタの入力	コンパレータ入力での電圧 (例: R50)	伝搬遅延	位相遅延
1.0V _{PP} 、100Hz	1.66V	170μs	6.1 度
0.3V _{PP} 、100Hz	0.5V	560μs	20.1 度
1.0V _{PP} 、500kHz	1.52V	120ns	21 度
0.3V _{PP} 、500kHz	0.46V	200ns	36 度

図 7-16 から 図 7-13 までの全体的な遅延との差は、アナログパス内のローパスノイズフィルタによるもので、これは高分解能の信号路の 500kHz でさらに約 22 度寄与します。ただし、遅延は依然として 90 度を十分に下回っています。

理想的な位相一致が必要な場合は、[セクション 4.5](#) に示すように、対応するローパス フィルタを THS4531A で実装できます。

7.2 電源テスト

7.2.1 24V DC/DC 入力電源

以下のテストは、24V を 6V 中間レールに変換する DC/DC 降圧コンバータの特性を評価するために実施しました。

7.2.1.1 負荷ラインレギュレーション

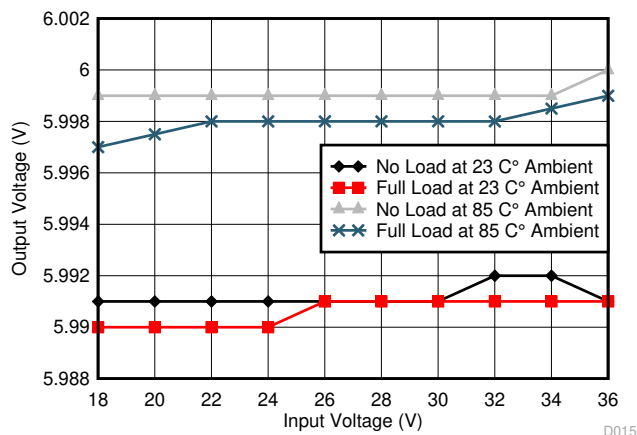


図 7-17. 負荷ラインレギュレーション

コメント:ラインロードレギュレーションは、全動作条件下で $\pm 10\text{mV}$ の範囲内です。 V_{OUT} は予期される $6\text{V} \pm 2\%$ (レギュレータの精度) に、抵抗デバイダ R7/R10 の精度を加えた値です。

7.2.1.2 出力電圧リップル

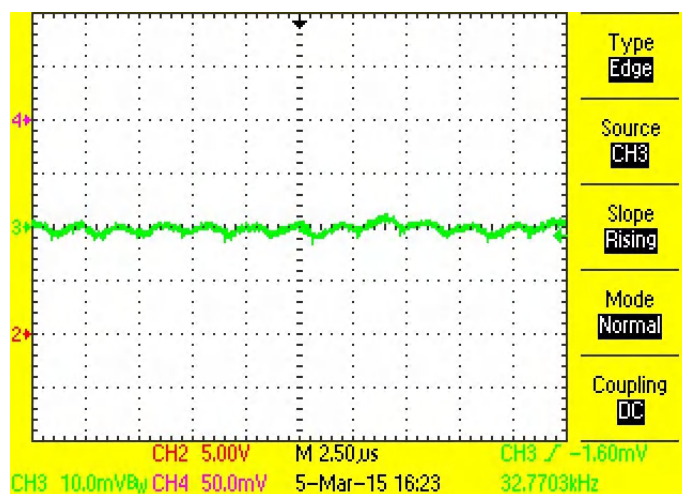


図 7-18. 周囲温度 22°C 時、24V 入力、無負荷時の出力電圧リップル

コメント: V_{OUT} リップルは、必要とされる 20mV_{PP} よりもはるかに小さくなっています。

7.2.1.3 スイッチング ノードとスイッチング周波数

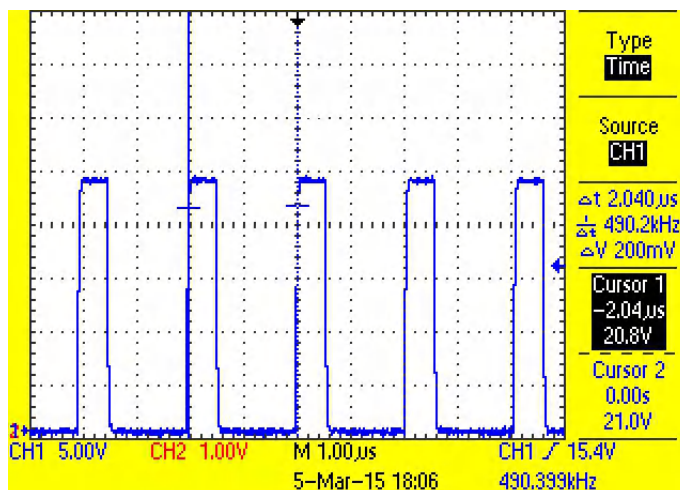


図 7-19. スイッチング周波数測定、全負荷、24V 入力、室温

コメント: スイッチング周波数は予想される範囲内 ($500\text{kHz} \pm 23\%$) です。SMPS は安定しており、ジッタ、不規則スイッチング、電圧スパイクが発生しません。

7.2.1.4 効率

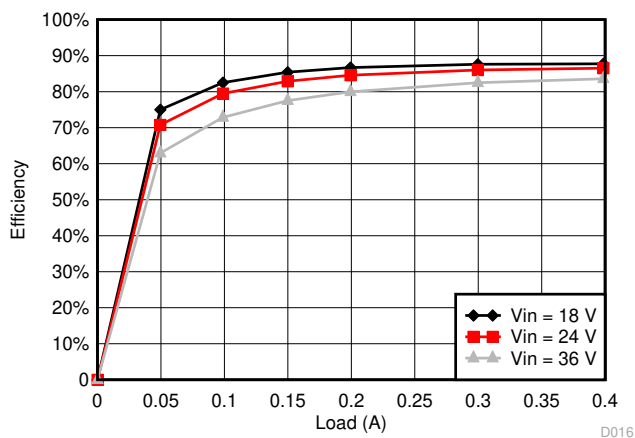


図 7-20. 逆極性保護ダイオード使用時の 22°C での効率

コメント: 逆極性保護に対するダイオードの DC/DC コンバータ効率への影響は無視できます。全負荷時の 80% の効率目標は、指定された任意の入力電圧において完全に達成されています。

7.2.1.5 ボード線図

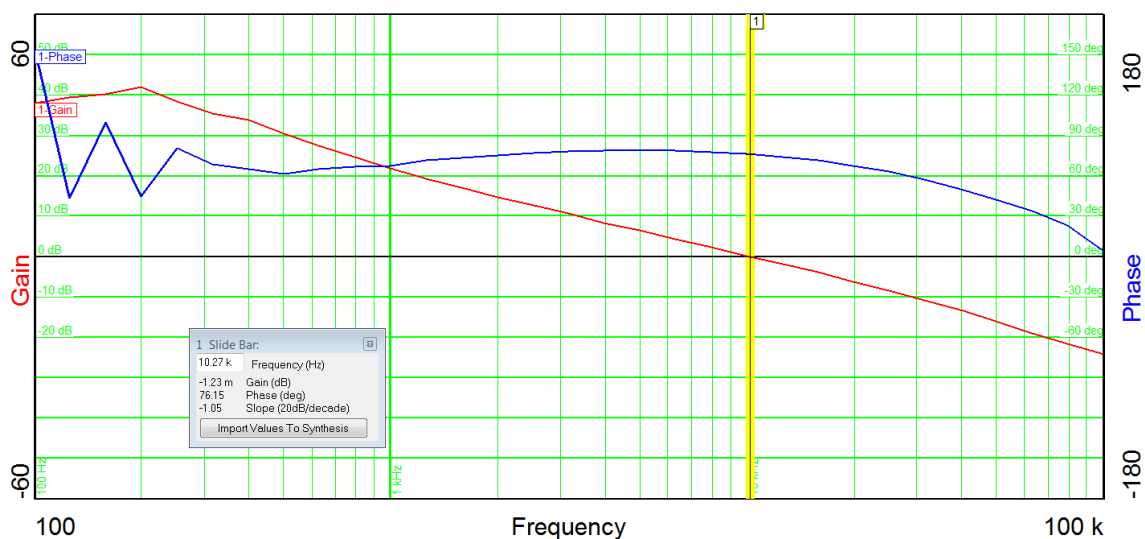


図 7-21. 24V 入力、全負荷時のボード線図

表 7-4. 位相とゲイン マージン

入力電圧	位相マージン	周波数クロスオーバー
36V	78 度	10.3KHz
24V	76 度	10.3KHz
17V	74 度	10.2KHz

コメント:ゲイン ループ分析からは、10kHz のシステム帯域幅が得られ、あらゆる動作条件で非常に良好な位相マージン (60 度超) が得られています。

7.2.1.6 温度プロット

最大負荷状態での基板上のホットスポットを決定するため、熱画像を取得しています。

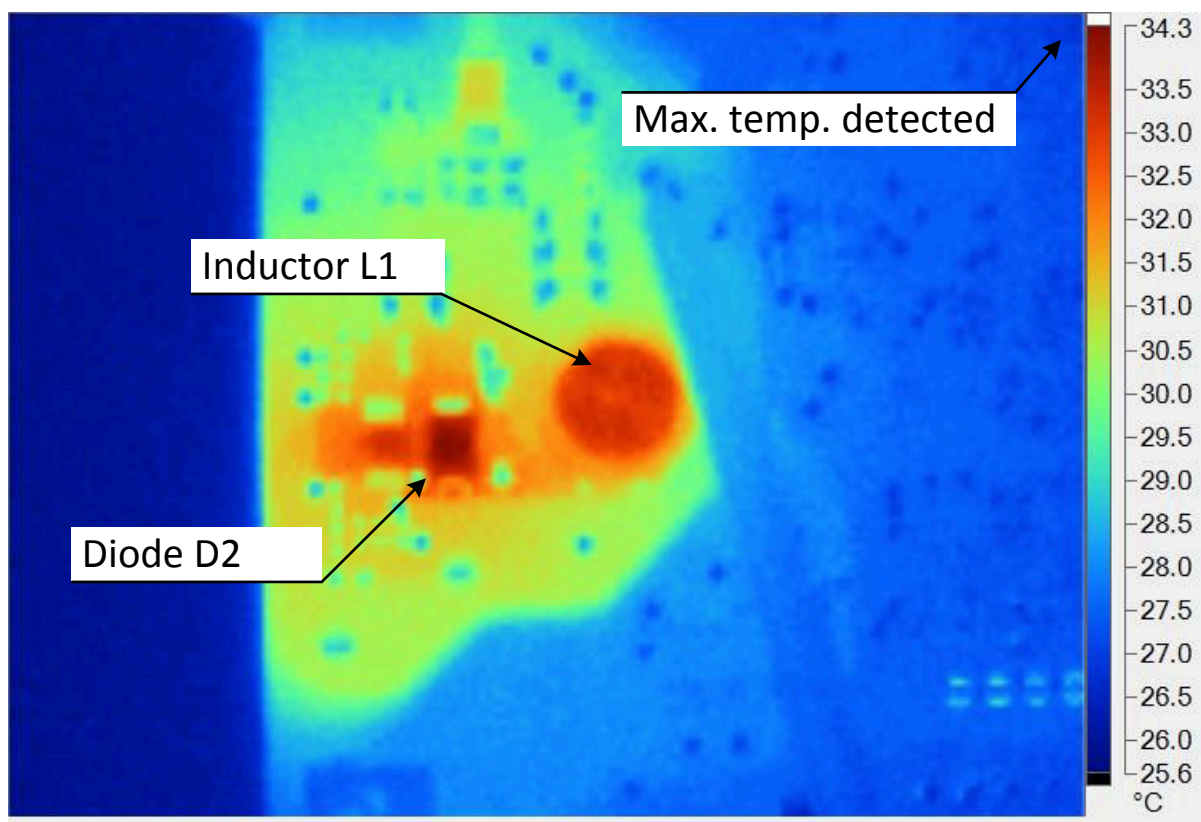


図 7-22. 熱画像、24V 入力、全負荷、22°C 周囲温度

コメント: 基板上で検出されたホットスポットは、TPS54040A 回路の非同期整流器またはダイオードに対応しています。これは、Troom テストでの入力電圧と出力電流に応じて 11°C の温度上昇を示しています。この部品の最大検出温度は 34°C です。

85°C でのテストでは、性能に著しいドリフトは見られませんでした (図 7-17、85°C における負荷ライン レギュレーションを参照)。

7.2.2 エンコーダ電源の出力電圧

エンコーダに電源を供給する LDO の出力電圧は適切にレギュレートされており、以下の測定の仕様要件を満たしています。

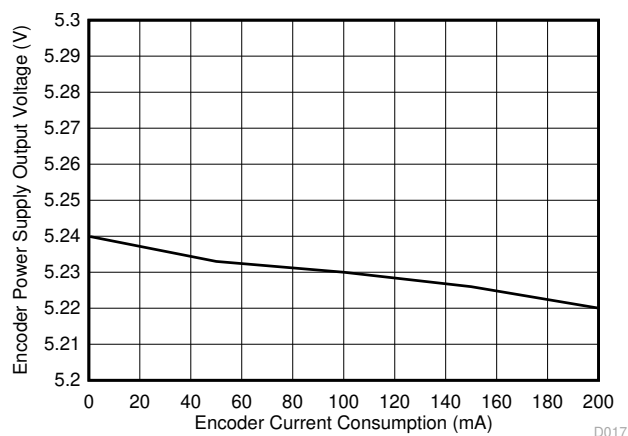


図 7-23. エンコーダ電源の出力電圧と負荷電流との関係 (0 ~ 200mA)

7.2.3 5V および 3.3V ポイントオブロード

信号チェーン ブロックに電源を供給するポイント オブ ロードを生成する 2 つの LDO の出力電圧は、適切なレギュレーションが行われ、仕様の要件を満たします。表 7-5 に測定値を示します。3.3V と 5V レールの公称消費電流は、Sin/Cos エンコーダを接続し、F28069M LaunchPad を使用して 16kHz で新しい測定値をトリガする状態で測定しています。

表 7-5. 出力電圧の測定値

規定出力電圧	公称負荷で測定された電圧	公称電流
5V	5.02V	49.9mA
3.3V	3.34V	0.2mA

7.3 システム性能

7.3.1 Sin/Cos エンコーダ出力信号エミュレーション

この目的のために、16 ビット プログラマブル デュアル出力信号発生器 Keysight (アジレント) 33600A を用いてエンコーダ出力信号をエミュレートしました。DC から最高 500kHz までの正弦波テスト信号を差動入力 A+/A- および B+/B- に注入しました。

このセクションでは、システム レベルの性能を測定します。特に、

- 1 つの電氣的周期にわたる精度 (位相)
- 最大入力周波数 500kHz で 1 回転全体に対する精度ここでは、エンコーダのエミュレーションは、1 つのエミュレートされた回転に相当する 2000 信号周期に基づいています

これらのテストを室温で行い、誤差ドリフトと温度との関係をチェックするために 70°C で繰り返しました。

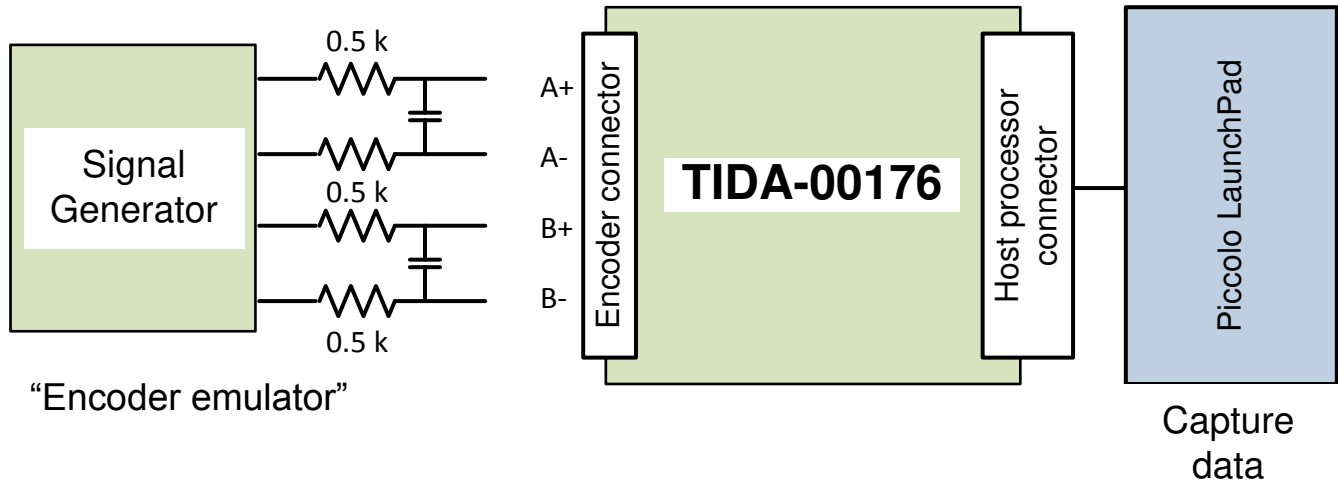


図 7-24. エンコーダ信号エミュレーションのテスト設定

7.3.1.1 1 周期 (増分位相) テスト

最初のテストでは、デュアル出力信号ジェネレータによって注入された誤差が TIDA-00176 の精度よりもはるかに大きく、テストの目的が完全に損なわれてしまうことが判明しました。ノイズ源や誤差発生源は、以下のように「簡潔に」要約することができます：

- ゲイン誤差 (A の振幅が B の振幅と等しくない)
- 位相シフト誤差 (予想どおり正確に 90 度一定ではない)
- オフセット誤差 (A または B 信号の平均が 0 ではない)
- ファンクション ジェネレータの量子化誤差に起因する HF ノイズ
- 周波数誤差 (信号が「結合」されている場合でも、A の周波数が B の周波数と等しくない)

注意

ファンクション ジェネレータに起因する量子化誤差とノイズを低減するために、信号ジェネレータと TIDA-00176 の入力との間に 1K ~ 1μF の LP フィルタを挿入します (1K 抵抗は、ネットワークの平衡を維持するために、実際には 2 つの直列 500Ω 抵抗です)。

2 つのチャンネル間のゲイン、オフセット、位相シフト、周波数誤差を除去するために、以下の設定を適用しました。TIDA-00176 のエンコーダ コネクタ J8 の入力 A と B の両方に、上記のようにフィルタ処理された出力信号を 1 つだけ印加し、同じ信号を供給しました。これにより、ファンクション ジェネレータの制限が排除されます。さらに、ADS8354 の 2 つのチャンネル間 (およびそれぞれのシグナル コンディショニング パス) での不一致をより適切に評価できます。

実際、ADS8354 から収集したデータは (理想的な世界では) 未加工データと同一の 2 つのストリームを示す必要がありますが、このレベルでの不一致は入力自体からではなく 2 つのチャンネルのミスマッチに起因します。また、オフセット誤差

とゲイン誤差の補正を実行して A チャンネルと B チャンネルのバランスを完全に保つことができるため、これはシステムのキャリブレーションにも使用できます。

セクション 6 に概要を示すように、TIDA-00176 に接続された F28069M LaunchPad を使用して、32kHz のサンプルレートでデータを取得しました。

ADS8354 のチャンネル A と B のデータが F28069M で収集されると、16 ビットの未加工データは Excel ファイルにダンプされます。すると、チャンネル B の未加工データは正確に

90 度位相シフトしています。その後、未加工データ A の逆タンジェントと、90 度位相シフトした未加工データ B の逆タンジェントを使用して、位相を計算します。

1.0V_{PP} の振幅および周波数 10Hz から最高 500Hz までについて、このテストを繰り返しています。結果を次の図に示します。

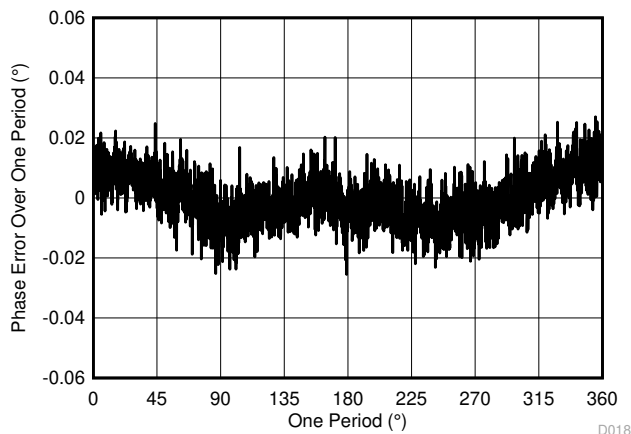


図 7-25. 1.0V_{PP} 10Hz 入力が印加された場合の 1 信号周期に対する位相誤差

1 つの増分ライン (1 信号周期 = 360 度) 内で、位相誤差は ± 0.02 度以内に十分に維持されます。これは、誤差 $\pm 0.02/360 = 0.0055\%$ に相当します。16 ビットの分解能に関しては、これは約 $\pm 3\text{LSB}$ のみに相当します。

ノイズ分布は ± 0.01 ($\pm 1.5\text{LSB}$) 以内で均一です。二重周期の位相誤差は、**セクション 1** に示すように、2 つの信号 A と B 間の理想的ではない 90 度の位相シフトによって発生します。

1 信号周期にわたって ± 0.02 度の誤差は、2000 のライン カウントを持つエンコーダの合計誤差 ± 10 マイクロ度 (0.036 アーク秒) に対応することに注意してください。

同じテストを公称 70°C のサーマル チャンバーで実行し、システムの性能ドリフト、特に角度位置の絶対誤差を評価しました。

この場合も、二重周波数変調は、2つの入力信号の不完全な一致 (90度の位相シフトなど) に起因します。

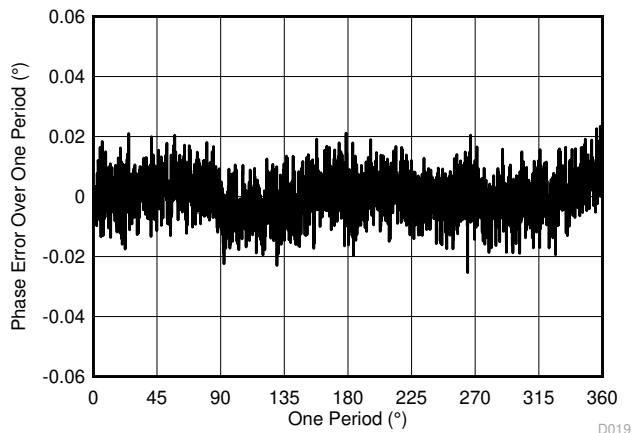


図 7-26. 1.0V_{PP} 10Hz 入力印加された場合の 1 信号周期に対する 70°C での位相誤差

同じテストを 0.6V_{PP} 入力で行ったところ、ノイズが大きく信号対雑音比が低下している状態が確認できました:

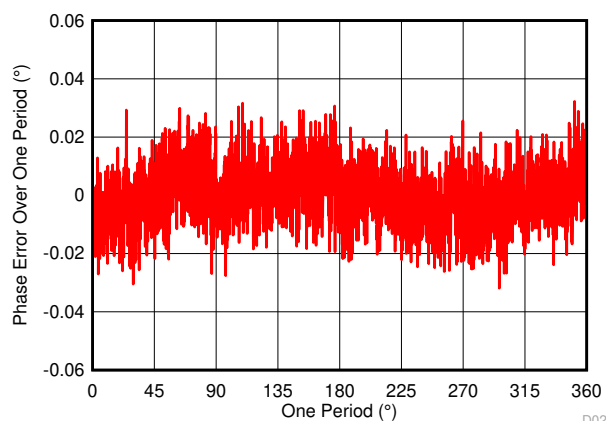


図 7-27. 0.6V_{PP} 10Hz 入力印加された場合の 1 信号周期に対する 23°C 環境での位相誤差

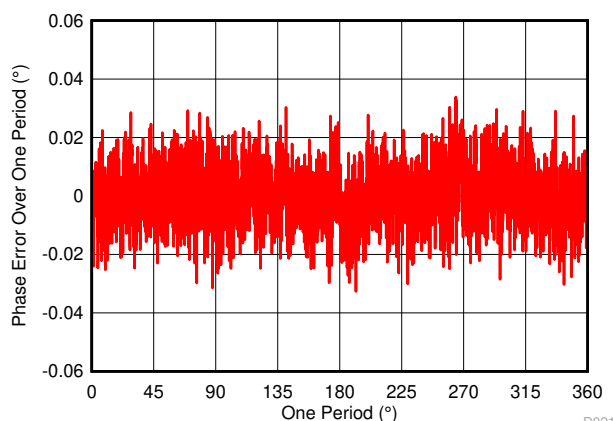


図 7-28. 0.6V_{PP} 10Hz 入力印加された場合の 1 信号周期 (1 回転 /2000) に対する 70°C 環境での位相誤差

温度に対する超低ドリフトは、アナログ シグナル コンディショニング用に使用される選択したオペアンプとマッチング済み抵抗の特性により、予想と一致します。

7.3.1.2 最高速度での 1 回の機械的回転テスト

このテストでは、Piccolo F28069M LaunchPad に接続された TIDA-00176 内で、1 回の機械的回転に対する高分解能補間角度を計算しました。サンプルレートは 80MHz の CPU クロックで 32kHz に設定しました。

このテストの目的は、補間アルゴリズムが最大入力信号周波数 500kHz で動作することを確認することです。たとえば、アナログ サンプルおよび QEP カウンタのラッチの不一致により、増分カウントを欠いたり、補間した位相 (アーク タンジェント) と対応するライン カウント (QEP) が不一致になったりしないかを確認します。これは、[セクション 7.3.1.1](#) で測定された量子化ノイズよりも大きな誤差に相当します。

そのため、デュアル信号発生器を用いてエンコーダの 360 度スピンをエミュレートしました。このテストは、デュアル出力信号発生器で、次の方法で実施します: 2 つの出力信号は振幅と周波数で結合され、90 度の位相シフトが行われます。その後、TIDA-00176 エンコーダ コネクタ J9 A+/A- および B+/B- ピンに 2 つの信号が入力として印加されます。

補間した合計角度は F28069M RAM に保存され、CCS メモリ ダンプによって読み取られます。

計算された高分解能角度を、2000 ライン カウントのエンコーダを仮定して理想的な位相と比較します。したがって、500kHz で 2000 の信号周期は、エミュレートされた 1 回転に相当します。合計角度位相は、 $360 \text{ 度} \times 500\text{kHz}/2000 = 90,000\text{deg/s}$ のレートで上昇します。表 7-6 に、1 μs のタイミングと 100ns のタイミングを示します。これは、80MHz の 1 つの F28069M CPU クロックに相当します。

表 7-6. ライン カウント 2000 が 15000rpm で動作する Sin/Cos エンコーダの角速度

最適な角速度	1 μs での角度の変化	12.5 での角度変更 (CPU クロック)
90,000deg/s	0.09	0.0011

信号発生器のジッタ、プロセッサのクロックのジッタ、さらには SPI/CS 経由でアナログ信号をサンプリングするホスト プロセッサの CPU クロックのジッタは避けられません。理想的なランプを (リファレンスがないため) 仮定すると、測定される角度には対応する位相遅れまたは進みがあり、これは速度依存の角度誤差につながります。

図 7-29 に、32kHz で測定された理想的なランプ (500kHz、1 回転あたり 2000 の信号周期) を仮定した補間角度誤差を示します。これにより、1 回転あたり 128 の連続サンプルが得られます。

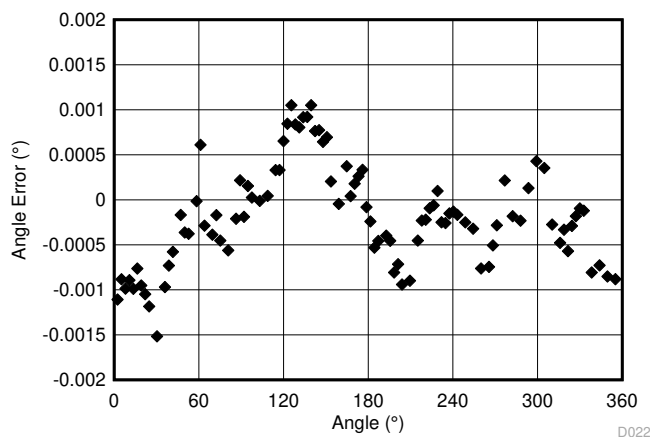


図 7-29. エンコーダ エミュレーションによる 1 回転に対する補間角度の誤差 (32kHz サンプリング時に 1V_{pp}、500kHz 入力)

前述したように、目標は精度をテストすることではなく、増分が失われないことを確認することでした。2000 ライン カウントのエミュレーションでは、1 増分ライン カウントが $360/2000 = 0.18$ 度に対応します。理想的な直線に対する角度誤差 (差) は ± 0.001 度以内にとどまっています。したがって、500kHz でも補間は適切に機能し、増分も失われません。

図に示すように、誤差は ± 0.0015 度以内です。これは、CPU クロックのジッタと、最小精度を決定する CPU クロックのジッタを持つ信号発生器のソースからの他のジッタによるものです。

この分配の理由は、1 または 2 CPU クロック サイクルの SPI 転送 /CS をトリガする F28069 ソフトウェアのジッタによるものです。/CS の立ち下がりエッジによってアナログ入力が入力ラッチされます。わずか 12.5ns のジッタは、約 $12.5\text{ns}/2000\text{ns} \times 360/2000 \text{ 度} \sim 0.0011 \text{ 度}$ の位相差に相当します。したがって、角度差は、実際には速度に依存する角度誤差 (速度) による遅れになります。

7.4 Sin/Cos エンコーダ システムのテスト

システムのテストは、ケーブル長がそれぞれ

1m と 71m の Sin/Cos エンコーダ ROD480-2000 と ROD480-1024 を使用して行います。

7.4.1 ゼロ インデックス マーカー R

最初のテストでは、TIDA-00176 ホスト プロセッサ インターフェイス コネクタ J6、ピン 12 (A_{TTL})、ピン 14 (B_{TTL})、ピン 16 (R_{TTL}) から得られるデジタル出力信号 A、B、R との間の同期またはスキューを検証します。このテストは、TIDA-00176 のコンパレータ サブシステムの適切な構成を検証するためのものです。

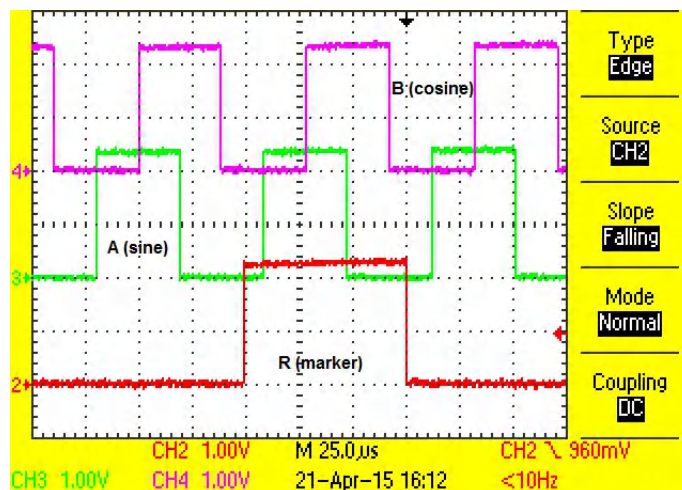


図 7-30. TIDA-00176 コンパレータ出力 J6-12、14、18 で TTL 信号 A、B、R を測定

コンパレータの出力信号 R の遷移は、A と B の両方が Low のとき (予想どおり) にのみ発生します。この結果は、A、B、および R 信号間のシーケンスが Sin/Cos エンコーダ シャフトの回転方向に依存することを意味します。図 7-30 では、B の立ち上がりエッジが A の立ち上がりエッジの後に発生するため、エンコーダは時計回りに回転しています。

A、B、R の間のスキューを、約 400rpm の高速で、および R の立ち上がり / 立ち下がりエッジについて詳しく調べました。A 信号と B 信号の両方が Low の場合でも、R の立ち上がりエッジと立ち下がりエッジが発生します。

図 7-32 および 図 7-31 の回転方向は反時計回り (CCW) であることに注意してください。

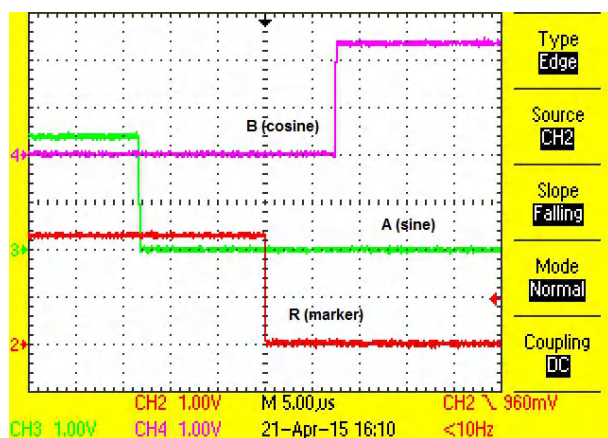


図 7-31. CCW 方向の立ち下がりインデックス信号 R と A および B との関係

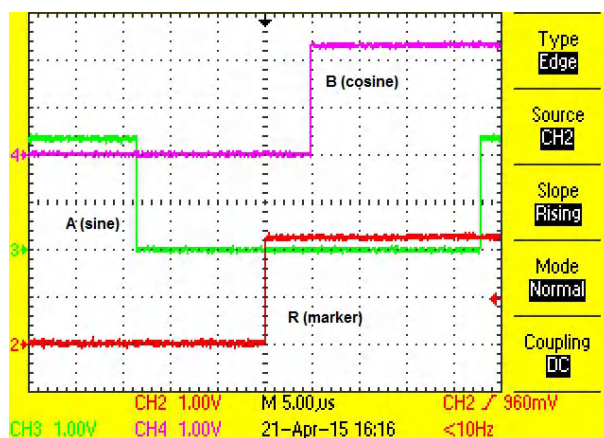


図 7-32. CCW 方向の立ち上がりインデックス信号 R と A および B との関係

7.4.2 機能システムのテスト

以下に示す静的角度テストは、1m および 71m のケーブル長で ROD480-1024 Sin/Cos エンコーダを使用して実施しました。機械的な精度が十分なエンコーダ テスト ベンチがないため、0.003 度 (10 アーク秒) より良好な精度での総合精度測定はできませんでした。図 7-33 に、テスト設定の図を示します。

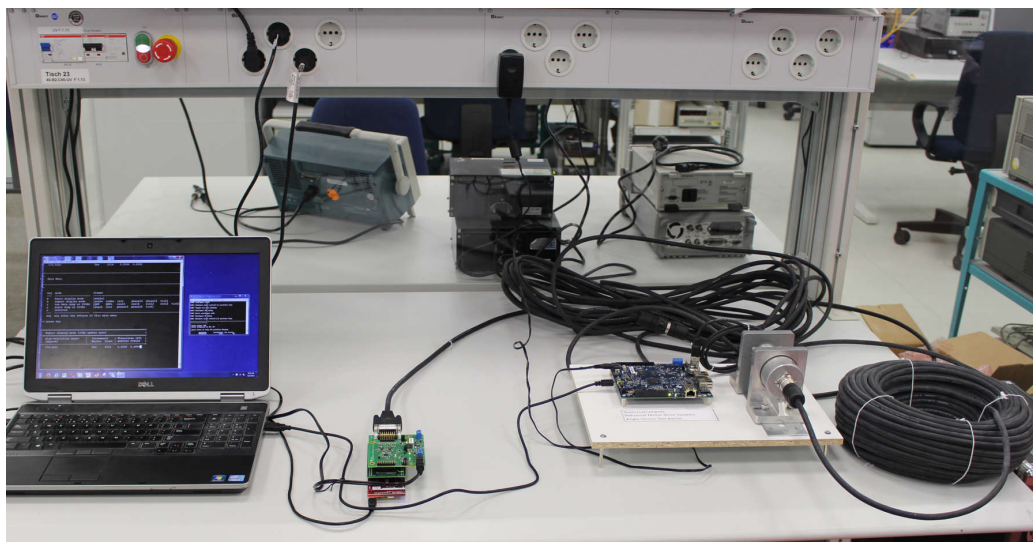


図 7-33. 70m ケーブル (20m + 50m) と ROD480-1024 Sin/Cos エンコーダを使用した TIDA-00176 のテスト設定

図 7-34 および 図 7-35 に、ケーブル長 1m および 70m において、静的な角度に対して、ROD480-1024 (ライン カウント 1024) を経時的に使用した場合の測定角度を示します。シャフトは固定されていませんでした。

1m および 71m 測定の絶対角度は、エンコーダから 1m ケーブルを外し、70m ケーブルを取り付けたときの機械的振動により多少変化したことに注意してください。

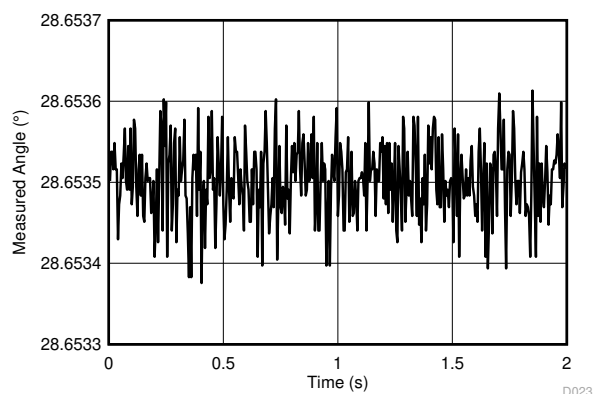


図 7-34. システム テスト、1m ケーブル長で ROD480-1024 を使用して角度分布を測定

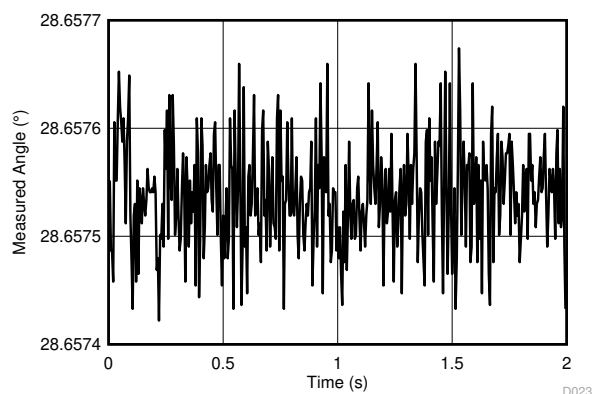


図 7-35. システム テスト、71m ケーブル長で ROD480-1024 を使用して角度分布を測定

ROD480-1024 で測定された角度のノイズ分布は ± 0.0001 度 (0.36 アーク秒) です。ケーブルの減衰が 0Hz で約 -1.5dB であったため、1m と 70m の測定値には大きな差はありません。

Sin/Cos エンコーダを使用して TIDA-00176 設計の基本的な精度と再現性を検証するために、ROD480-1024 Sin/Cos エンコーダと EnDat 2.2 エンコーダ ROQ437 を機械的に結合しています。ROD480-1024 は、70m のケーブルで接続されています。図 7-37 に、テスト設定の図を示します。

図 7-36 に、ROD480-1024 Sin/Cos エンコーダと ROQ437 EnDat 2.2 アブソリュート エンコーダに接続された TIDA-00176 の角度差を示します。ここで、絶対角度は Sitara AM437x EnDat 2.2 マスタを介してを読み取られています。絶対角度はコサイン形状の誤差を示します。これは、2 つのシャフトの非理想的で非中心的なカップリングと小さな振れが原因です。

エンコーダを複数回回転させ、それに応じて角度をキャプチャして再現性も確認しました。

ただし、予想したように、機械的なセットアップは、システム全体の絶対的な精度について結論を出すほど正確で精密なものではありませんでした。したがって、エンコーダのエミュレーションに基づいて [セクション 7.3](#) で実行されるテストの方が、TIDA-00176 リファレンス デザインから予想される性能に近いものです。

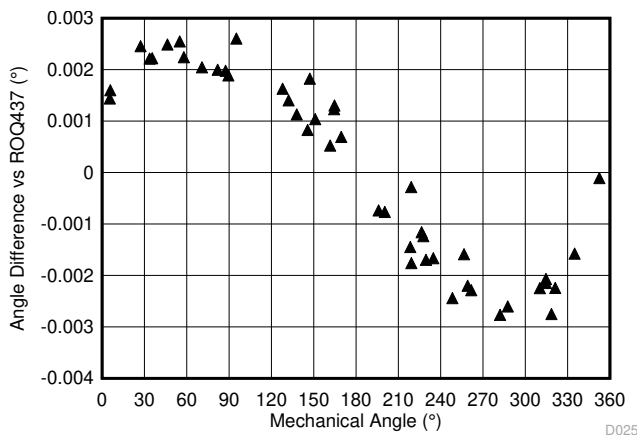


図 7-36. 70m ケーブル長の Sin/Cos エンコーダによる基本的なシステム精度テスト

7.5 EMC テスト結果

TIDA-00176 の TI 設計は、IEC61000-4-2、4-4、4-5 (ESD、EFT、サージ) に対して、規格 IEC 61800-3「EMC 耐性要件および可変速度、電力駆動システムに適用可能な特定のテスト方法」に規定されたテストレベルと性能基準でテストされています。

このリファレンス デザインはこれらの規格に準拠しており、IEC61800-3 EMC

耐性要件に基づく電圧要件を上回っています。概要を以下の表に示し、詳細を以下の各章にまとめます。

多くの場合、性能基準 A はお客様固有であり、期待される精度はシステム要件によって異なります。テスト仕様の詳細については、[セクション 7.5.1](#) を参照してください。

表 7-7. IEC618000-3 EMC 耐性要件 (第 2 の環境)、測定電圧レベル、クラス

適合					TIDA-00176 の測定		
PORT	現象	参照規格	レベル	性能 (合格) 基準	レベル	性能 (達成) 基準 ⁽¹⁾	TEST
筐体ポート	ESD	IEC61000-4-2	CD が不可能な場合は $\pm 4\text{kV}$ CD または 8kV AD	B	$\pm 8\text{kV}$ CD	B	合格 (超過)
制御ラインおよび DC 補助電源 (60V 未満) 用ポート	ファストトランジェントバースト (EFT)	IEC61000-4-4	$\pm 2\text{kV}/5\text{kHz}$ の容量性クランプ	B	$\pm 4\text{kV}$	B	合格 (超過)
	サージ 1、 $2/50\mu\text{s}$ 、 $8/20\mu\text{s}$	IEC61000-4-5	$\pm 1\text{kV}$ シールドケーブルが 20m 超であるため、シールドに直接結合 ($2\Omega/500\text{A}$)	B	$\pm 1\text{kV}$	B	合格

- (1) EMC イベント中の測定角度と初期の機械的な基準位置との差が常に増分角度精度より小さい場合、クラス A が考慮されます。ラインの増分精度は $360/N$ 度です。テストでは、2000 ライン カウントの Sin/Cos エンコーダを使用しました (HEIDENHAIN ROD480)。ここで、増分分解能は 0.18 度になります。

性能 (合格) 基準を以下のように定義します:

表 7-8. 性能基準

性能 (合格) 基準	説明
A	モジュールは意図した動作を継続すること。テスト実施中も機能や性能の損失がないこと。
B	一時的な性能低下は許容される。テスト後、手動による介入なしに、モジュールは意図した動作を継続すること。
C	テスト実施中、機能の損失は許容されるが、ハードウェアやソフトウェアの破損はないこと。テスト後、手動による再起動、電源切断、電源投入のいずれかの後、モジュールは意図した動作を自動的に継続すること。

7.5.1 テスト設定

TIDA-00176 の TI デザインは、ドイツのシュトラスキルヘンにある CSA Group Bayern 社の試験場でテストしました。[図 7-37](#) に、TIDA-00176 デザインの基本的なセットアップの図を示します。

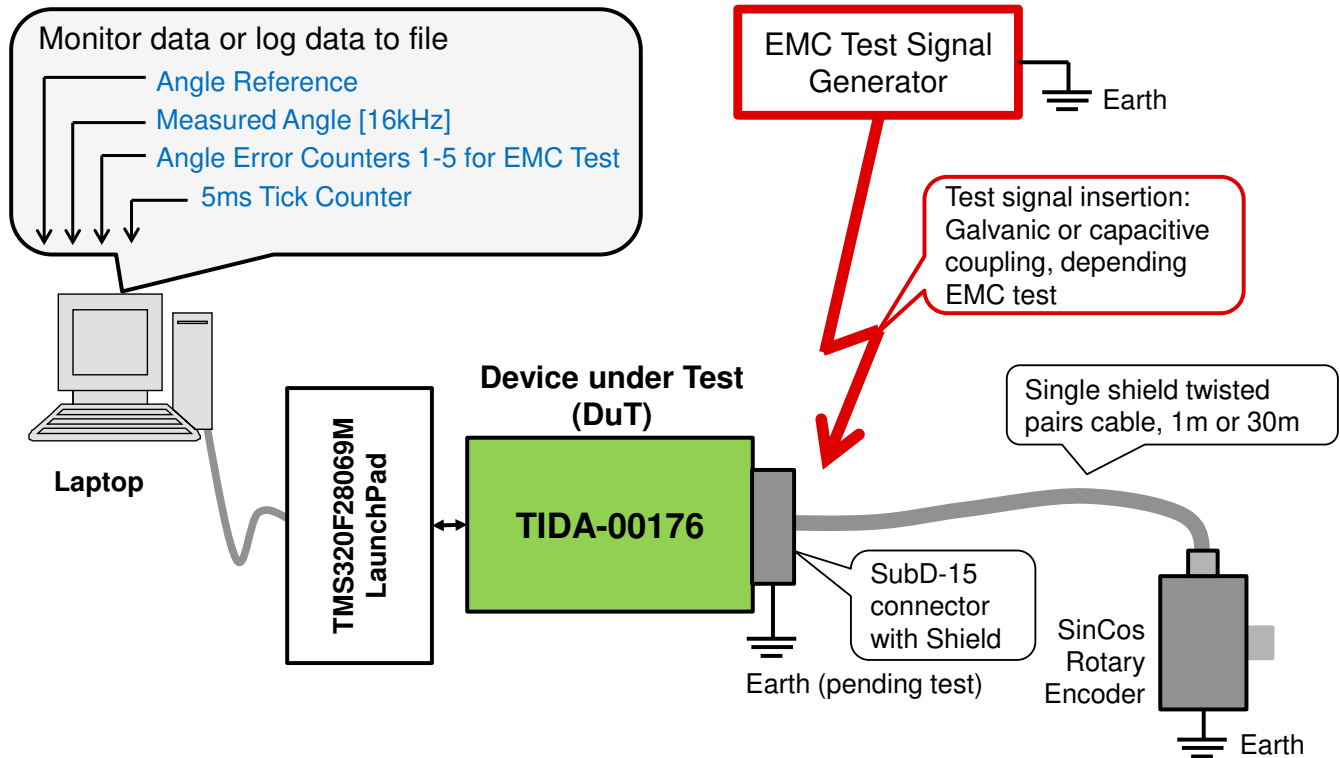


図 7-37. Piccolo F2069M LaunchPad を使用した TIDA-00176 の概略システムブロック図

EMC テスト中およびテスト後に補間した角度信号の整合性を検証するために、Sin/Cos エンコーダの初期角度位置 (停止) を EMC テスト中の基準として使用し、エンコーダを回転させませんでした。

補間角度は 16kHz ごとに測定され、結果を初期の基準角度位置と比較しました。非常に高い分解能とアナログ入力信号により、角度誤差は [表 7-9](#) に示す 6 つの範囲に分割されました。特定の範囲でエラーが発生するたびに、対応するエラーカウンタが 1 ずつ増加しました。

表 7-9. TIDA-00176 高分解能角度誤差範囲の定義

エラー カウンタ	角度誤差範囲 (度)	角度誤差範囲 (ARC SEC)	備考
誤差範囲 1	>1.0		
誤差範囲 2	0.18 ≤ 誤差 < 1.0		
誤差範囲 3	0.1 ≤ 誤差 < 0.18		増分ライン カウント誤差はまだ発生していません
誤差範囲 4	0.01 ≤ 誤差 < 0.1		
誤差範囲 5	0.001 ≤ 誤差 < 0.01	3.6 ≤ 誤差 < 36	
誤差範囲 6	0.0001 ≤ 誤差 < 0.001	< 3.6	考慮対象外

エンコーダのライン カウントに応じて選択された誤差範囲。このテストでは、2000 ライン カウントの Sin/Cos エンコーダを使用しました (HEIDENHAIN ROD480-2000)。ここで、ライン カウントの分解能は 0.18 度になります。

誤差範囲 6 カウンタは、1/1000 (3.6 アーク秒) 未満での差分をカウントしていることに注意してください。これは TI の設計における標準角度測定分布内のため、EMC テストでは考慮されません。

使用したファームウェアは TIDA-00176_SinCosEncoder_Example_Firmware_rev1_0.out であり、この設計で提供されています。このファームウェアは、TMS320F28069M Piccolo マイコン上で動作します。

特定の EMC テスト インターフェイス モードを開始するには、ライン カウントとして「9999」と入力して、Sin/Cos エンコーダとリファレンス角度位置を初期化し、200Hz でデータ ダンプを開始します。EMC テスト メニューは固定ライン カウント 2000 で初期化され、このテスト モードから再び離れることはありません。これは、ラップトップの USB ポート (設計の一部ではない) が EMC に非常に敏感であることが判明したため、固定プログラム フローを確実にするために行われました。

ESD、EFT、サージの各テスト設定の画像を、対応する以下の各章に示します。

7.5.2 IEC-61000-4-2 ESD テスト結果

図 7-38 に、ESD テスト設定を示します。ESD ストライクは、SubD-15 メス型コネクタのシールドに適用されました。シールドもアースに接続され、Sin/Cos エンコーダは 1m のシールド付きツイストペア ケーブルで接続されました。

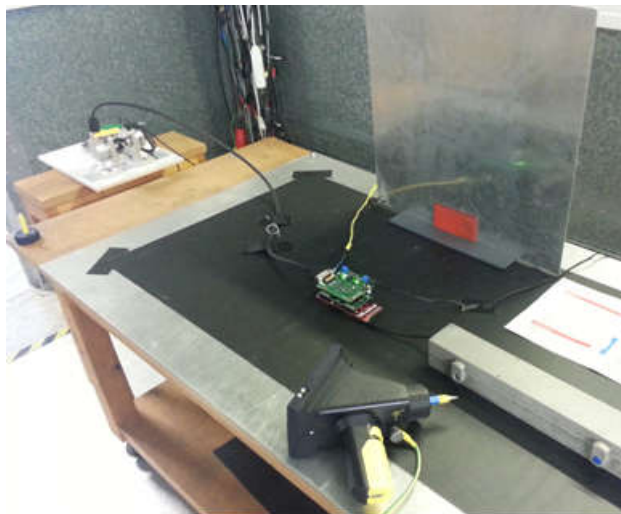


図 7-38. TIDA-00176 の IEC61000-4-2 ESD テスト設定

表 7-10 に、電圧レベルの接触および気中放電に対する ESD テスト結果一式を示します。これらの結果も IEC618000-3 に基づく要件を上回っています。これは備考欄に示しています。

表 7-10. TIDA-00176 の IEC-61000-4-2 ESD テスト結果

現象	参照規格	レベル	TIDA-00176 コネクタ	達成性能基準 ⁽¹⁾	備考
ESD	IEC61000-4-2	接触放電 $\pm 4\text{kV}$	SubD-15	B	
ESD	IEC61000-4-2	接触放電 $\pm 6\text{kV}$	SubD-15	B	IEC61800-3 では不要
ESD	IEC61000-4-2	$\pm 8\text{kV}$ 接触放電	SubD-15	B	IEC61800-3 では不要
ESD	IEC61000-4-2	気中放電 $\pm 8\text{kV}$	SubD-15	B	
ESD	IEC61000-4-2	気中放電 $\pm 15\text{kV}$	SubD-15	B	IEC61800-3 では不要

(1) 少なくとも Class B は達成されました。ESD テスト中に測定された角度は基準角度から 0.1 度を超えて偏差がなかったためです。これは、増分ライン カウントの分解能よりも小さくなっています。表 7-9 に、各範囲内の角度誤差を示します。Class A については、表 7-7、注 1 を参照してください。

表 7-11. テスト全体での IEC-61000-4-2 ESD 角度誤差分布

エラー カウンタ	角度誤差範囲 (度)	4kV CD で発生	6kV CD で発生	8kV CD で発生
誤差範囲 1	>1.0	0	0	0
誤差範囲 2	$0.18 \leq \text{誤差} < 1.0$	0	0	0
誤差範囲 3	$0.1 \leq \text{誤差} < 0.18$	0	0	0
誤差範囲 4	$0.01 \leq \text{誤差} < 0.1$	1	2	3
誤差範囲 5	$0.001 \leq \text{誤差} < 0.01$	0	1	31878

ESD テスト前後の角度差は 0.0005 度を超えず、これは固定角度で正規分布の範囲内でした。たとえば、角度は 6kV CD ESD テスト前で 80.0272 度、ESD テスト後で 80.0274 度であり、固定角度で標準分布の範囲内でした。

7.5.3 IEC-61000-4-4 EFT テスト結果

図 7-39 に、TIDA-00176 の EFT テスト設定の図を示します。EFT テスト中、SubD-15 メス型コネクタは 30m (10m + 20m) ツイストペア シールド ケーブルに、遠端に ROD480 Sin/Cos エンコーダを接続しました。



図 7-39. TIDA-00176 の IEC61000-4-4 EFT テスト設定 (右側は上側、左側は下側)

表 7-12. TIDA-00176 の IEC-61000-4-4 EFT テスト結果

現象	参照規格	レベル	TIDA-00176 コネクタ	達成性能基準 ⁽¹⁾	備考
EFT	IEC61000-4-4	±2kV/5kHz、容量性クランプ	SubD-15	B	
EFT	IEC61000-4-4	±2kV/5kHz、容量性クランプ	SubD-15	B	
EFT	IEC61000-4-4	±4kV/5kHz、容量性クランプ	SubD-15	B	IEC61800-3 では不要
EFT	IEC61000-4-4	±4kV/5kHz、容量性クランプ	SubD-15	B	IEC61800-3 では不要

(1) 少なくとも Class B は達成されました。ESD テスト中に測定された角度は基準角度から 0.045 度を超えて偏差がなかったためです。Class A については、表 7-7、注 1) を参照してください。

表 7-13. テスト全体での IEC-61000-4-4 EFT 角度誤差分布

エラー カウンタ	角度誤差範囲 (度)	2kV EFT で発生	4kV EFT で発生
誤差範囲 1	>1.0	0	0
誤差範囲 2	0.18 ≤ 誤差 < 1.0	0	0
誤差範囲 3	0.1 ≤ 誤差 < 0.18	0	0
誤差範囲 4	0.01 ≤ 誤差 < 0.1	254	1302
誤差範囲 5	0.001 ≤ 誤差 < 0.01	1658	3413

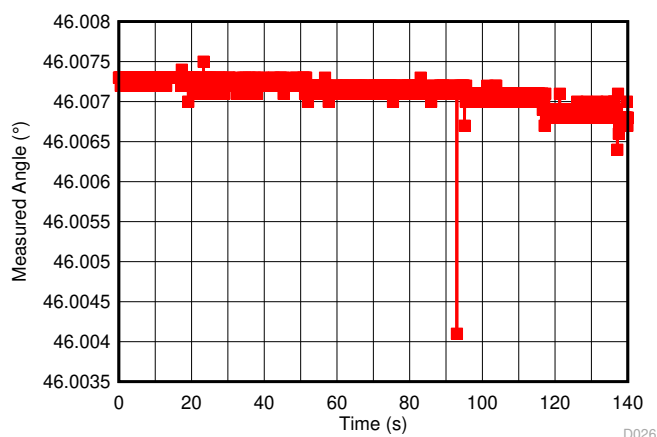


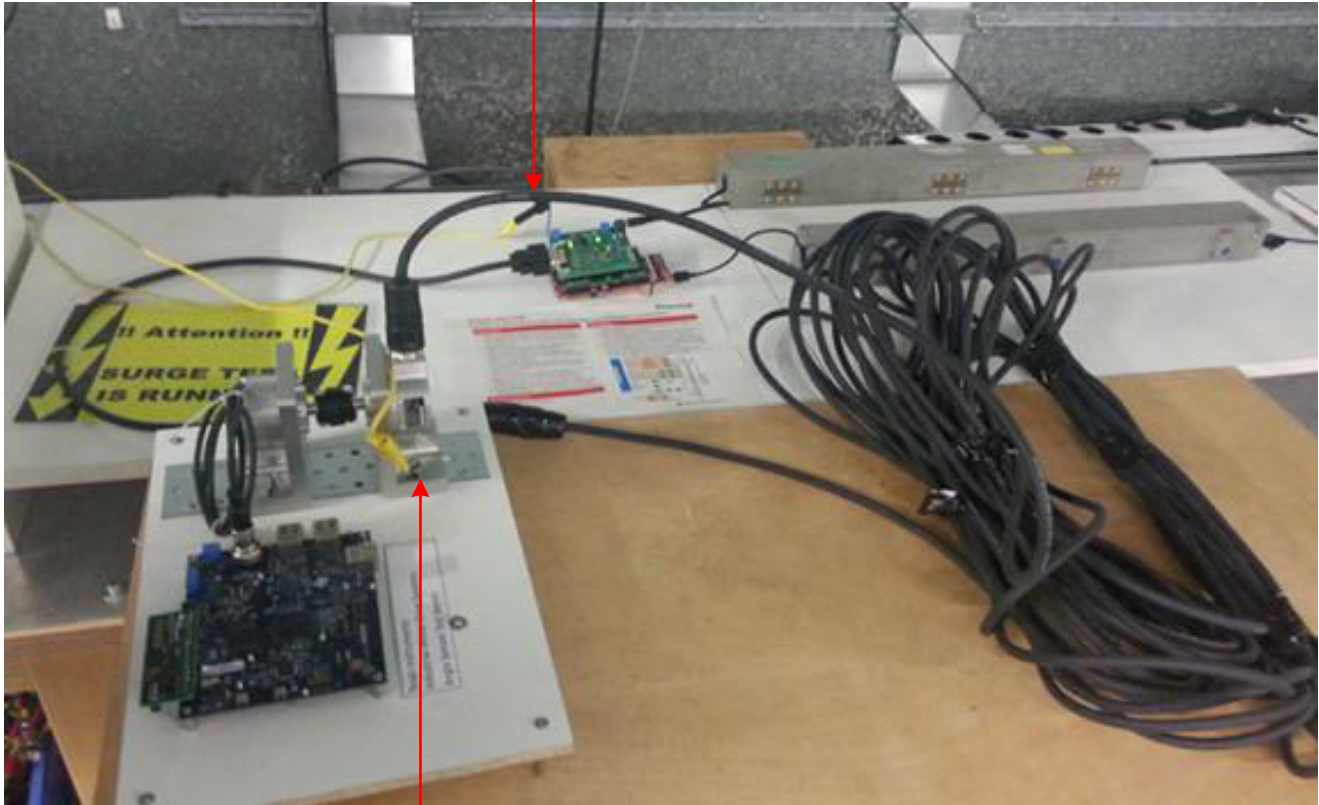
図 7-40. 10Hz 更新レートで ±2kV EFT テスト期間中の測定角度

2kV での EFT テストの実施前、実施中、実施後でも、角度は一定に保たれます。プロットの最大誤差は 0.003 度です。(115,000 baud の UART により) 更新レートはわずか 10Hz であるため、角度が 0.001 度の誤差よりも高く、印刷されなかった可能性があります。エラー カウンタは 16kHz で更新されることに注意してください。

7.5.4 IEC-61000-4-5 サージテスト結果

図 7-41 に、TIDA-00176 のサージテスト設定の写真を示します。EFT テスト中、SubD-15 メス型コネクタは 30m (10m + 20m) ツイストペアシールドケーブルに、遠端に ROD480 Sin/Cos エンコーダを接続しました。

Surge injection at TIDA-00176
SubD-15 Connector/Shield



Surge return path at 30-m far end
of cable (shield)

図 7-41. TIDA-00176 の IEC61000-4-5 サージテスト構成

表 7-14. TIDA-00176 の IEC-61000-4-5 サージテスト結果

現象	参照規格	レベル	TIDA-00176 コネクタ	達成性能基準 ⁽¹⁾	備考
サージ	IEC61000-4-4	$\pm 0.5\text{kV}/2\Omega$ (10m + 20m のシールドケーブル)	SubD-15	B	
サージ	IEC61000-4-4	$\pm 1\text{kV}/2\Omega$ (10m + 20m のシールドケーブル)	SubD-15	B	

(1) 少なくとも Class B は達成されました。ESD テスト中に測定された角度は基準角度から 0.045 度を超えて偏差がなかったためです。Class A については、表 7-7、注 1) を参照してください。

表 7-15. テスト全体での IEC-61000-4-5 サージ角度誤差分布

エラー カウンタ	角度誤差範囲 [度]	0.5kV で発生	1kV で発生
誤差範囲 1	>1.0	0	0
誤差範囲 2	$0.18 \leq \text{誤差} < 1.0$	0	0
誤差範囲 3	$0.1 \leq \text{誤差} < 0.18$	1	5
誤差範囲 4	$0.01 \leq \text{誤差} < 0.1$	1	4

表 7-15. テスト全体での IEC-61000-4-5 サージ角度誤差分布 (続き)

エラー カウンタ	角度誤差範囲 [度]	0.5kV で発生	1kV で発生
誤差範囲 5	$0.001 \leq \text{誤差} < 0.01$	204	5669

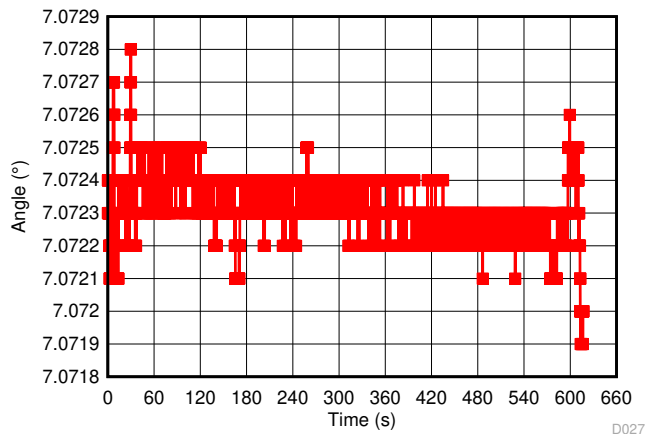


図 7-42. 10Hz 更新レートで ±1kV サージ テスト期間中の測定角度

1kV でのサージテスト前後において、角度は一定に保たれます。プロットの最大誤差はわずか 0.0009 度でした。更新レートはわずか 10Hz なので、図 7-8 に示す高誤差がある場合の角度は、UART を通して印刷されません。

3 本のケーブル間の機械的な M23 コネクタは、ネジがないためにシールドを機械的に、堅牢に、連続的に接続することができませんでした。銅を使用して適切な電氣的接続を行い、測定されたサージ電流を通して CSA グループのオペレータが検証します。適切な機械的コネクタを持つケーブルを使用して ±2kV のテストを実施した後、設計ガイドをそれに応じて更新します。

8 デザイン ファイル

8.1 回路図

回路図をダウンロードするには、[TIDA-00176](#) のデザイン ファイルを参照してください。

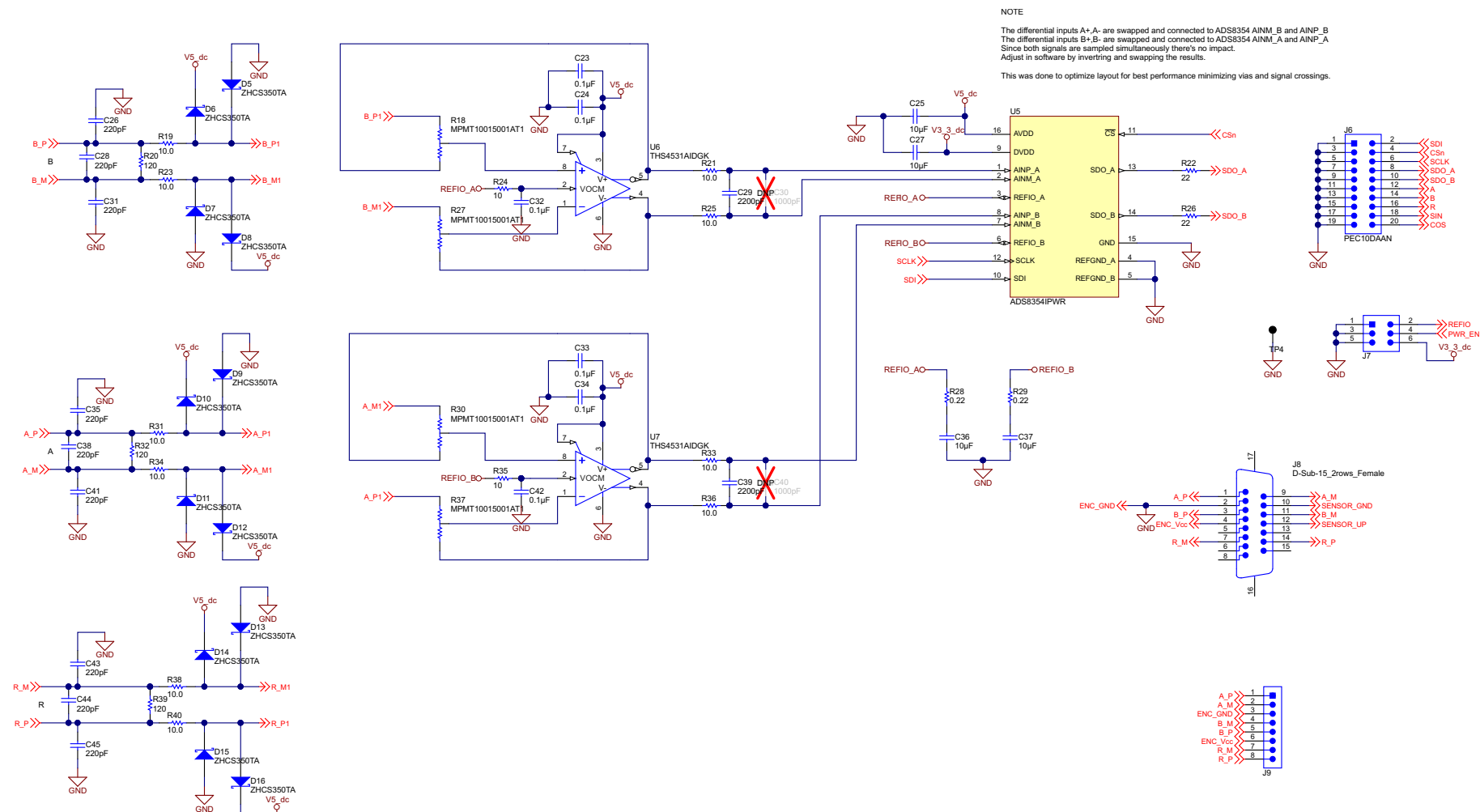


図 8-1. 16 ビット ADC を使用した高分解能アナログ パスの回路図

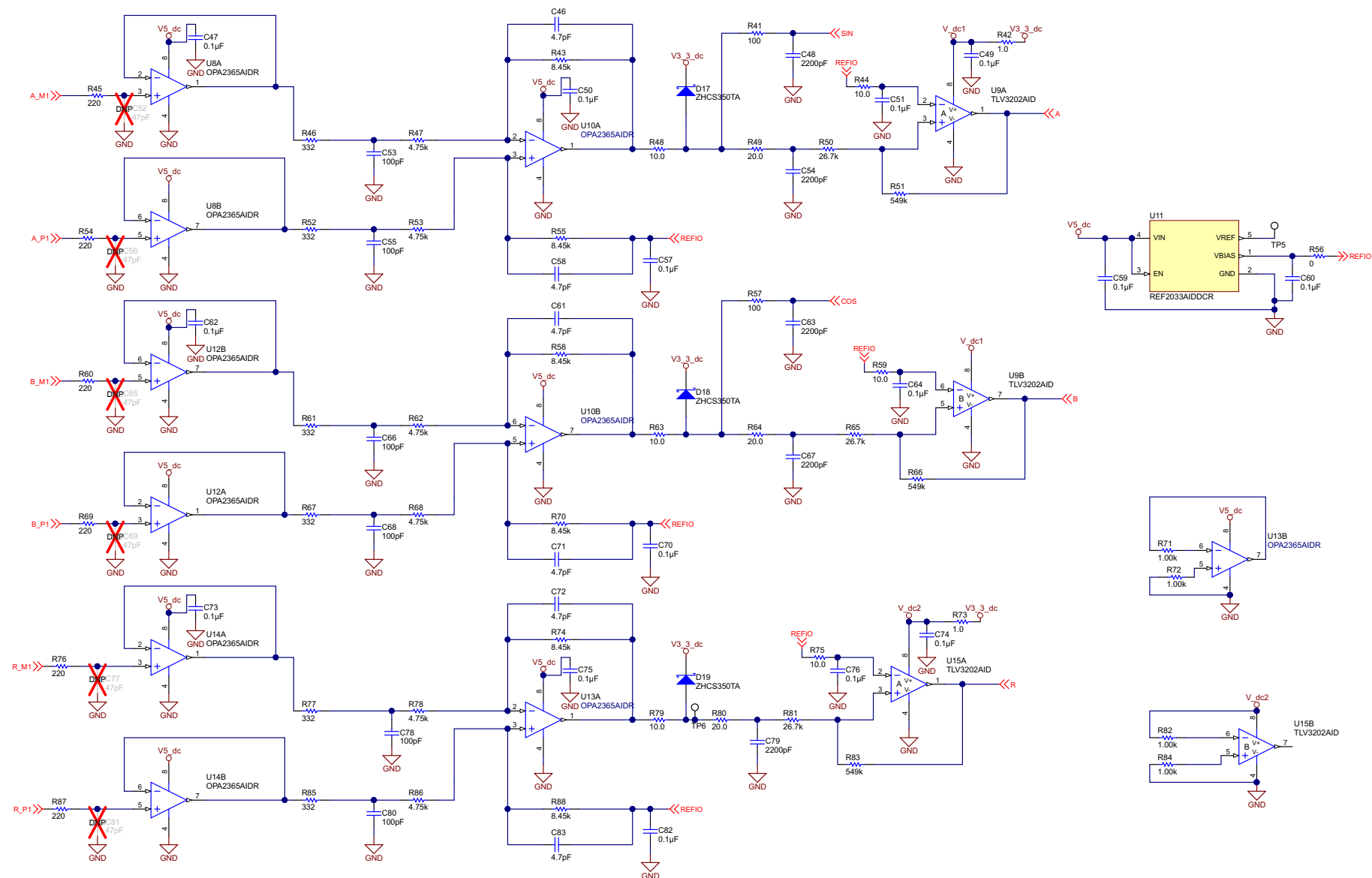


図 8-2. 差動からシングルエンドへのアナログ パスとコンパレータの回路図

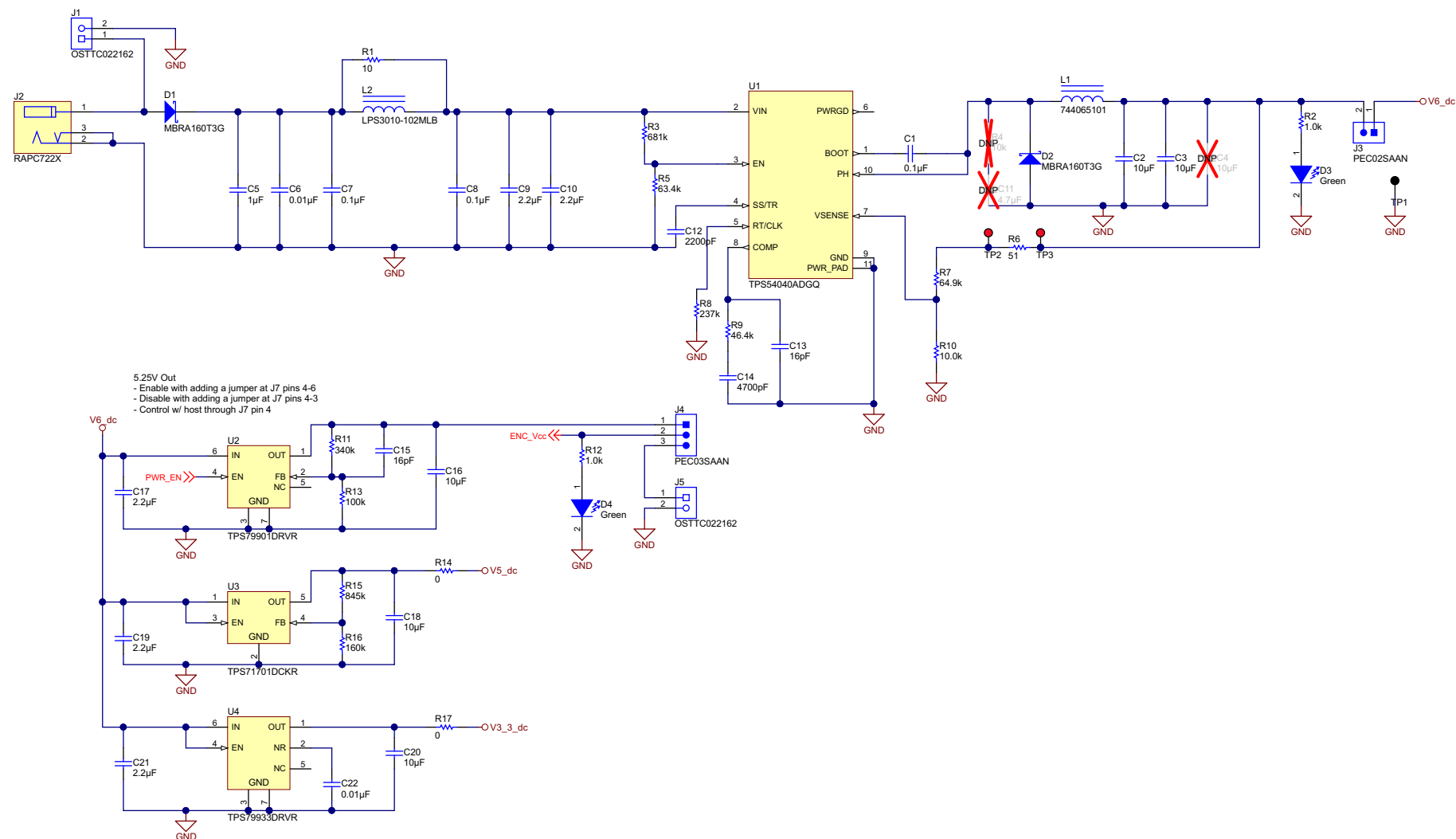


図 8-3. パワー マネージメントの回路図

8.2 部品表 (BOM)

部品表 (BOM) をダウンロードするには、[TIDA-00176](#) のデザイン ファイルを参照してください。

8.3 PCB のレイアウト ガイドライン

この設計で使用されている各 TI 部品に関するデバイス固有のレイアウトのガイドラインは、対応するデータシートに記載されています。

以下の図に、TIDA-00176 設計に対して固有のレイアウトのガイドラインを示します。

アナログ シグナル コンディショニング部品の感度により、4 層 PCB で少なくとも 1 つの完全なグラウンド プレーンを設計することを強く推奨します。これにより、システムのノイズ耐性が向上します。

また、2 つのサイン / コサイン信号を配線する際 (クロストークの問題 / 干渉を回避するため) には特に注意が必要です。また、パワー マネージメント セクション (特にスイッチャ TPS54040A) を適切に配線し、基板の敏感な部分から分離し、後者がスイッチャからノイズを捕捉しないようにする必要があります。

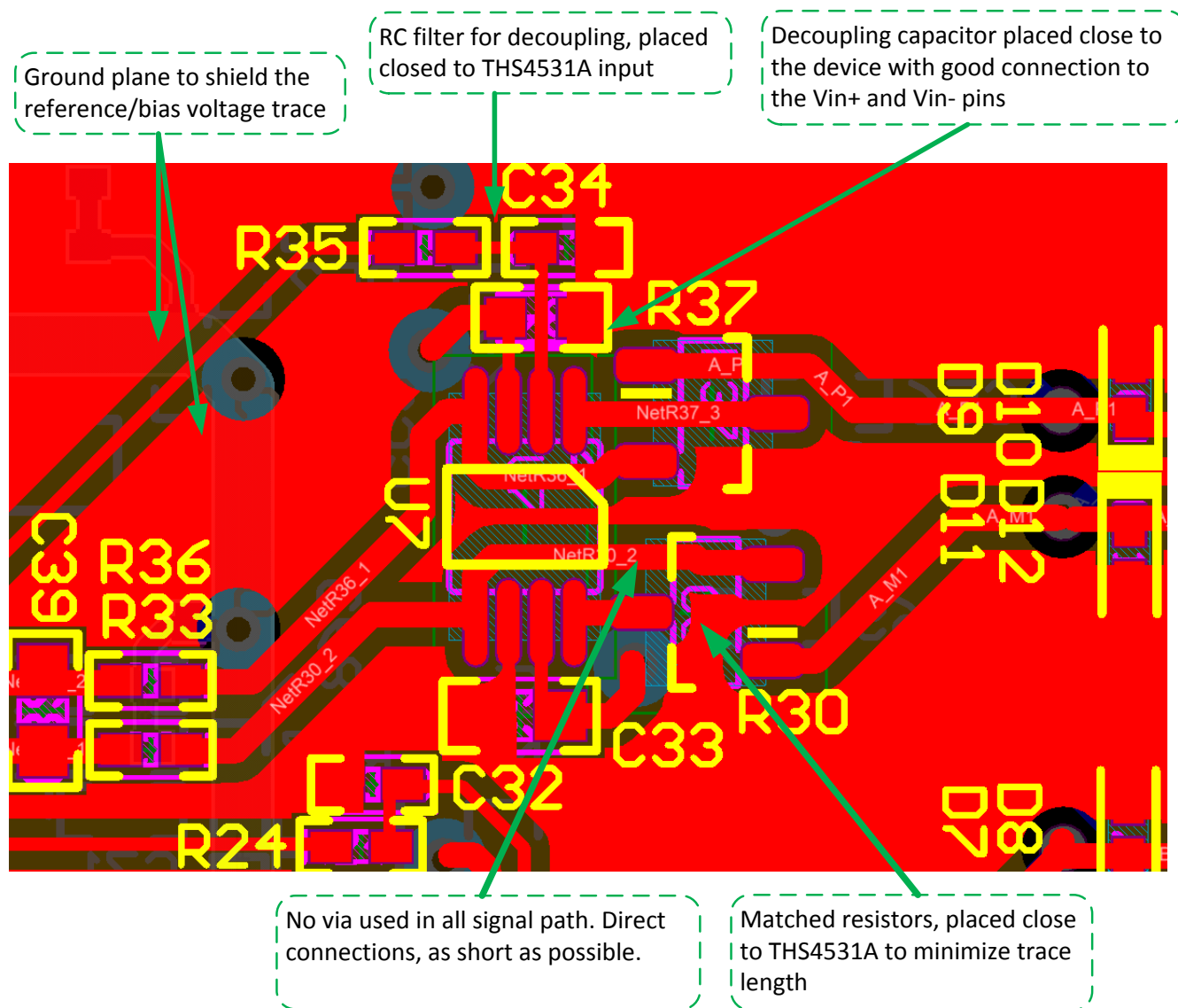


図 8-4. THS4531A のレイアウト

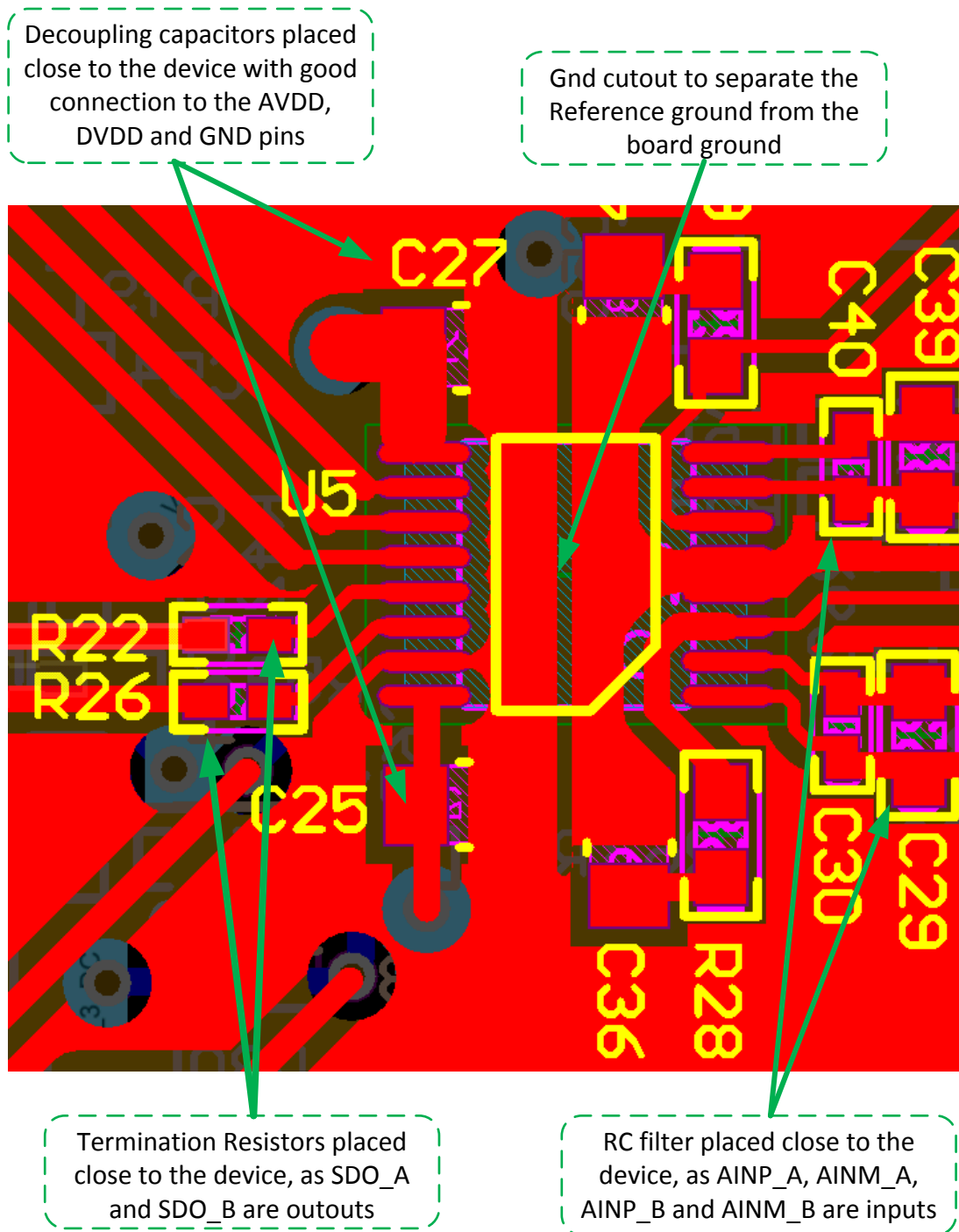


図 8-5. ADS8354、16 ビット ADC のレイアウト

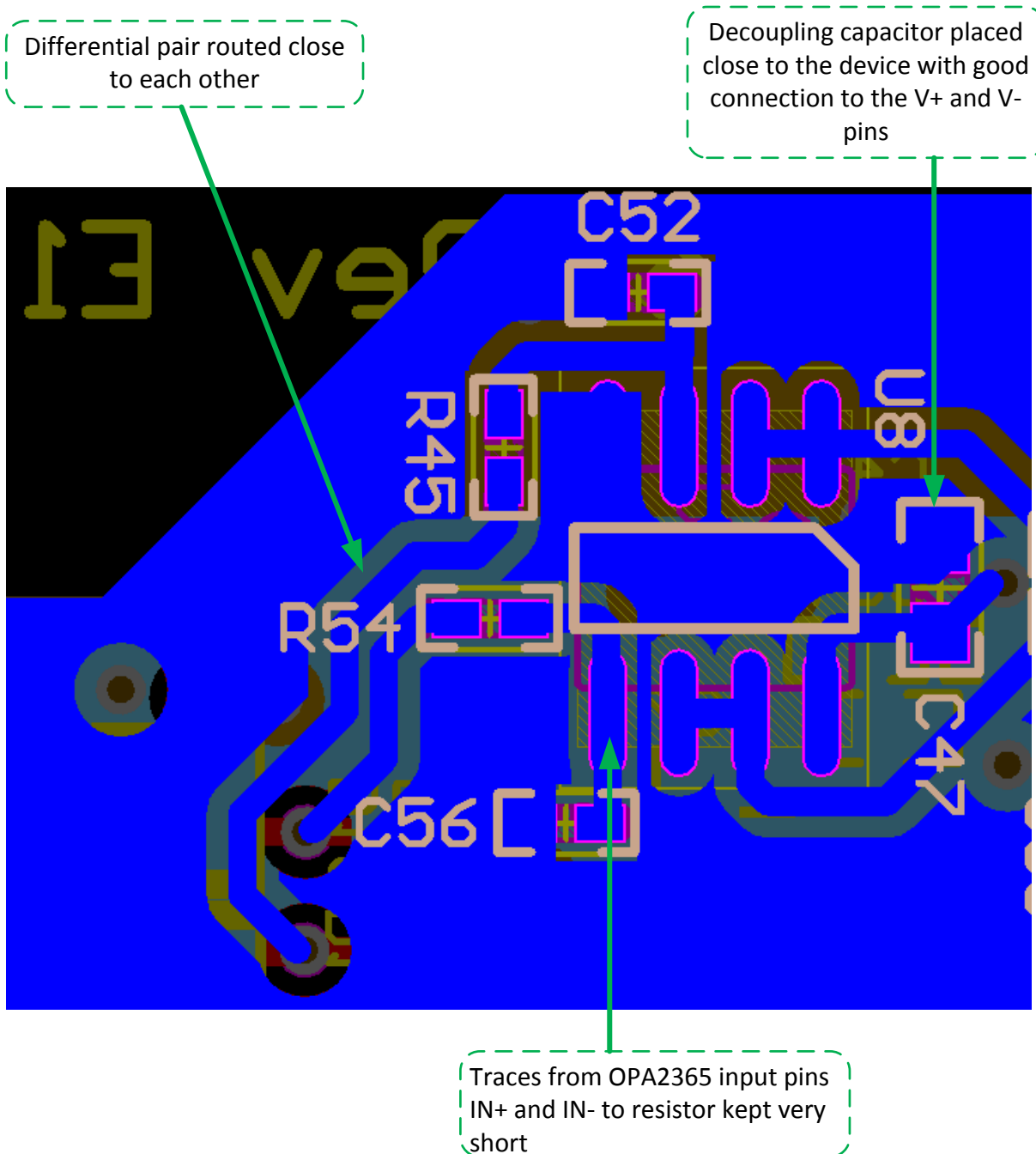


図 8-6. OPA2365 入力バッファのレイアウトのヒント

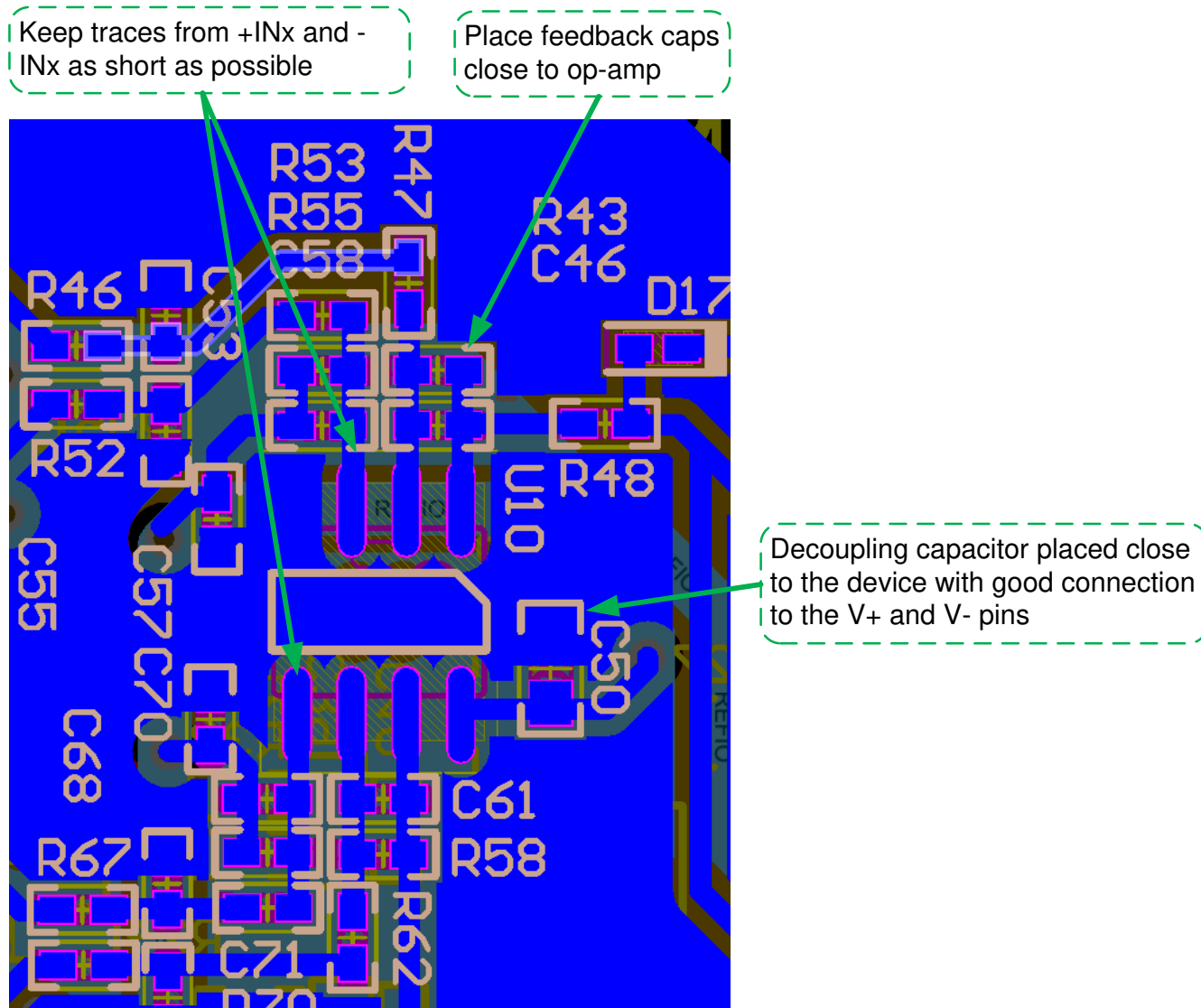


図 8-7. OPA2365 差動からシングルエンドへのアンプのレイアウトのヒント

Decoupling capacitor placed close to the device with good connection to the VCC and GND pins

Keep signal trace from output to input via R51 as short as possible.

Decoupling R44, C51 close to non-inverting input of TLV3202.

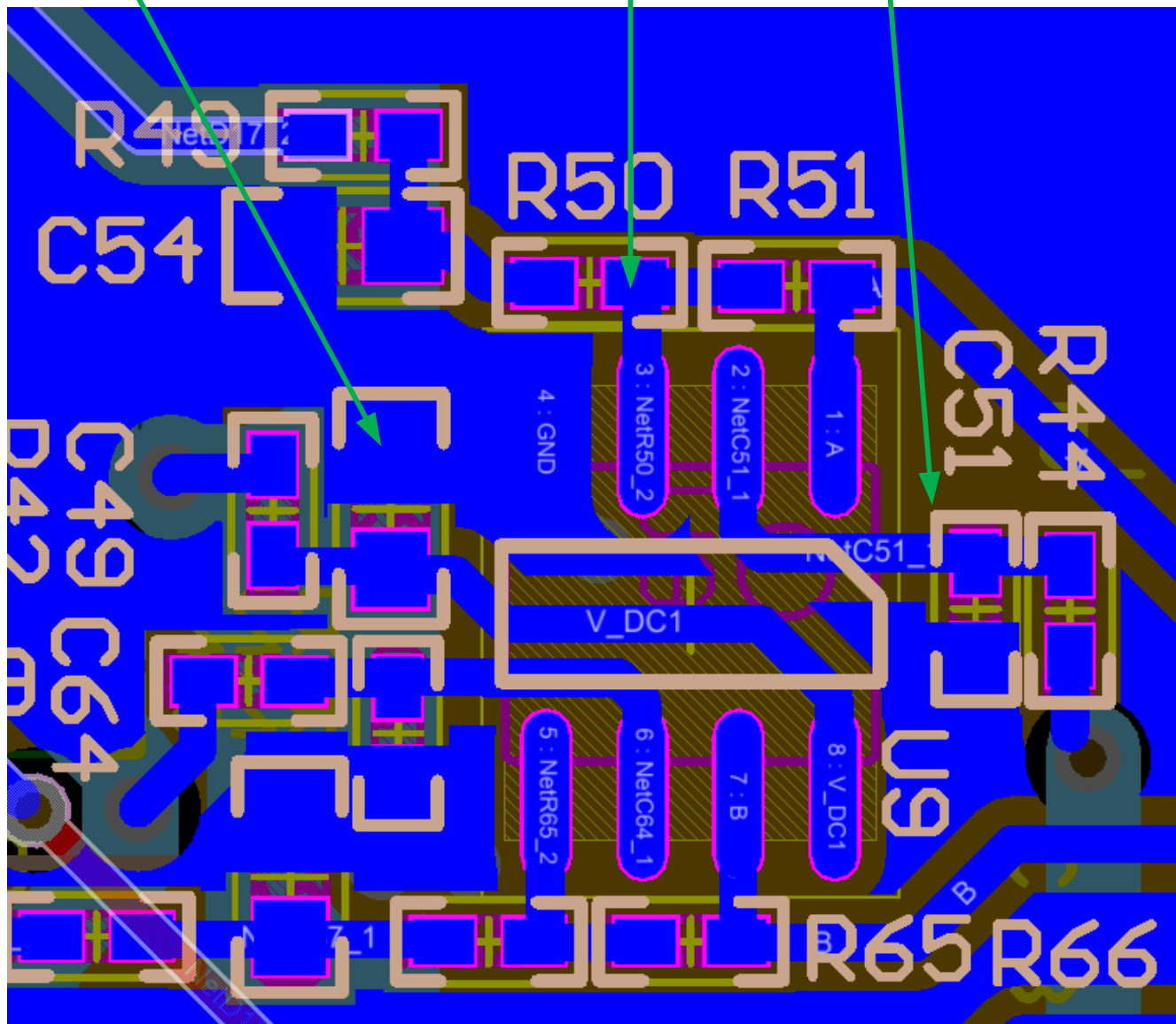


図 8-8. TLV3202 のレイアウト

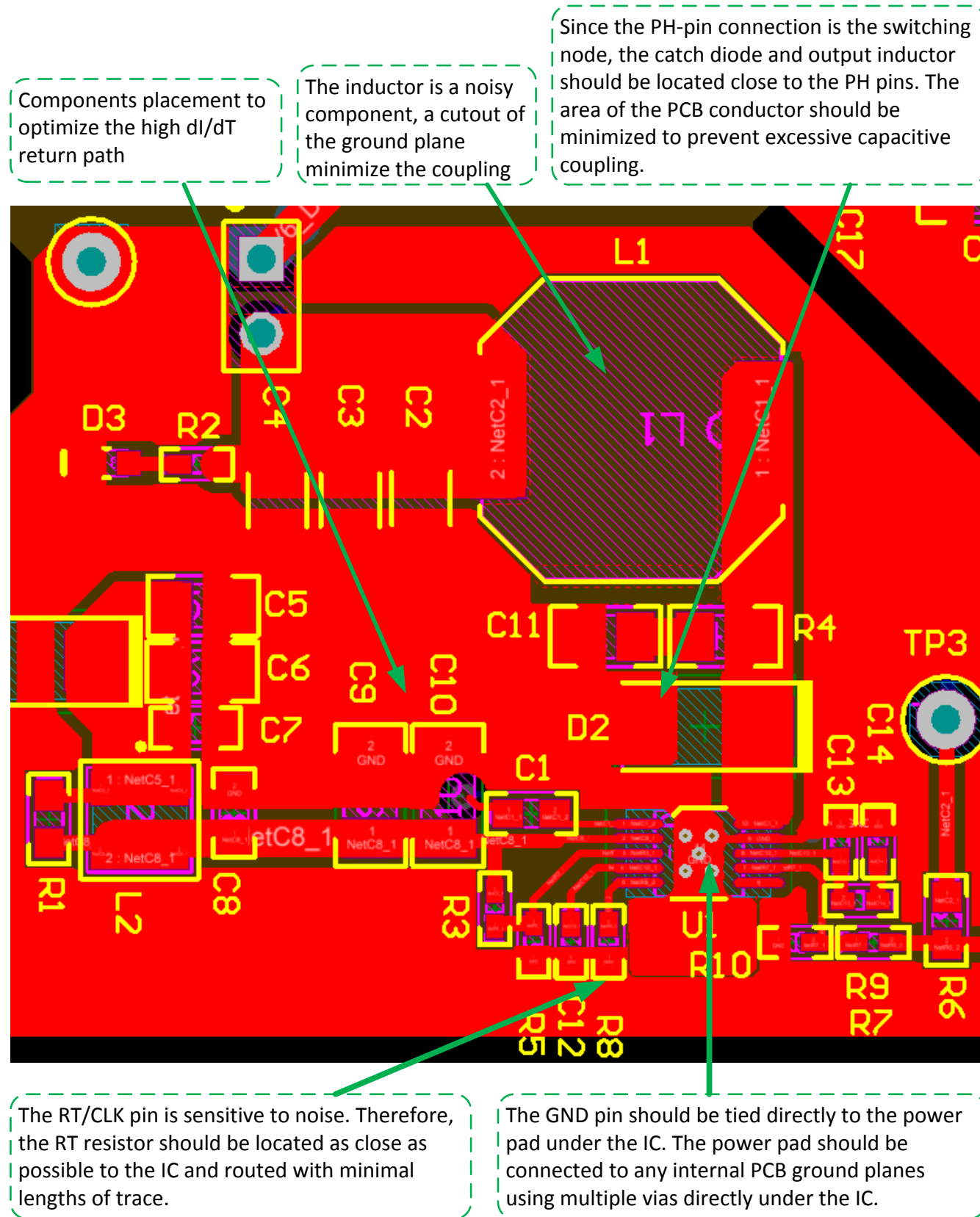


図 8-9. TPS54040A のレイアウト

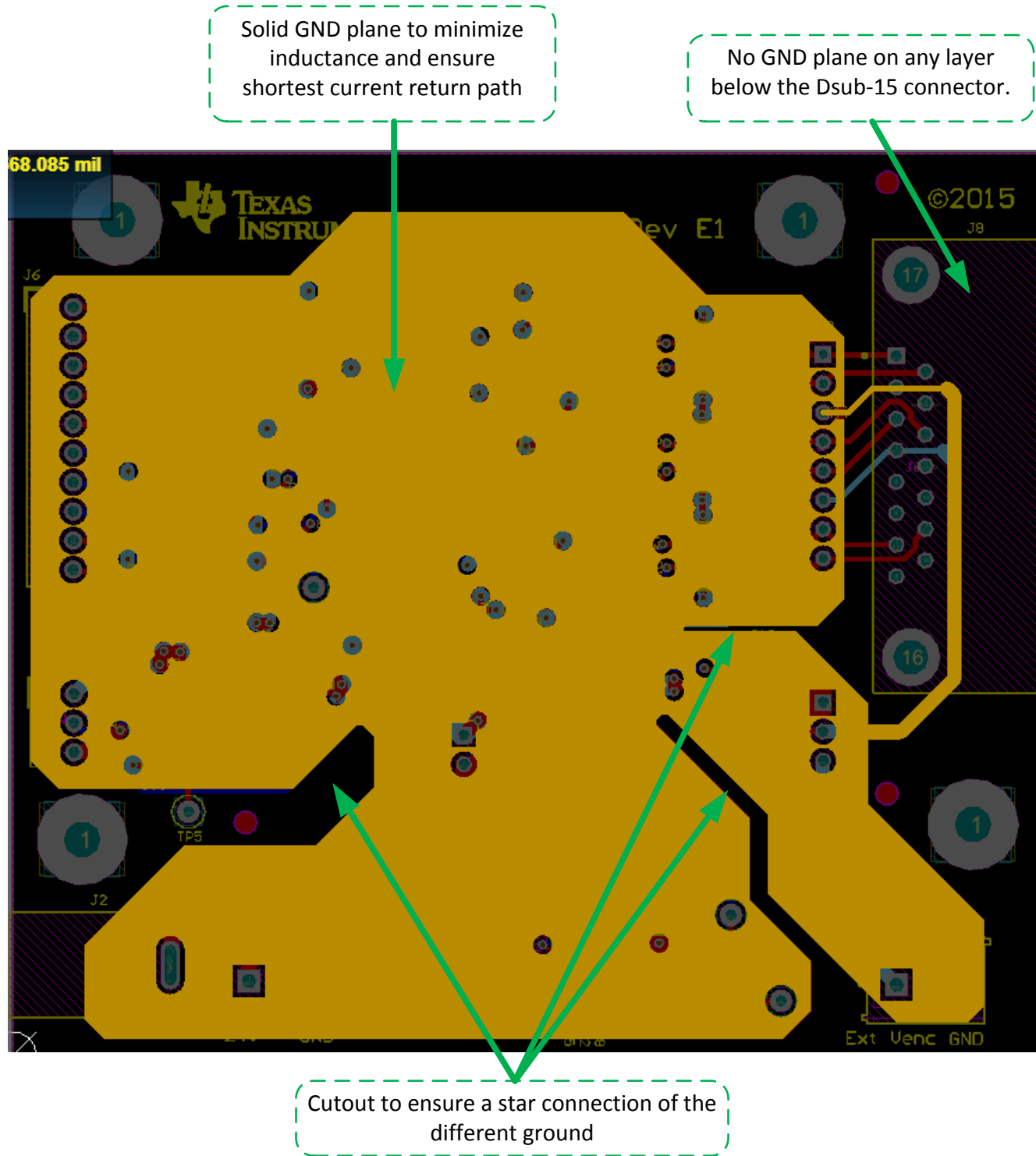


図 8-10. GND 層

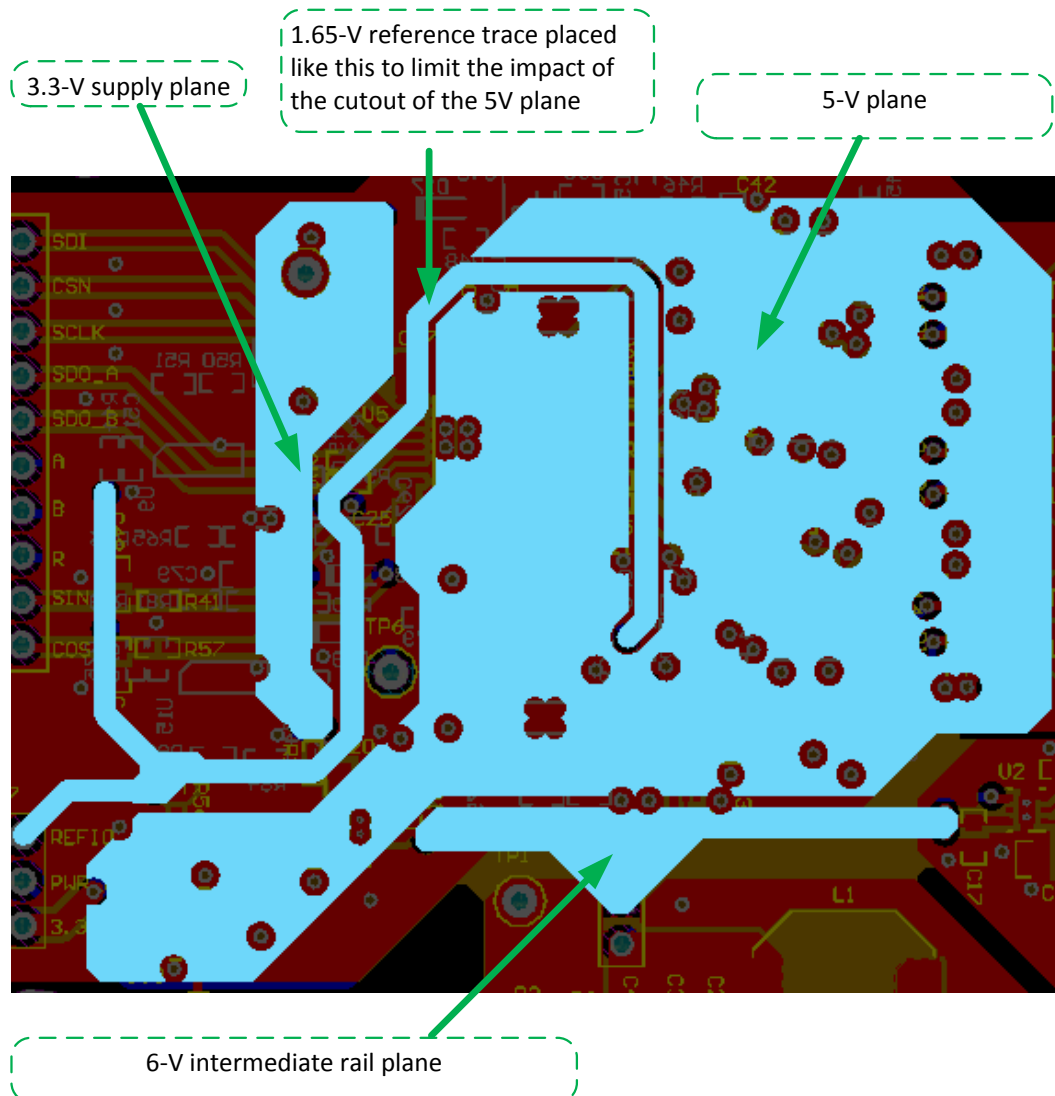


図 8-11. 電源層

8.3.1 PCB レイヤ プロット

レイヤ プロットをダウンロードするには、[TIDA-00176](#) のデザイン ファイルを参照してください。

8.4 Altium プロジェクト

Altium プロジェクト ファイルをダウンロードするには、[TIDA-00176](#) のデザイン ファイルを参照してください。

8.5 ガーバー ファイル

ガーバー ファイルをダウンロードするには、[TIDA-00176](#) のデザイン ファイルを参照してください。

8.6 ソフトウェア ファイル

ソフトウェア ファイルをダウンロードするには、[TIDA-00176](#) のデザイン ファイルを参照してください。

9 参考資料

注

『[設計リソース](#)』の技術資料も参照してください。

1. テキサス インスツルメンツ、『出力電圧がプログラマブルで位置エンコーダ インターフェイス用の保護機能を内蔵した電源』、TIDA-00180 設計ガイド ([TIDU533](#))
2. テキサス インスツルメンツ、『歪みとノイズが最低になるよう最適化された 18 ビット、1MSPS データ収集ブロック (DAQ)』、TI Precision Designs ([SLAU515](#))
3. テキサス インスツルメンツ、『TPS799 200mA、低静止電流、超低ノイズ、高 PSRR 低ドロップアウト リニアレギュレータ』、TPS799 データシート ([SBVS056](#))
4. テキサス インスツルメンツ、『TPS717xx 低ノイズ、高帯域 PSRR、低ドロップアウト、150mA リニアレギュレータ』、TPS717 データシート ([SBVS068](#))
5. テキサス インスツルメンツ、『AN-2162 DC/DC コンバータから伝導される EMI に対する簡単な対処方法』、アプリケーション レポート ([SNVA489](#))
6. テキサス インスツルメンツ、『TMS320F240 DSP - Sin/Cos エンコーダを使用する高分解能位置に対するソリューション』、アプリケーション レポート、([SPRA496](#))
7. IEC 61800-3 ed2.0 (2004-08)、『可変速電力駆動システム – 第 3 部:EMC 要件と特定のテスト手法』、[IEC 61800-3 ed2.0 (2004-08)]。
8. IEC 61800-3-am1 ed2.0 (2011-11)、『改訂 1 - 可変速電力駆動システム – 第 3 部:EMC 要件と特定のテスト手法』、[IEC 61800-3-am1 ed2.0 (2011-11)]。
9. 『ハイデンハインエンコーダのインターフェース』、2015 年 3 月、パンフレット #1078628-21、www.heidenhain.com
10. 『ロータリエンコーダ』、2014 年 11 月、パンフレット #349529-2E、www.heidenhain.com

10 著者について

VINCENZO PIZZOLANTE は、テキサス インスツルメンツの産業システム - モータードライブ チームのシステム エンジニアであり、産業用ドライブ向けリファレンス デザインの開発を担当しています。

MARTIN STAEBLER は、テキサス インスツルメンツの産業システム モータードライブ チームのシステム エンジニアであり、産業用ドライブ向けリファレンス デザインの開発を担当しています。

KEVIN STAUDER は、テキサス インスツルメンツの産業システム モータードライブ チームのシステム エンジニアであり、産業用ドライブ向けリファレンス デザインの開発を担当しています。

謝辞

著者らは、TIDA-00176 をベースにした **Piccolo MCU** を用いた **Sin/Cos** エンコーダへのインターフェイスに関する学士論文をテキサス インスツルメンツで実施し、多大な貢献をされた **Ferdinand von Molo** 氏に特別な謝意を表したいと思います。

11 改訂履歴

Changes from Revision A (July 2015) to Revision B (March 2025)	Page
--	------

- | | |
|--------------------------------------|---|
| • ドキュメント全体にわたって表、図、相互参照の採番方法を更新..... | 1 |
|--------------------------------------|---|
-

Changes from Revision * (June 2015) to Revision A (July 2015)	Page
---	------

- | | |
|----------------------|---|
| • プレビュー ページから変更..... | 1 |
|----------------------|---|
-

重要なお知らせと免責事項

テキサス・インスツルメンツは、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、テキサス・インスツルメンツ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 テキサス・インスツルメンツ製品の選定、(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 テキサス・インスツルメンツ製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、テキサス・インスツルメンツ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。テキサス・インスツルメンツ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、テキサス・インスツルメンツおよびその代理人を完全に補償するものとし、テキサス・インスツルメンツは一切の責任を拒否します。

テキサス・インスツルメンツの製品は、[テキサス・インスツルメンツの販売条件](#)、または [ti.com](https://www.ti.com) やかかる テキサス・インスツルメンツ製品の関連資料などのいずれかを通じて提供する適用可能な条項の下で提供されています。テキサス・インスツルメンツがこれらのリソースを提供することは、適用されるテキサス・インスツルメンツ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。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案した場合でも、テキサス・インスツルメンツはそれらに異議を唱え、拒否します。

郵送先住所: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated

重要なお知らせと免責事項

テキサス・インスツルメンツは、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、テキサス・インスツルメンツ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 テキサス・インスツルメンツ製品の選定、(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 テキサス・インスツルメンツ製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、テキサス・インスツルメンツ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。テキサス・インスツルメンツ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、テキサス・インスツルメンツおよびその代理人を完全に補償するものとし、テキサス・インスツルメンツは一切の責任を拒否します。

テキサス・インスツルメンツの製品は、[テキサス・インスツルメンツの販売条件](#)、または [ti.com](https://www.ti.com) やかかる テキサス・インスツルメンツ製品の関連資料などのいずれかを通じて提供する適用可能な条項の下で提供されています。テキサス・インスツルメンツがこれらのリソースを提供することは、適用される テキサス・インスツルメンツ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。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案した場合でも、テキサス・インスツルメンツはそれらに異議を唱え、拒否します。

郵送先住所：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated