

18 ビット SAR ADC のすべてのコードを利用するには

Kris Lokere
Design Manager, Signal Conditioning Products
Linear Technology Corporation

リニアテクノロジー社の 101dB 以上の SNR を有する 18 ビット SAR ADC ファミリは、ユーザの皆様には驚きをもって迎えられることでしょう。驚かない人はまずいないでしょう。でも、ちょっと知っておくべきことがあります。このような驚くべき広いダイナミック・レンジを達成するには、ユーザの最大信号が ADC のフルスケール・レンジを完全に使い切ることが必要なのです。言い換えれば、コードのすべてを使い切ることが必要です。どうすればそのようにできるのでしょうか？

ADC の信号対ノイズ比(SNR)は、ADC が処理できる最大信号と ADC のノイズフロアとの比として定義されます。ですから、LTC2379 ファミリで 102dB の SNR を達成するには、差動入力レンジが 10Vpp であることが必要です。つまり、2つの入力信号それぞれが 0V~5V の振幅を持つことが必要なのです。

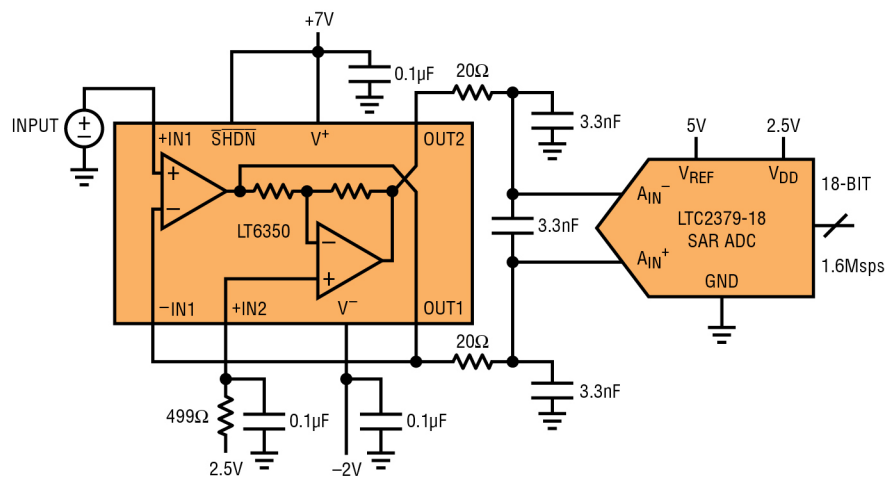


図 1. LT6350 を+7V と-2V の電源で駆動することで、ADC の各入力を 0V から 5V まで十分に余裕をもって振れるようにできる。この構成は評価用ボード DC1783A で採用されている標準構成である。

ADCの前段のどこかにアンプがあると思います。このアンプの役割はADCのサンプリング・コンデンサを充電するための良好な電圧源として機能することです。アンプの出力がADCの入力となるので、ADCの入力が0V~5Vとなるためにはアンプの出力振幅が0V~5Vとなる必要があります。

もし、広い電源レールが利用できるなら、話は簡単です。例えば、回路上のどこかに+/-15Vの電源で動作するフロントエンド部が既にある場合を考えてみます。この場合、この+/-15V電源でオペアンプを駆動すれば、どのようなオペアンプでも0V~5Vの振幅で出力させることができます。DC精度が良く、かつ、高速セトリング時間の性能をもつLT1468や、ドリフトと1/fノイズが非常に小さいLT1124、あるいは小型パッケージで超低消費電力（マイクロパワー）のLT6011を用いることができます。

これらの+/-15Vの広い電源レールを使わずに、0V~5Vの完全な振幅を得たい場合には、最終段のアンプだけに対して、例えば-2Vと+7Vの特別な電源レールを用いることもできます。LTC2379-18をLT6350でドライブするためのリファレンス設計(図1)は、まさしくそのような設計です。+7V電源は5Vリファレンス電圧を供給するのにも便利な電源なのです。

しかしながら、単一5V電源レールでアンプを駆動するにはどうすればよいでしょうか？レール・トゥ・レール・オペアンプを用いれば0V~5Vの振幅をちょうど得られると思うかもしれませんが、実はそうではありません。レール・トゥ・レール出力段は真の意味でのレール・トゥ・レールではないのです。最良の場合でも、それぞれの電源レールのおよそ10mV近くまでしか達することができません。しかも、ハードクリッピングが起こったり、飽和回復時間が遅い場合もあります。ですから、良好な直線性(低歪み)を得ようとすれば、出力電圧は、通常、各レールから少なくとも数百mV以上離れている必要があります。例えば、新製品のLTC6362(図2)は5V単一電源で動作可能な低消費電力の差動オペアンプです。出力は各電源レールの100mV近くまで振ることができ、各レールから250mV以内の範囲まで110dB以上の直線性を確保しています。測定対象信号の最大値が上記の値を超えないようにシステムを設計するには、ADCのコードの少なくとも90%以上を使用するようにします。つまり、公称ダイナミック・レンジの1dB以内となります。多くの場合、これが最良の解決策です。アンプ出力がADC入力範囲を逸脱しない(入力段を破壊しない)ことが保証されていれば安心できるでしょう。これは本質的に安全な回路になっています。

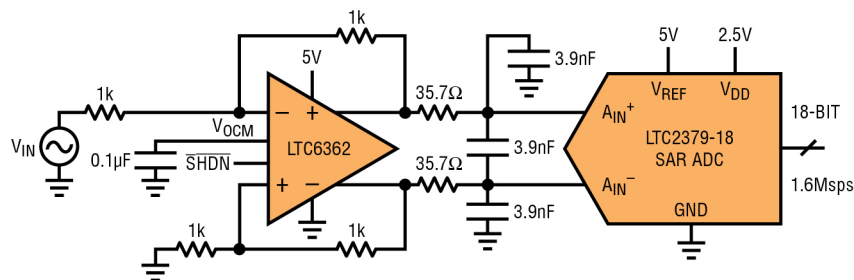


図 2. LTC6362 差動オペアンプは、それぞれのレールの 250mV の近傍まで各出力が振幅するときでも、110dB 以上の直線性を維持します。この構成では、LTC2379-18 ADC がデフォルト・モードで動作するとき、-1dBFS の振幅をもたらします。ADC を DGC モードで使用するとき、ADC のすべてのコードを利用するのに、LTC6362 の差動出力の振幅はたったの 8Vpp でよい。

LTC2379 ファミリはデジタル利得圧縮(DGC)と呼ばれる革新的な機能を備えています。この機能を有効にしたモードでは、ADC はリファレンス電圧の 10%~90%をフルスケールと見なします。ですから、リファレンス電圧が 5V であれば、アンプの出力振幅は 0.5V~4.5V でよいのです。この振幅で、18 ビット ADC の 262,144 個のコードをすべて利用できるのです。ですから、5V 単一電源を用いてアンプが動作しているとき、フロントエンドの利得を相応に縮小すれば 18 ビットの分解能のフルスケールが得られます。ただし、全コードを得られますが、ダイナミック・レンジが少しだけ小さくなります。その理由は、アナログ電圧の振幅が 10Vpp から 8Vpp に小さくなったのに、熱ノイズが元のままだからです。18 ビット ADC では、量子化ノイズは小さいので、熱ノイズだけが問題となります。従って、DGC モードでは、およそ 2dB だけ SNR が悪くなります。16 ビット ADC では、DGC モードでの SNR の低下は 1dB にしか過ぎません。その理由は量子化ノイズも縮小されるからです。

シングルエンド (疑似差動) の LTC2369 ファミリにはデジタル利得圧縮機能がありません。これは意図的なものです。シングルエンド・ユニポーラ信号では、ゼロ近傍の特性が最も重要であることが多いからです。これはまさに、処理すべき信号が小さいとき、高性能 ADC の最も重要な性能として要求されるのは、分解能が良いことと、低ノイズ特性であるということなのです。差動 ADC の場合は、「ゼロ」は両方の入力と同じときに得られます。一方、ユニポーラ・シングルエンド ADC では、入力信号がグラウンド電位であるときにゼロです。ですから、この場合のインタフェースとしては、アンプが

グランド電位まで振幅できることが必須なのです。外部負電源が利用できないときは、LTC6360を使用することをお勧めします。この低ノイズで高DC精度の高速オペアンプはチャージ・ポンプを内蔵していて、小さな負のバイアス電圧を内部で生成して出力段に供給できます。これによって、出力は完全に0Vまで振幅可能なので、0V付近で歪んだりクリップしたりすることがありません。高レベル側においては、LTC6360の出力はおよそ4.5Vまで振幅します。5Vのリファレンス電圧のフルスケールの1dBが信号の最大値となるように定めるか、または4.096Vのリファレンス電圧がフルスケールの振幅となるようにします。後者のシステムの場合は、リファレンス電圧自体も含めて、5V単一電源で完全な動作が達成できます(図3)。

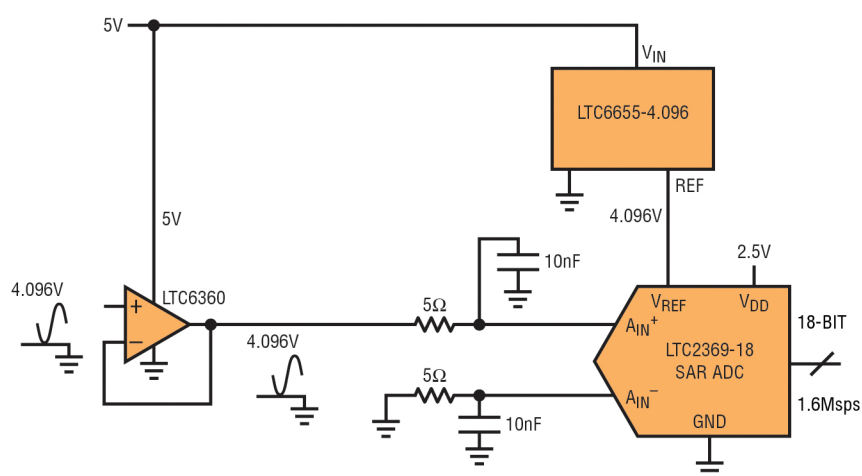


図3. LTC6360 オペアンプは超低ノイズのチャージ・ポンプを内蔵しており、これによって、出力が0Vまで全く歪みの兆候なしに完全に振幅することができる。このようにして、疑似差動LTC2379-18 ADCをフルスケール(ゼロを含む)で振幅させることができるシステムを純然たる単一電源で構成できる。この例では、やはり5Vアナログ電源で駆動可能なLTC6655リファレンスICを用いて4.096Vのリファレンス電圧を生成して使用している。

以上、ADCを駆動するオペアンプの出力振幅について検討しました。次に、入力振幅の制限について説明をします。

ときには、最終段のオペアンプの役割が信号を ADC に渡すバッファであって、利得やレベルシフトが必要ではないことがあります。ユニティゲインのオペアンプ回路構成では、入力振幅の大きさは出力振幅と全く同じです。この場合も、 $\pm 15\text{V}$ 、あるいは -2V と $+7\text{V}$ といった広い電源レールが利用できるならば問題はありません。5V 単一電源でオペアンプを動作させるには、数あるレール・トゥ・レール入力オペアンプの中から適切な 1 つを選べば、それで問題はすべて解決、と思うかもしれませんが、レール・トゥ・レール入力段は実際には 2 つの並列な入力段から構成されているので、そう簡単ではありません。一方は入力が正のレールに近い時に動作し、他方は入力が負のレール（グラウンド）に近い時に動作します。これらの入力段のそれぞれが固有のオフセット電圧をもっています。信号が一方の入力段から他方に遷移したとき、この遷移点においてオフセット電圧がステップ状に変化します。これがシステムの伝達関数に非直線性を生じさせることとなります。オペアンプのデータシートをよく読んで両方でオフセットが調整されていることを確認することが必要です。もしそうでなければ、この非直線性が 16 ビットまたは 18 ビットの INL 特性に非常に大きな悪影響を及ぼす可能性が大了。一方、LTC6360 では、全入力動作範囲においてオフセットが厳密に調整されています。このオペアンプの場合、上記の遷移点は約 3.6V ですが、入力信号の振幅が 0V ~ 4V で、この遷移点を横切るような場合でさえも、高調波歪みは -100dB 以下に保たれます。

オペアンプの入力振幅に関する必要条件を緩和するもう 1 つの方法は、アンプを反転構成で用いることです。例えば、図 4 に示した LT6350 では各オペアンプが反転構成とされていて、オペアンプの入力は電源範囲の中のどこかの DC 電圧に留まるようになっています。このようにすれば、入力同相範囲に関わる問題は起こりません。LTC6362 などの差動オペアンプは常に本質的に反転動作をします。図示のようにシングルエンドから差動への変換に用いる場合には、オペアンプの入力の振幅は信号自体の振幅よりもずっと小さくなります。これらの反転増幅回路構成のいずれにおいても、回路の入力インピーダンスは抵抗性となるので、前段の回路がこの抵抗を駆動できることが必要です。

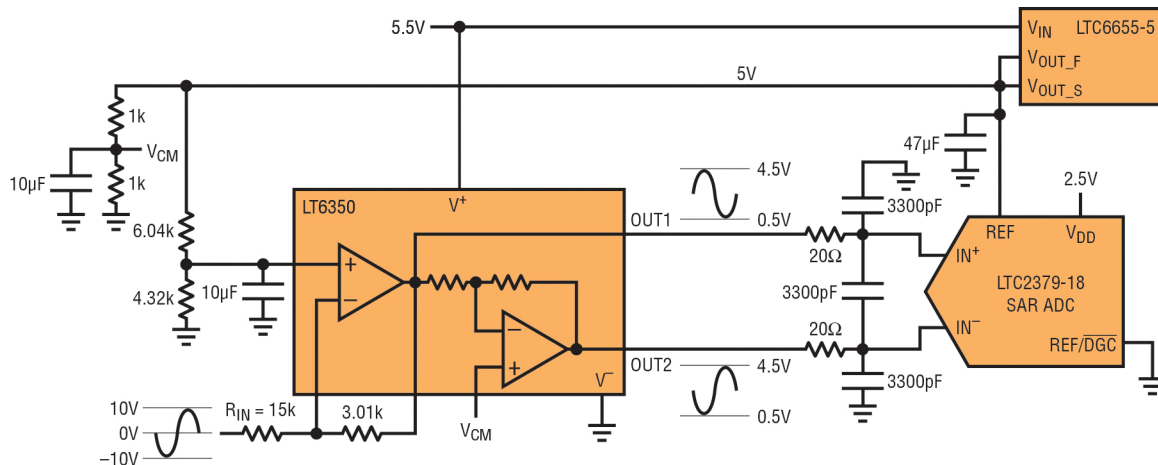


図 4. LT6350 の第 1 のオペアンプを反転モードに構成すると、回路に +/-10V の信号が入力されたときでも IC の入力電圧が変化しないようにできる。DGC モードでは、LTC2379-18 は、オペアンプの出力の 0.5V~4.5V の振幅をフルスケールであると見なし、単一電源のみで駆動されている場合でもすべてのコードが利用可能である。

上記のように、リニアテクノロジーは最高性能の 16 ビットあるいは 18 ビット ADC へ必要な信号を供給する各種アンプの完全なラインナップを揃えています。

キャプション

図 1. LT6350 を +7V と -2V の電源で駆動することで、ADC の各入力を 0V から 5V まで十分に余裕をもって振れるようにできる。この構成は評価用ボード DC1783A で採用されている標準構成である。

図 2. LTC6362 差動オペアンプは、それぞれのレールの 250mV の近傍まで各出力が振幅するときでも、110dB 以上の直線性を維持します。この構成では、LTC2397-18 ADC がデフォルト・モードで動作するとき、-1dBFS の振幅をもたらします。ADC を DGC モードで使用するとき、ADC のすべてのコードを利用するのに、LTC6362 の差動出力の振幅はたったの 8Vpp でよい。

図 3. LTC6360 オペアンプは超低ノイズのチャージ・ポンプを内蔵しており、これによって、出力が 0V まで全く歪みの兆候なしに完全に振幅することができる。このようにして、疑似差動 LTC2379-18 ADC をフルスケール（ゼロを含む）で振幅させることができるシステムを純然たる単一電源で構成できる。この例では、やはり 5V アナログ電源で駆動可能な LTC6655 リファレンス IC を用いて 4.096V のリファレンス電圧を生成して使用している。

図 4. LT6350 の第 1 のオペアンプを反転モードに構成すると、回路に +/-10V の信号が入力されたときでも IC の入力電圧が変化しないようにできる。DGC モードでは、LTC2379-18 は、オペアンプの出力の 0.5V~4.5V の振幅をフルスケールであると見なし、単一電源のみで駆動されている場合でもすべてのコードが利用可能である。