

# 高精度のリゾルバ／デジタル・コンバータによる角度位置と速度の計測

著者：Jakub Szymczak、Shane O’Meara、Johnny S. Gealon、Christopher Nelson De La Rama

## はじめに

リゾルバは、正確な角度位置を測定できる電子機械式センサーです。一次巻線と2つの二次巻線との間の磁気結合の量が回転子（ローター）の位置に応じて変化する可変結合トランスとして動作します。ローターは一般にモーター・シャフトに取り付けます。リゾルバは産業用モーター制御、サーボ、ロボティクス、ハイブリッド／電気自動車の電動機構ユニットなど正確なシャフトの回転を必要とする多くのアプリケーションで使用されており、長時間にわたり厳しい条件で動作できるため過酷な環境下で使用する軍用システムに最適です。

標準的なリゾルバは、ローター側に1つの一次巻線、ステータ（固定子）側に2つの二次巻線があります。可変リラクタンス型リゾルバにはローター側の巻線がありません。一次と二次の巻線はすべてステータ側にありますが、ローターの突極（露出した磁極）によって、角度位置による二次巻線のサイン波の変動を結合します。図1に従来型のリゾルバと可変リラクタンス型リゾルバを示します。

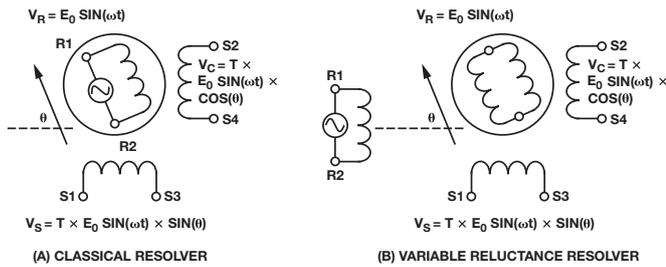


図1. 従来型のリゾルバ対可変リラクタンス型リゾルバ

表1. リゾルバの主要パラメータ

電気的パラメータ	代表的なレンジ	単位	説明
入力電圧	3～7	V rms	リゾルバの一次巻線R1-R2に印加する推奨の励起信号振幅
入力周波数	50～20,000	Hz	リゾルバの一次巻線R1-R2に印加する推奨の励起信号周波数
変圧比	0.2～1.0	V/V	一次巻線と二次巻線における信号の振幅の比
入力インピーダンス	100～500	Ω	リゾルバの入力インピーダンス
位相シフト	±25	度	一次巻線（R1-R2）に印加される励起信号と二次巻線（S3-S1、S2-S4）に印加されるサイン／コサイン信号との間の位相シフト
ポール・ペア	1～3		機械的な1回転当たりの電気的な回転の回数

一次巻線R1-R2が式1のサイン波で励起されると、信号が二次巻線に誘導されます。二次巻線との結合の量は、ステータの位置を基準としたローターの位置と、リゾルバの変圧比である減衰係数によって決まります。二次巻線は機械的に90°ずれているため、2つのサイン出力信号は互いに90°位相シフトします。リゾルバの入力電圧と出力電圧の関係を式2と式3に示します。式2はサイン信号、式3はコサイン信号を表しています。

$$R1 - R2 = E_0 \sin \omega t \quad (1)$$

$$S3 - S1 = T \times E_0 \sin \omega t \times \sin \theta \quad (2)$$

$$S2 - S4 = T \times E_0 \sin \omega t \times \cos \theta \quad (3)$$

ここで、 $\theta$ はシャフト角度、 $\omega$ は励起信号周波数、 $E_0$ は励起信号振幅、 $T$ はリゾルバの変圧比です。

2つの出力信号はシャフト角度のサインとコサインによって変調されます。励起信号とサイン／コサイン出力信号を図2に示します。サイン信号は90°と270°で振幅が最大となり、コサイン信号は0°と180°で振幅が最大となります。

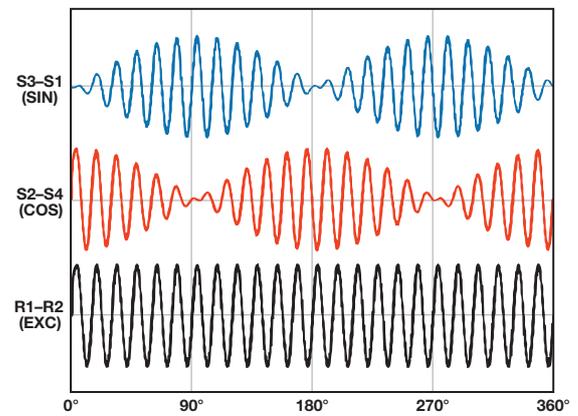


図2. リゾルバの電気信号

リゾルバ・センサーには、設計段階で考慮しなければならない特有のパラメータがあります。最も重要な電気的パラメータと代表的な仕様を表1にまとめました。

## リゾルバ/デジタル・コンバータ

一次巻線はサイン波のリファレンス信号で励起され、2つの差動出力信号（サイン、コサイン）は二次巻線に電磁的に誘導されます。リゾルバとシステム・マイクロプロセッサに接続するリゾルバ/デジタル・コンバータ（RDC）は、これらのサイン/コサイン信号を使ってモーター・シャフトの角度位置と回転速度をデコードします。

大部分のRDCは、タイプIIトラッキング・ループを用いて位置と速度を計算します。タイプIIループは、静止/等速の入力信号の定常誤差がゼロとなるように二次フィルタを使用します。RDCは、2つの入力信号を同時にサンプリングしてトラッキング・ループにデジタル・データを提供します。このタイプのループを使用する最新のRDCとしては、アナログ・デバイス（ADI）の全機能搭載10～16ビット・トラッキング・コンバータAD2S1210があります。内蔵プログラマブル・サイン波発振器が一次巻線に励起信号を提供します。

表1に示すように、代表的なリゾルバでは一次巻線を駆動するための低インピーダンスの3～7Vrms信号が必要です。5V電源で動作するRDCは、一般に励起出力として7.2Vp-pの差動信号を供給します。この信号には、リゾルバの入力仕様を満たす振幅も駆動能力もありません。また、リゾルバは信号を最大5倍まで減衰するため、リゾルバの出力振幅はRDCの入力振幅条件を満たすことができません（表2）。

この問題を解決するには、差動アンプを使って一次巻線へのサイン波信号を増幅する必要があります。アンプは、100Ωの低負荷を駆動しなければなりません。一般的な方法としては、S/N比を高めるために大きな信号で一次巻線を駆動し、その後に出力のサイン/コサイン信号を抵抗分割器で減衰します。

多くの産業用/自動車アプリケーションでは、サイン/コサイン信号線に高周波ノイズが入りやすい多ノイズ環境でRDCを利用します。これに対処するには、単純な差動ローパス・フィルタをできる限りRDCの近くに配置してください。図3に、アンプとフィルタを備えた代表的なリゾルバ/デジタル・コンバータ・インターフェースを示します。

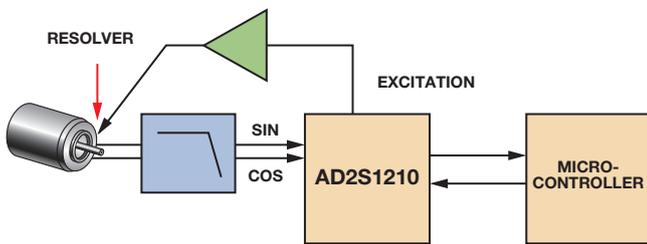


図3. 代表的なリゾルバ・システムのブロック図

表2. AD2S1210の主要なRDCパラメータ/値

パラメータ	代表値	単位	説明
入力電圧	2.3～4.0	V p-p	サイン/コサイン入力の差動信号範囲
位相ロック範囲	±44	度	RDCで生成される励起信号とサイン/コサイン入力間の位相シフト
角度精度	±2.5	arc min	RDCの角度精度
分解能	10、12、14、16	ビット	RDC分解能
速度精度	2	LSB	RDCが提供する速度精度
トラッキング・レート	3125、1250、625、156	rps	特定分解能でのトラッキング能力
セtring時間	2.2、6、14.7、66	ms	特定分解能での179°ステップ変化に対するコンバータ応答時間

## 動作原理

図4にRDCの動作ブロック図を示します。コンバータは、出力角φを生成してシャフト角θを持続的に追跡します。フィードバックされた出力角を入力角と比較します。2つの角度間で生じる誤差は、コンバータが位置を追跡することで最小になります。

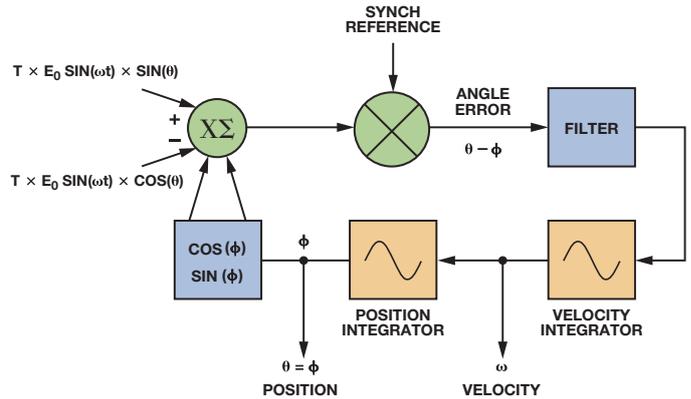


図4. AD2S1210の動作ブロック図

誤差を測定する場合は、サイン入力とコサイン入力にそれぞれcos(φ)とsin(φ)をかけます。

$$E_0 \sin \omega t \times \sin \theta \cos \phi \text{ (for } S3 - S1) \quad (4)$$

$$E_0 \sin \omega t \times \cos \theta \sin \phi \text{ (for } S2 - S4) \quad (5)$$

次に、その2つの差をとります。

$$E_0 \sin \omega t \times (\sin \theta \cos \phi - \cos \theta \sin \phi) \quad (6)$$

さらに、内部で生成された合成リファレンスを使って信号を復調します。

$$E_0 (\sin \theta \cos \phi - \cos \theta \sin \phi) \quad (7)$$

三角関数の公式を使用すると、 $E_0(\sin \theta \cos \phi - \cos \theta \sin \phi) = E_0 \sin(\theta - \phi)$  となり、角度誤差(θ - φ)の値が小さい場合は $E_0(\theta - \phi)$  とほぼ等しくなります。 $E_0(\theta - \phi)$  は、ローターの角度誤差とコンバータのデジタル角度出力の差を示しています。タイプIIトラッキング・ループは、誤差信号の除去処理を行います。これが終わると、φはリゾルバ角θと等しくなります。

## 主要なRDCパラメータ

適正なデバイスを選択する際に、リゾルバ/デジタル・コンバータの特性評価に使用されている多数のパラメータをあらかじめ検討しなければなりません。表2に、AD2S1210の主要なRDCパラメータと仕様を示します。このデバイスはクラス最高のコンバータとして区分されています。

## 誤差源

システム全体の精度は、RDCの精度のほか、リゾルバ、システム・アーキテクチャ、配線、励起バッファ、サイン/コサイン入力回路などに起因する誤差によって左右されます。システムの最も一般的な誤差源は振幅のミスマッチ、信号位相シフト、オフセット、加速度です。

振幅のミスマッチとは、コサイン信号の場合は0°と180°、サイン信号の場合は90°と270°のときのサイン信号とコサイン信号のピークtoピーク振幅における不一致を意味しています。ミスマッチは、リゾルバの巻線の違いや、リゾルバおよびRDCのサイン/コサイン入力間のゲインによって発生します。式3は、次のように書き直すことができます。

$$S2 - S4 = T \times (1 + \delta) \times E_0 \sin \omega t \times \cos \theta \quad (8)$$

ここで、 $\delta$ はサイン信号に対するコサイン信号の振幅ミスマッチ(単位：パーセンテージ)です。ラジアンで表される静止位置誤差 $\varepsilon$ は次のように定義されます。

$$\varepsilon = \frac{\delta}{2} \sin(2\theta) \quad (9)$$

式9は、振幅ミスマッチ誤差が回転速度の2倍で変動することを示しており、45°の奇整数倍で最大の $\delta/2$ となり、0°、90°、180°、270°で誤差ゼロとなります。12ビットRDCを使用した場合、0.3%の振幅ミスマッチはほぼ1LSBの誤差となります。

RDCは、差動サイン/コサイン信号をリゾルバから受信します。リゾルバはキャリアからDC成分を除去するため、リゾルバ出力信号がRDCの適正な動作範囲に入るように $V_{REF}/2$ のDCバイアスを加える必要があります。SINとSINLO入力またはCOSとCOSLO入力間のDCバイアス信号にオフセットがあると、システム誤差が増加します。

同相オフセットによって混入した誤差は、サイン/コサイン信号キャリアが互いに逆位相となる象限で大きくなります。これは、図5に示すように90°から180°までの位置や270°から360°までの位置で生じます。端子間の同相電圧は、同相電圧の2倍だけ差動信号をオフセットします。RDCはレシオメトリックであるため、入力信号の振幅の変化によって位置誤差が生じます。

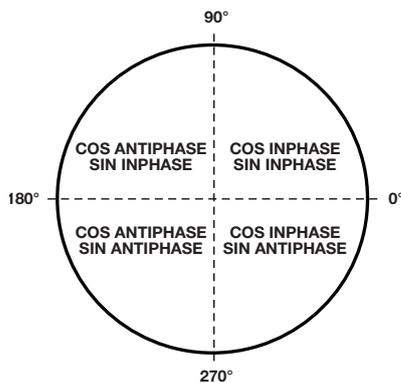


図5. リゾルバの象限

図6に示すように、サインとコサインの差動ピークtoピーク振幅が等しいときでも、入力信号の振幅は異なります。最悪時の誤差は135°と315°で発生します。理想的なシステムでは135°で $A = B$ となりますが、オフセットが存在すると $A \neq B$ となり、振幅のミスマッチが生じます。

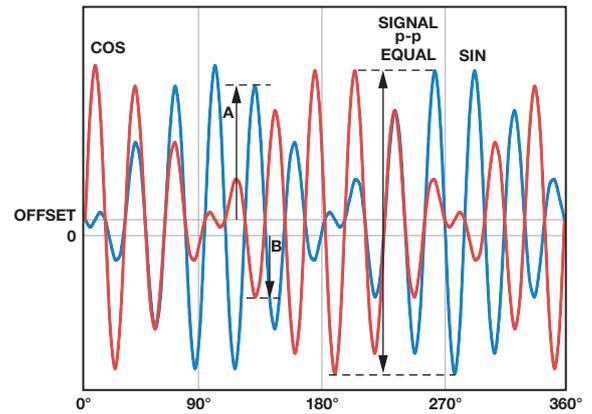


図6. DCバイアス・オフセット

もう一つの誤差源は差動位相シフトです。これは、リゾルバのサイン信号とコサイン信号間の位相シフトです。一部の差動位相シフトは、カップリングの結果すべてのリゾルバに存在します。リゾルバの残留電圧や直交電圧が低いと、差動位相シフトは小さくなります。サインとコサインの信号線のケーブル長が異なる場合や異なる負荷を駆動する場合は位相シフトが増加する可能性があります。

サイン信号に対するコサイン信号の差動位相は、次式で表すことができます。

$$S2 - S4 = T \times E_0 \sin(\omega t + \alpha) \times \cos \theta \quad (10)$$

ここで、 $\alpha$ は差動位相シフトです。

$\alpha$ によって混入する誤差を求めると、誤差項 $\varepsilon$ が得られます。

$$\varepsilon = \frac{\alpha^2}{2} \times 0.5 \quad (11)$$

ここで、 $\alpha$ と $\varepsilon$ はラジアン単位の値です。

大部分のリゾルバは励起リファレンス信号とサイン/コサイン信号との間に位相シフトを発生させるため、さらに誤差 $\varepsilon$ が生じます。

$$\varepsilon = 0.53 \times \alpha \times \beta \quad (12)$$

ここで、 $\beta$ はサイン/コサイン信号と励起リファレンス信号間の位相シフトです。

この誤差を最小にするには、残留電圧の小さいリゾルバを選択してサイン信号とコサイン信号を同等に扱えるようにし、リファレンス位相シフトを除去する必要があります。

静止動作条件下では励起リファレンスと信号線間の位相シフトはコンバータの精度に影響しませんが、動いているときのリゾルバは測定対象の信号とローター・インピーダンスの無効成分により速度電圧を生成します。動いているときのみ発生し、静止角度では発生しない速度電圧は測定対象の信号と直交します。この電圧の最大振幅は次式で表すことができます。

$$\text{Speed\_Voltage} = \frac{\text{Motor\_Speed}}{\text{Excitation\_Frequency}} \quad (13)$$

実際のリゾルバの場合、ローターの巻線は無効成分と抵抗成分の両方を含んでいます。抵抗成分は、ローターが動いているときと静止時のいずれでも存在するリファレンス励起で、非ゼロの位相シフトを発生させます。速度電圧とともに、励起の非ゼロ位相シフトは、次のように表すことができるトラッキング誤差を発生させます。

$$\varepsilon = \beta \times \text{Speed\_Voltage} \quad (14)$$

リゾルバのリファレンス励起とサイン/コサイン信号間の位相誤差を補償するために、AD2S1210は内部でフィルタ処理したサイン/コサイン信号を使ってリファレンス周波数キャリアと同位相の内部リファレンス信号を合成します。サインまたはコサイン（位相精度をよくするために振幅の大きいほうを選びます）のゼロ交差を求め、リゾルバのリファレンス励起の位相を評価して生成した合成リファレンス信号は、リファレンスとサイン/コサイン入力との間の位相シフトを10°未満に抑え、±44°までの位相シフトで動作します。図7に合成リファレンス・ブロックのブロック図を示します。

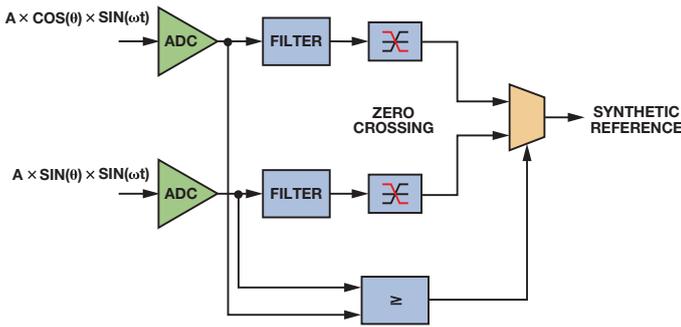


図7. 合成リファレンス

表3. RDCシステムの応答パラメータ

パラメータ	説明	10ビット分解能	12ビット分解能	14ビット分解能	16ビット分解能
k1	ADCゲイン	入力電圧/リファレンス電圧 = (3.15/2)/2.47 (公称)			
k2	誤差ゲイン	$12\pi \times 10^6$	$36\pi \times 10^6$	$164\pi \times 10^6$	$132\pi \times 10^6$
a	補償器のゼロ点係数	8187/8192	4095/4096	8191/8192	32,767/32,768
b	補償器のポール係数	509/512	4085/4096	16,359/16,384	32,757/32,768
c	積分器のゲイン	$1/2^{20}$	$1/2^{22}$	$1/2^{24}$	$1/2^{26}$
T	サンプリング期間	$1/(\text{CLK}_{\text{IN}}/2)$			

タイプIIトラッキング・ループがタイプIループより優れている点は、等速度で位置誤差がまったく発生しないということです。しかし、完全平衡のシステムでも加速度によって誤差項が生じます。加速度に起因する誤差の量は、制御ループ応答によって決まります。図8にAD2S1210のループ応答を示します。

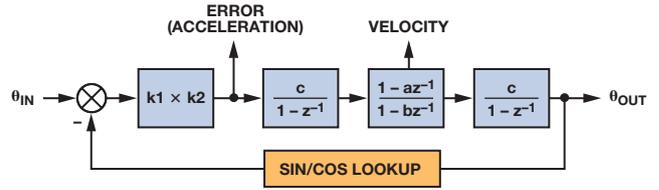


図8. AD2S1210のループ応答

ループ加速度定数  $K_a$  は次式で求めることができます。

$$K_a = \frac{k1 \times k2 \times c^2 (1 - a)}{T^2 (1 - b)} \quad (15)$$

ここで、ループ係数は分解能、入力信号の振幅、サンプリング期間に応じて変化します。AD2S1210は、 $\text{CLK}_{\text{IN}}$  期間につき2回サンプリングを行います。

加速度に起因するトラッキング誤差は次式で求めることができます。

$$\text{Tracking Error} = \frac{\text{Input Acceleration}}{K_a} \quad (16)$$

図9に、さまざまな分解能での加速度と角度誤差の関係を示します。

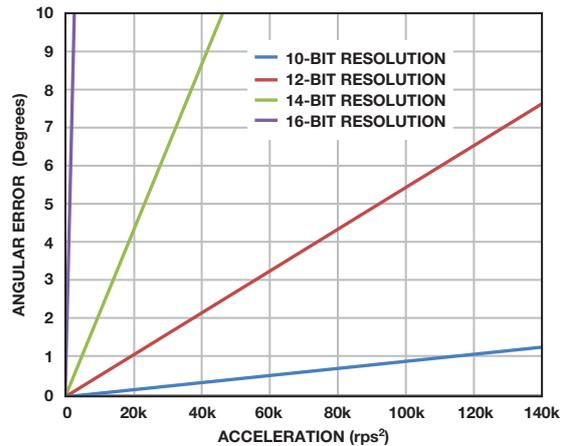


図9. 加速度 対 角度誤差

## 入力フィルタ

最良のシステム精度を得るには、リゾルバ出力をAD2S1210のSIN、COS、SINLO、COSLOピンに直接接続してミスマッチ/位相シフトを減らす必要があります。しかし、これが必ずしも可能であるとは限りません。場合によっては、リゾルバのサイン/コサイン信号を減衰してRDCの入力仕様をマッチングする必要があり、ノイズが多い環境では何らかの信号フィルタ処理を行う必要があります。また、リゾルバ・コネクタでESD/短絡保護が必要となる場合もあります。

図10に、リゾルバとAD2S1210間の代表的なインターフェース回路を示します。直列抵抗やダイオードには、ESDや電源やグラウンドに対する短絡などの外部イベントのエネルギーを低減する十分な保護機能があります。これらの抵抗とコンデンサによってローパス・フィルタを形成し、モーター駆動の結果、リゾルバの入力に結合する高周波ノイズを減少させることができます。また、RDCの入力電圧仕様に合わせるためにリゾルバのサイン/コサイン信号を減衰しなければならぬ場合もあります。そのためには、抵抗 $R_A$ を追加します。AD2S1210は、SIN、SINLO、COS、COSLOを $V_{REF}/2$ にバイアスする内部回路を備えています。この弱いバイアスは簡単にオーバードライブできます。これを簡単に行うには、47k $\Omega$ の抵抗 $R_B$ を追加し、信号を2.5Vにバイアスします。

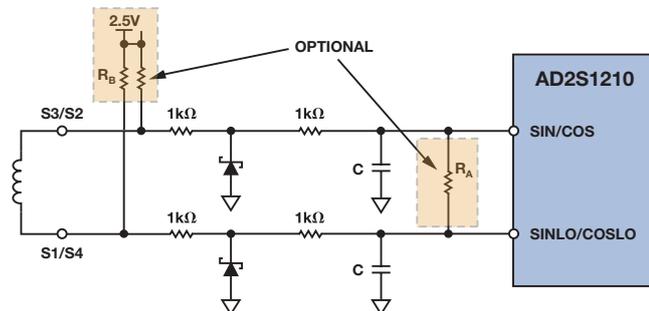


図10. インターフェース回路

## 励起バッファ

リゾルバの低インピーダンス入力を駆動するためには、一般にバッファが必要です。励起バッファはさまざまな方法で実現できますが、ここではその2つを紹介します。最初の回路は一般に自動車や産業用の設計に使用されています。もう一つは、標準的なプッシュプル・アーキテクチャを高出力電流アンプに置き換えて設計を簡素化したものです。

図11の高電流ドライバはリファレンス発振器出力を増幅し、レベル・シフトします。ドライバは、低ノイズ、高精度のデュアル・オペアンプAD8662とディスクリートのエミッタ・フォロウ出力段を使用します。重複バッファ回路によって、リゾルバの一次巻線を駆動するための完全差動信号が得られます。

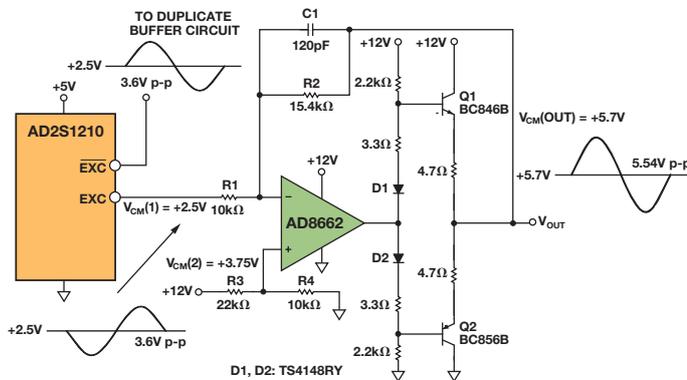


図11. プッシュプル出力をもつAD8662オペアンプを使用した高電流リファレンス・バッファ

この高電流バッファは、標準的なリゾルバ向けに最適化された駆動機能、ゲイン範囲、帯域幅を提供します。バッファはアプリケーションやセンサーの特定の条件に合わせて調整できますが、複雑な設計の場合は、部品数、PCBのサイズ、コスト、アプリケーション固有のニーズに応じて変更するために必要な作業時間といった面で多くの欠点があります。

AD8662の代わりに、リゾルバの直接駆動に必要な高出力電流を提供するアンプを使用して設計を最適化することができます。これによって設計を簡素化でき、プッシュプル段を省くことができます。

図12の高電流ドライバでは、レールtoレール出力をもつ高電流デュアル・オペアンプAD8397によってリファレンス発振器出力の増幅/レベル・シフトを行います。このため、リゾルバとの最適なインターフェースが実現します。低歪み、高出力電流、広ダイナミック・レンジのAD8397は、リゾルバと使用するには理想的なデバイスです。このデバイスは32 $\Omega$ の負荷で310mAの電流に対応し、従来のようなプッシュプル段がなくてもリゾルバに必要な電力を供給でき、ドライバ回路の簡素化や消費電力の低減が可能です。重複回路は、一次巻線を駆動するための完全差動信号を提供します。AD8397は-40 ~ +85 $^{\circ}$ Cの拡張工業用温度範囲で仕様規定されており、8ピンSOICパッケージで提供されています。

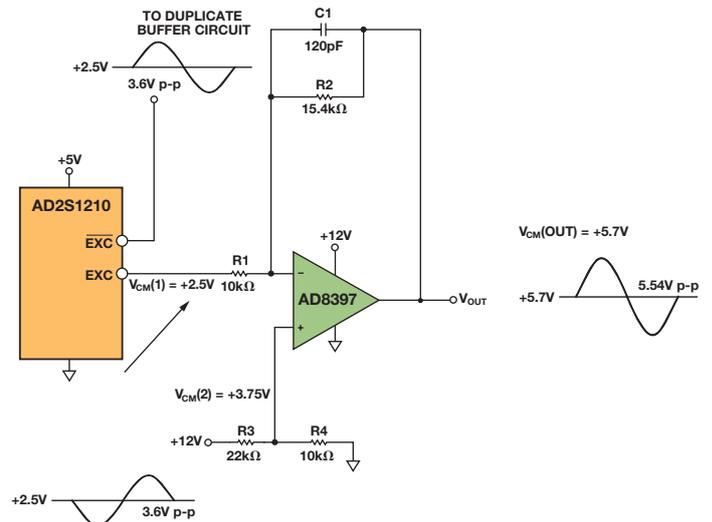


図12. AD8397オペアンプを使用した高電流リファレンス・バッファ

受動素子の値を変更して出力振幅と同相電圧を変えることができます。出力振幅はアンプのゲイン $R2/R1$ で設定し、同相電圧は $R3$ と $R4$ で設定します。

コンデンサ $C1$ と抵抗 $R2$ で、EXCと $\overline{\text{EXC}}$ 出力のノイズを最小にするためのローパス・フィルタを形成します。コンデンサは、キャリアの位相シフトを最小にするものを選ぶ必要があります。励起出力とサイン/コサイン入力間の全位相シフトがRDCの位相ロック範囲を上回らないようにしてください。従来のリゾルバは高周波成分をきれいに除去するため、コンデンサは任意です。

図13は、従来のプッシュプル回路とAD8397リファレンス・バッファを比較したものです。FFTアナライザで、AD2S1210の励起信号上の基本波と高調波のパワーを測定しました。

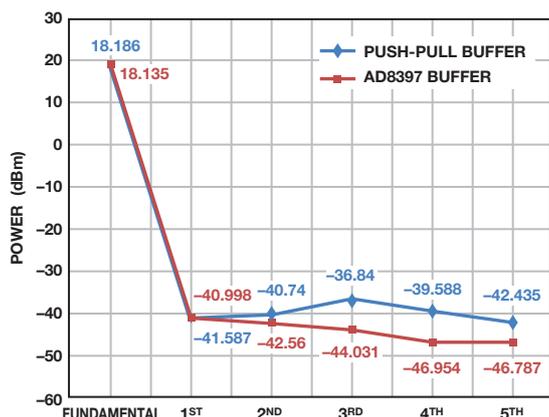


図13. AD8662プッシュプル・バッファとAD8397バッファの比較

各基本波のパワーはどちらの場合もほとんど違いはありませんが、AD8397バッファは高調波を低減します。また、AD8397回路のほうが若干歪みが低くなりますが、いずれのバッファも十分な性能があります。プッシュプル段がなければ、設計が簡素化し、基板面積が低減し、消費電力も従来の回路より少なくなります。

### 結論

リゾルバ／デジタル・コンバータAD2S1210とリゾルバを組み合わせることによって、モーター制御アプリケーションで位置／速度の測定に適した高精度かつ堅牢な制御システムを構築できます。性能全体を最適化するには、AD8662またはAD8397を使用したバッファ回路によって励起信号を増幅し、リゾルバに必要な駆動力を与える必要があります。システムを完成するには、基本的な入力回路ひとつで必要なシグナル・コンディショニングができます。ミックスド・シグナル・メカトロニック・シグナル・チェーンでは常にそうですが、あらゆる誤差源を考慮した高精度のシステムを設計するには十分注意する必要があります。可変分解能、リファレンス生成、オンチップ診断機能をもつAD2S1210は、リゾルバ・アプリケーションに最適なRDCソリューションです。このデバイスは、産業用／自動車グレードで提供されています。

### 参考文献

サーキット・ノートCN-0276「高性能10～16ビット・リゾルバ／デジタル・コンバータ (英語)」

サーキット・ノートCN-0192「AD2S1210リゾルバ／デジタル・リファレンス信号出力向けの高電流ドライバ (英語)」

### 著者

**Jakub Szymczak** [[jakub.szymczak@analog.com](mailto:jakub.szymczak@analog.com)]

は、アイルランドのリムリックにある高精度コンバータ・グループのアプリケーション・エンジニアです。ポーランドのヴロツワフ技術大学で理学修士号を取得し卒業し、2007年に入社しました。



**Shane O'Meara** [[shane.omeara@analog.com](mailto:shane.omeara@analog.com)]

は、アナログ・デバイス社のアプリケーション・エンジニアです。2011年に入社し、アイルランドのリムリックにある高精度コンバータ・アプリケーション・グループに所属しています。リムリック大学を卒業し、電子工学の学士号を取得しました。



**Johnny S. Gealon** [[johnny.gealon@analog.com](mailto:johnny.gealon@analog.com)]

は、フィリピンのミンダナオ州立大学イリガン工科大学を卒業し、電子通信工学の学士号を取得しました。フィリピンのROHM LSI DesignでPCBレイアウト・エンジニアとして3年間勤務。その後、台湾の国立台北大学の大学院でIC設計の単位を取得。2011年にADGT (Analog Devices General Trias, Inc)に入社し、最初の1年はHADおよびPMP製品に関するテスト開発エンジニアとして活躍。現在は、PAD製品に関する製品アプリケーション・エンジニアです。



**Christopher Nelson De La Rama**

[[christopher.delarama@analog.com](mailto:christopher.delarama@analog.com)] は、アナログ・デバイス社のプロダクト・アプリケーション・エンジニアです。2011年に入社し、現在、フィリピンのカヴィテ、ジェネラル・トリアスにあるプロダクト・アプリケーション・グループに所属しています。フィリピンのサン・カルロス大学テクノロジー・センターで電子通信技術の学士号を取得しました。

