

A/Dコンバータのテスト

本アプリケーション・ノートは、逐次比較コンバータのように変換時間が100 μ sec以下のコンバータのテスト方法とその回路に対して記述するものです。

これらのダイナミック・テストは、変換時間が数十から数百 msecでオシロスコープでエラーが見られるような積分型のA/Dコンバータには適していません。実際のテスト方法を述べる前に、A/Dコンバータ(ADC)の特性をいくつか見てみることにします。図2.3の伝達関数は、特に逐次比較コンバータやフィードバック・ループにロジック制御のコンパレータとDACを使ったカウンタ・コンバータに現れるものです。

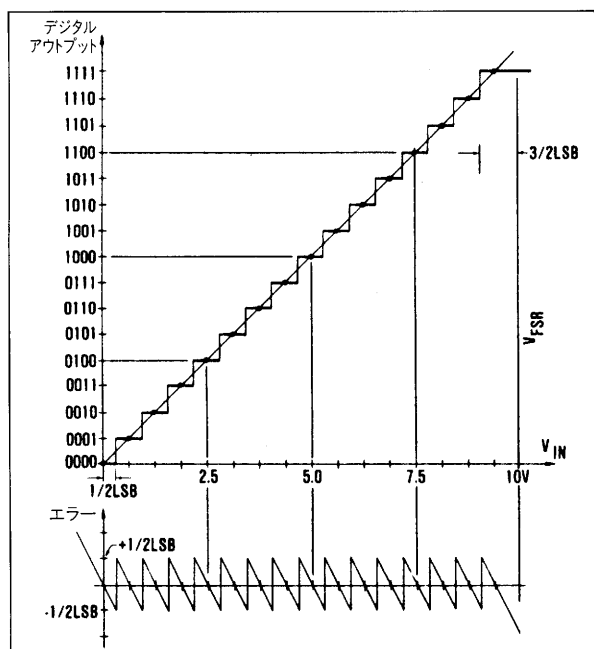


図1 理想的な4ビットA/Dコンバータの伝達関数とエラー・プロット

図1は理想の4ビットA/Dコンバータの伝達関数です。伝達関数の各ステップはすべて1LSB幅です。仮に、最初出力コードの遷移(0000から0001へのコードの変換)が $\pm 1/2LSB$ の入力電圧で起きるように調整されており、最後の遷移(1110から1111)がフルスケール・レンジ電圧(FSR)より $-3/2LSB$ 低い点で起きるように調整されている場合、各ステップの中心点は理想の4ビットD/Aコンバータの出力と同じ電圧で発生します。これらの理想D/Aコンバータの出力ポイントを、図1の各ステップの中央にドットで表します。

図1に見られるように、 $\pm 1/2LSB$ ($\pm 0.312V$)間の+5Vの入力では1000の出力コードとなり、言い換えれば、A/Dコンバータの出力コードが1000の場合、入力は5Vで $\pm 0.312V$ ($\pm 1/2LSB$)の誤差があることになりま。この $\pm 1/2LSB$ の誤差は量子化誤差と呼ばれ、すべてのA/Dコンバータに固有の誤差です。A/Dコンバータの直線性誤差の仕様が $\pm 1/2LSB$ の時、全誤差は $\pm 1LSB$ になり、これは量子化誤差の総和と直線性誤差の合計です。

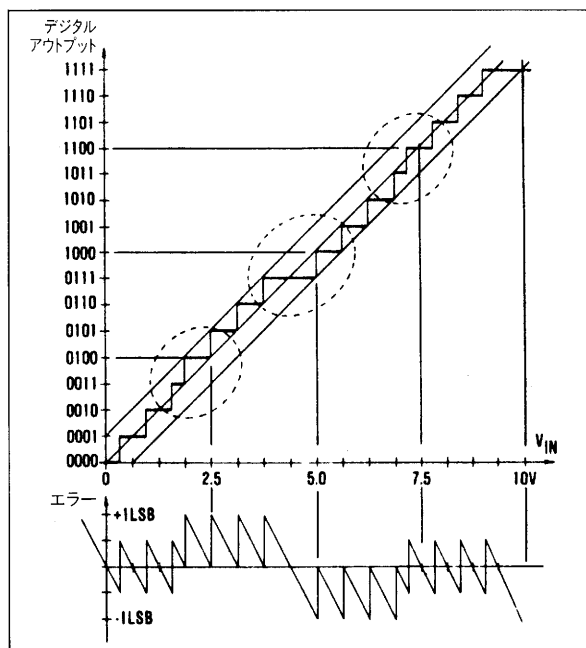


図2 A/Dコンバータの伝達関数とエラー・プロット。ただしA/Dコンバータは、個々のビットエラーが、 $\epsilon_1 = +1/2LSB$ 、 $\epsilon_2 = -1/2LSB$ 、 $\epsilon_3 = 0$ 、 $\epsilon_4 = 0$ のD/Aコンバータを内蔵。

直線性誤差は、オフセット誤差とゲイン誤差を除去した時、理論上の伝達関数からの入力電圧の偏差として定義されます。仮にA/Dコンバータで使われているD/Aコンバータが非直線的であれば、ステップ幅は理想的な1LSBステップ幅からずれてしまい、過渡電圧は理想的電圧値でなくなります。A/Dコンバータの最大直線性誤差は理想の過渡電圧との差の最悪値となり、微分直線性誤差は理想的な1LSBステップからの最大誤差を持つステップ幅を見つけることによって求められます。他に、数ステップ各の平均値で各々中心点の理想値からの誤差を計算して、直線性誤差を求める方法を採用している製造業者もあります。

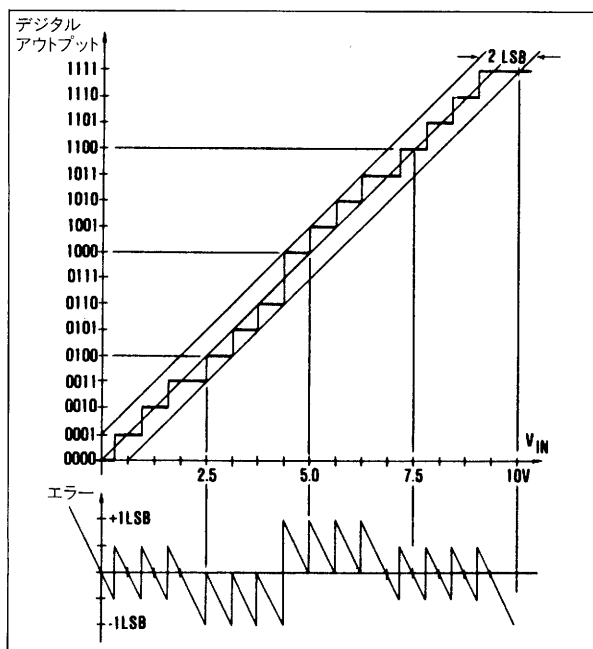


図3 A/Dコンバータの伝達関数とエラー・プロット。ただしA/Dコンバータは、個々のビットエラーが、 $\varepsilon_1 = -1/2\text{LSB}$ 、 $\varepsilon_2 = +1/2\text{LSB}$ 、 $\varepsilon_3 = 0$ 、 $\varepsilon_4 = 0$ のD/Aコンバータを内蔵。

図2の伝達関数は、固有のビットエラーが $\varepsilon_1 = +1/2\text{LSB}$ 、 $\varepsilon_2 = -1/2\text{LSB}$ 、 $\varepsilon_3 = 0$ 、 $\varepsilon_4 = 0$ のD/Aコンバータを内蔵したA/Dコンバータによって得たものです。コード0111で微分直線性誤差は最悪の+1LSBとなり、過渡電圧は中心点より低い $-1/2\text{LSB}$ シフトし、また高点では $+1/2\text{LSB}$ シフトします。

内蔵D/Aコンバータのビットエラーの極性が逆の場合、すなわち $\varepsilon_1 = -1/2\text{LSB}$ 、 $\varepsilon_2 = +1/2\text{LSB}$ 、 $\varepsilon_3 = 0$ 、 $\varepsilon_4 = 0$ の場合、伝達関数は図3のようになります。0111がミッシング・コード(DLE = -1LSB)だということと、過渡電圧が逆の極性へシフトすることに注意してください。どちらの例も、微分直線性誤差の最悪値は直線性誤差の2倍以上にならないことを表しています。この逆はあり得ません。

図2の点線で囲んだ部分は、コードのキャリーで発生する微分直線性誤差の変化、すなわち直線性誤差の変化を示しています。この変化がコードのキャリーで発生することから、キ

ャリーの誤差を測定すれば、すべての 2^n ステップをテストしなくて済みます。たとえばMSBキャリーでは、0110から0111と0111から1000への過渡電圧を測定して、微分直線性と直線性誤差を計算します。これは表1に示すテスト方法の基本テクニックです。

実際には変換処理に伴うダイナミック特性の影響もあるので、内部D/Aコンバータの直線性誤差は $\pm 1/2\text{LSB}$ 以下でなければなりません。仮にD/Aコンバータと内部コンパレータに安定するための十分な時間が与えられなかったとすると、(通常、これは変換時間を短縮する場合です)過渡電圧は $\pm 1/2\text{LSB}$ 以上シフトします。このような状態においては、重ね合わせ誤差(スーパーポジション・エラー)が無視できなくなる程大きくなるので、A/Dコンバータの最悪ケースの誤差を捜すために、いくつかのコード・キャリーでテストをしなければなりません。ダイナミック・エラーによって起こるシフトは主要コード・キャリーで見られるため、主要コードの遷移点の上と下で測定する必要があります。MSBで主要キャリーを特徴付けるために、たとえば、0110 $\rightarrow$ 0111 $\rightarrow$ 1000 $\rightarrow$ 1001と過渡電圧を測定します。表1はこのテスト方法の概略を示したものです。

DVM を使ったマニュアルテスト

図4にA/Dコンバータのマニュアルテストの簡単な回路を示します。マニュアルテストは、高速の並列エンコーダから低速の積分型変換器まで、どのようなA/Dコンバータでも行うことができます。

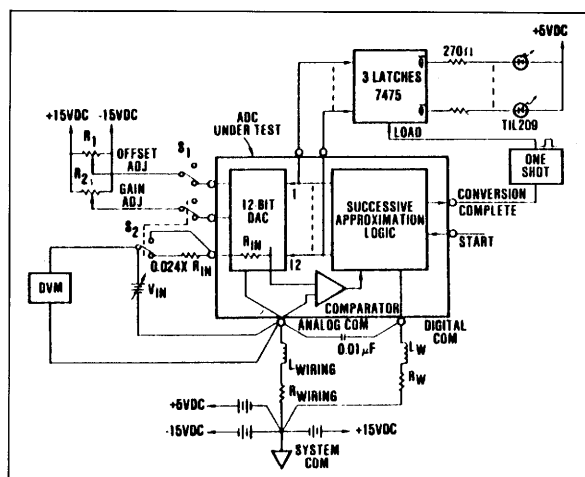


図4 DC入力電圧、入力電圧モニタ用DVM、LEDデジタルコード・ディスプレイを備えたマニュアルのA/Dコンバータ・テスト回路。

入力に変換DC電圧源で、デジタル出力はLEDで表示されます。変換処理のダイナミック特性のために、結線する抵抗とインダクタンスを流れる電流パルスの影響を考慮して、結線の際は充分注意する必要があります。A/Dコンバータの過渡電圧のヒステリシスとノイズを極力小さくするには、各社のデータシートに記載されている推奨レイアウト手順に従うことをお勧めします。通常これらの手順には、電源からの適切

な配線のバイパス方法や、場合によってはバイパス・コンデンサの使用法が述べられています。バイパス・コンデンサはアナログとデジタル・コモンをつなぎ、差動信号を同相モード信号に変化させ、D/Aコンバータからコンパレータへの電源のデジタル・ノイズを防ぎます。

テスト手順には、過渡電圧の両方のデジタル・コード間で、約50%の反復でLEDが点滅するまで連続して変換をするA

／DコンバータへのDC入力電圧の変化が含まれています。

表Iでは、オフセット、フルスケール、ゲイン、直線性、そして微分直線性誤差を測定する手順の概要を示します。逐次比較型A/Dコンバータでは、測定するコードの上と下の両方から過渡電圧を測らねばなりません。というのは、内部DACの直線性誤差によって起こるシフトに付随して変換時のダイナミック誤差が発生し、過渡電圧がシフトするためです。

表1. A/Dコンバータ過渡電圧の測定

STEP	OPERATION	CODE TRANSITIONS	IDEAL INPUT	ACTUAL INPUT	ERROR	DIFF LIN ERROR	COMMENT
1	OFFSET ERROR	0000 0000 0000 0000 0000 0001	+1.22mV		ϵ_0		S1, S2 OFF
2	FULL SCALE ERROR	1111 1111 1110 1111 1111 1111	+9.9964V		ϵ_{FS}		$\epsilon_{GAIN} = \epsilon_{FS} - \epsilon_0$
3	NULL OFFSET ERROR	0000 0000 0000 0000 0000 0001	+2.5mV	+2.5mV	0		S1 ON, ADJ R1
4	NULL GAIN ERROR	1111 1111 1110 1111 1111 1111	+10.2375V	+10.2375V	0		S2 ON, ADJ R2
5	BIT 11 CARRIES	0000 0000 0001 0000 0000 0010 0000 0000 0011	5.0mV 7.5mV		ϵ_A ϵ_B	$\epsilon_A - \epsilon_B$	ERRORS AT THE LOWER ORDER BITS
6	BIT 10 CARRIES	0000 0000 0010 0000 0000 0011 0000 0000 0100 0000 0000 0101	7.5mV 10.0mV 12.5mV		ϵ_C ϵ_D ϵ_E	$\epsilon_C - \epsilon_D$ $\epsilon_D - \epsilon_E$	
7	BIT 9	0000 0000 0110 0000 0000 0111 0000 0000 1000 0000 0000 1001	17.5mV 20.0mV 22.5mV				
13	BIT 3 CARRIES 1/8 FSR	0001 1111 1110 0001 1111 1111 0010 0000 0000 0010 0000 0001	1.2775V 1.2800 1.2825				LINEARITY AND DIFFERENTIAL LINEARITY ERROR AT 7 EVENLY SPACED CODE CARRIES
14	BIT 2 CARRIES 1/4 FSR	0011 1111 1110 0011 1111 1111 0100 0000 0000 0100 0000 0001	2.5575 2.5600 2.5625				
15	3/8 FSR	0101 1111 1110 0101 1111 1111 0110 0000 0000 0110 0000 0001	3.8375 3.8400 3.8425				
16	BIT 1 CARRIES 1/2 FSR	0111 1111 1110 0111 1111 1111 1000 0000 0000 1000 0000 0001	5.1175 5.1200 5.1225				
17	5/8 FSR	1001 1111 1110 1001 1111 1111 1010 0000 0000 1010 0000 0001	6.3975 6.4000 6.4025				
18	3/4 FSR	1011 1111 1110 1011 1111 1111 1100 0000 0000 1100 0000 0001	7.6775 7.6800 7.6825				
19	7/8 FSR	1101 1111 1110 1101 1111 1111 1110 0000 0000 1110 0000 0001	8.9575 8.9600 8.9625				

図4の回路では入力に $0.024 \times R_{in}$ の抵抗が直列に追加され、フルスケール電圧が 10.2375V に引き上げられています。これによって理想1ビットの重みは、1LSBで2.5mV、5.0mV、10mV...2.56Vそして最後にMSBでは5.12Vとなります；また伝達関数はステップ3でオフセット調整が行われる時にゆるやかに $1/2$ LSBシフトします。理想的な過渡電圧は、理想的な12ビットD/Aコンバータの出力電圧のようにまったく同じ電圧で発生します。

表Iのステップ2で、ゲインは測定ではなく、フルスケール誤差からオフセット誤差を減算して求められていることに注意してください。表Iのスペースを抑えるために、7つの等分したキャリ・ポイントのみ示してあります。テストするA/Dコンバータのスーパーポジション・エラー（重ね合わせ誤差）が大きい場合には、等分割した15,31あるいは63ポイントまでキャリ・ポイントを測定しなければなりません。

A/Dコンバータをマニュアルでテストするのは、明らかに多くの時間を浪費することになります。おそらくD/Aコンバータの10倍はかかるでしょう。それは、D/Aコンバータより多くの測定ポイントを要することと、過渡電圧を見つけるために入力電圧をゆっくり変化させる必要があるからです。

この過渡電圧検出のマニュアル調整処理を高速化するために、入力電圧を自動的に調整するサーボ・ループを使うことができます。更に他の方法としては、たとえばコンピュータ制御によるD/Aコンバータを使って、テストするA/Dコンバータへの入力電圧をLSBの端数に行き渡るまで徐々に増やし、コードの遷移が起きる入力電圧を記録させます。

過渡電圧を測定する代わりに、他のテスト方法を使用する場合もあります。各ステップの理想的な中心電圧をA/Dコンバータに入力し、その結果としての出力コードを理想の出力コードと比較します。もしもA/Dコンバータの最大直線性誤差が $\pm 1/2$ LSBであれば、出力コードはその結果として

常に ± 1 カウント内に入ります。このテストではA/Dコンバータの品質を評価することはできませんが、変則的な伝達関数を検出することは不可能です。図2と図3の例から分かるように、 ± 1 カウントのテストに合格しても、A/Dコンバータには依然として次のような誤差が存在します。即ち、 $\pm 1/2$ LSB以上の直線性誤差、ミッシング・コード、非単調性、ヒステリシス、そして雑音性の遷移などです。

これらの誤差の例は、次項に示します。

ダイナミック伝達関数テスト

図5に示すテスト回路では、A/Dコンバータの伝達関数が8コード・セグメントですぐに表示されます。マニュアルで行っていた表Iのすべてのテストもこの方法によって短時間で行うことができるようになり、またテスト中のA/Dコンバータの品質に関して、表Iのテストによって得られるよりもはるかに多くの情報を手に入れることができます。たとえば、雑音の多い遷移コード、コードのばらつき、ヒステリシス、ミッシング・コード、非単調性などを従来のオフセット、ゲイン、直線性、そして微分直線性誤差のデータと共に迅速に検出することができます。言い換えれば、オシロスコープに表示された伝達関数は、そのA/Dコンバータの特性をほとんど完全に図形化していることになります。

図5でのA/Dコンバータへの入力電圧は、リファレンスD/AコンバータのDC電圧に三角波を重ねたものです。三角波の変化する割合はA/Dコンバータの各変換周期において十分に小さく、そのためA/Dコンバータ前段にはサンプル/ホールド回路は必要ありません。三角波は、スコープ・ディスプレイ上のジッターを防ぐために、A/Dコンバータの変換開始コマンドと同期を取る必要があります。三角波の各サイクルに1024の変換があるのが最良の形です。

このテストは、図6に示すように、下位のビットは繰り返しのバイナリ・コードパターンを持つという原則の下に動いています。仮に、A/Dコンバータの下位2ビットが2ビットD/Aコンバータに配線されたとすると、D/Aコンバータの出力では図6(b)に示すように4段階の反復階段波形が発生します。都合の悪いことに、すべての反復階段波形は似ており、どれが目的のコード・キャリーなのかわからなくなります。

この点を改良し、目的のコード・キャリーを判別しやすくしたものを図6(c)に示します。3ビットD/AコンバータのMSBは、A/Dコンバータの適切なビット出力ラインに接続されています（この例ではビット2）。その結果は図6(c)に示されるように、ビット2が $1/4$ フルスケールで有効(ON)になった時（ビット2は $3/4$ フルスケールでも有効になります）、階段波形は4段ではなく8段にシフトしています。図5に示すオープン・コレクタのANDゲートとセンターオフのDPDTビット・スイッチを使って、目的のコード・キャリーに対応するビット・スイッチがセンター・オフになっている時に動作することにより、このシフト特性を向上させます。

A/Dコンバータをテストする前にオシロスコープを調整し

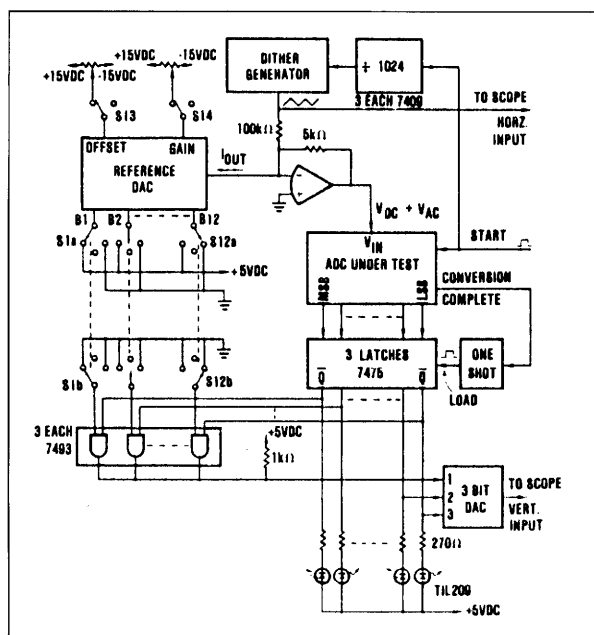


図5 ダイナミックな伝達関数のテスト回路

て、入力をショートした時のビームの位置を図6 (d) の点に合わせ、垂直と水平のゲインを1 目盛り当たり1LSBにします。

調整したスコープで、理想的な伝達関数は図7 (a) のオシロスコープの階段波形上に表れます。

直線性誤差を測定するために、伝達関数のエンド・ポイントは、オフセットとゲイン調整のポテンショメータを使って図6 (d) の位置に調整されます。目的キャリア・コードの伝

達関数はビット・スイッチによって選択され、直線性誤差は理想的な過渡電圧からの偏差として測定されます。微分直線性誤差は、理想的な1LSBステップサイズからの偏差です。ゲインを測定するためにはスイッチS14をオープンにして、ゲイン調整用のポテンショメータを切り離し、理想的なフルスケールの遷移点からの偏差を記録します (図6 (d))。

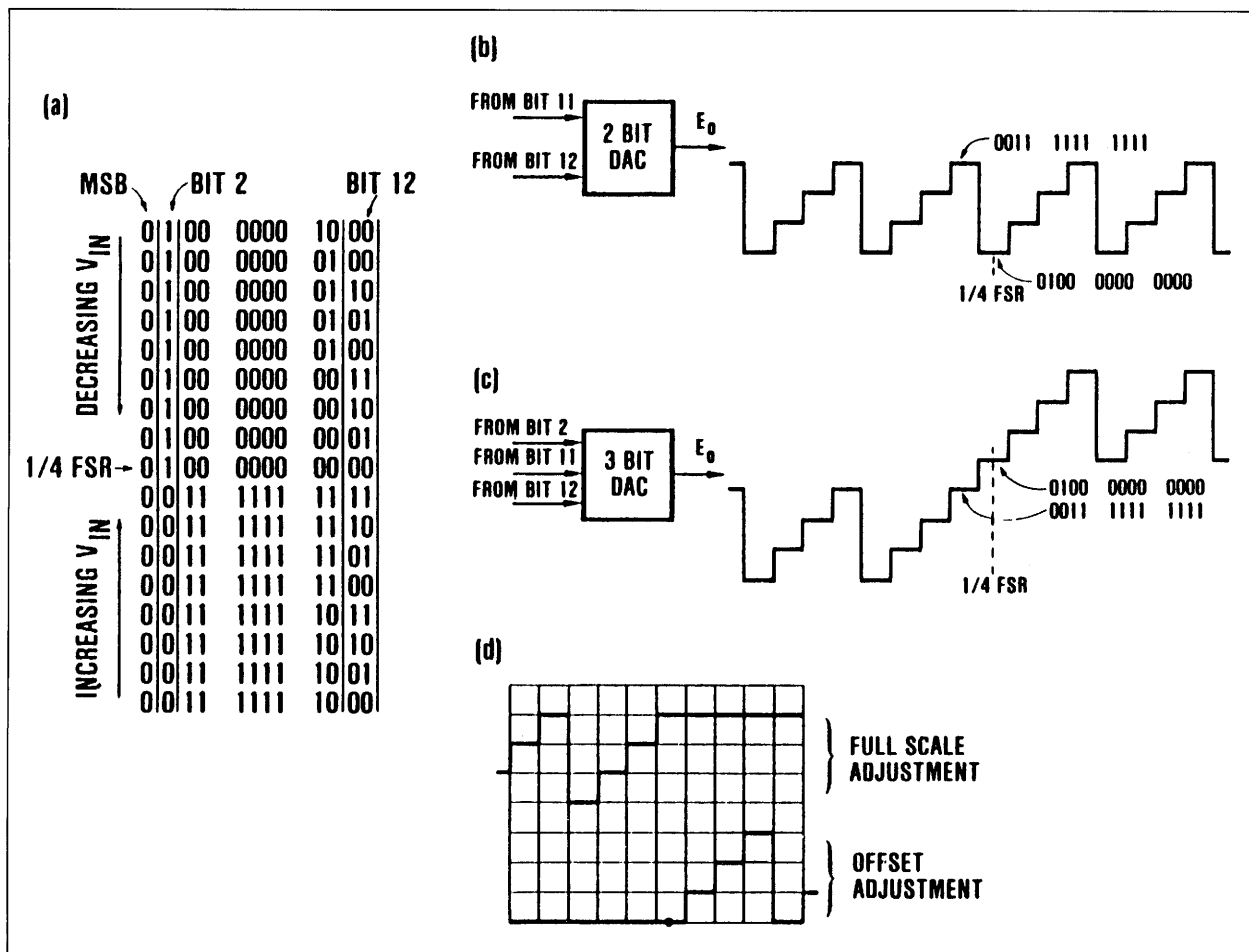


図6 図5のダイナミック伝達関数テストの基本原理。(a)フルスケール・レンジ電圧の1/4の入力ディザ電圧で、A/Dコンバータの反復する出力コードの下位2ビット。(b)2ビットD/Aコンバータの階段波形。(c)3ビットD/AコンバータのMSBをA/Dコンバータの特定の出力につないだ時の階段波形。(d)A/Dコンバータの伝達関数をテストする前に行うオフセットとフルスケールの調整。

同様に、オフセットはスイッチS13を開くことでオフセット調整のポテンショメータを切り離して測定します。

ヒステリシス、ミッシング・コード、ノイズ、そしてオルターネーションの影響を見るために、図7に12ビットA/Dコンバータの伝達関数の例を示します。

ダイナミック・エラーのプロット

図8に示すテスト回路は今までの回路と異なり、3ビットD/Aコンバータの代わりに全nビットD/Aコンバータを使用して、入力アナログ信号を再生しています。このD/Aコンバータは、テスト中のA/Dコンバータより少なくとも10

倍のリニア特性を持たなければなりません。というのは、誤差増幅用アンプがA/Dコンバータへの入力信号とD/Aコンバータの出力信号の差を正確に増幅するように使われているからです。誤差増幅用アンプの出力は、A/Dコンバータ固有の $\pm 1/2$ LSBの量子化誤差と直線性誤差 (たとえば、図2, 3のエラー・プロットを参照のこと) の総和です。微分直線性誤差は、各のこぎり波形の傾斜部分での理想的な1LSB変化からの偏差として、エラー・プロットに現れます。A/Dコンバータへの入力信号とD/Aコンバータの遅延出力信号のどんな位相のずれも、エラー・プロットに追加されます。これは不要な小振幅サイン波形と言われます。そのため、入力信

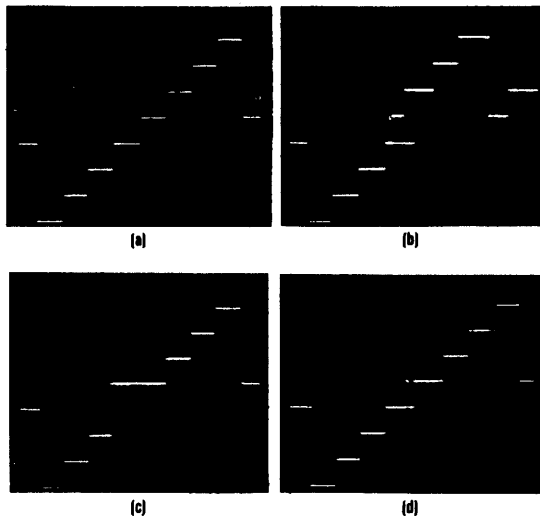


図7 12ビットA/Dコンバータの伝達関数特性。

- (a) ほぼ完全な伝達関数。
 (b) MSBコード・キャリのヒステリシス。VINが増加していく時はミッシングコード100...000が発生し、VINが減少する時はコードのミッシングは起きないことに注意。(c) ミッシングコード011...111を除けばほぼ完全な伝達関数。(d) 過渡電圧付近でのノイズとオルターネーション(コードの反転)

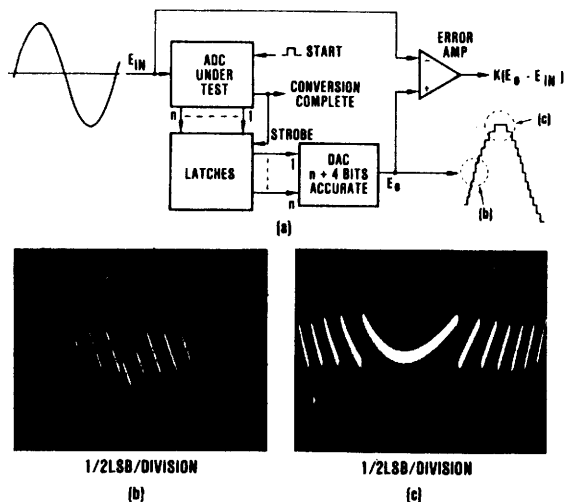


図8 A/Dコンバータのテスト回路

- (a) E_{IN} と、正確なD/Aコンバータでアナログ電圧へ反転帰還するA/Dコンバータの出力の比較
 (b) $E_{IN}=0$ 時のエラー
 (c) +フルスケール入力時のエラー

号の周波数は、この不要な信号を極力小さくするために十分低くしなければなりません。

図8 (a) は、入力信号がゼロ付近の場合の8ビットA/Dコンバータの誤差をプロットしたものです。直線性および微分直線性エラーが明確に現れています。図8 (b) はサイン波形入力のピーク時の誤差をプロットしたものです。入力信号の勾配が極性を変化させた時に、のこぎり波形が反転することに注意してください。

広帯域におよぶエラー出力のノイズのために、このテストが行えるのは8ビットのコンバータまでに限定されます。10ビット以上のテストをするには、エラー信号のハイパス・フィルタと入力信号周波数を低く抑えることが必要になります。ですから、プロットを記録するには、ストレージ・オシロスコープかチャート・レコーダを使用します。

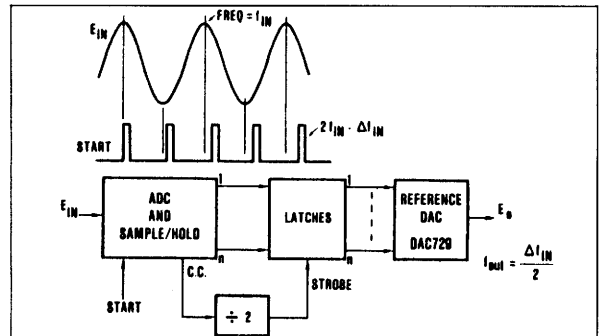


図9 高速A/Dコンバータのテスト回路

表I A/Dコンバータの過渡電圧の測定

高速のA/Dコンバータのテスト回路

図9に標準変換時間が $10 \mu \text{sec}$ 以下の高速A/Dコンバータのテスト回路を示します。これらの高速A/Dコンバータは、ほとんどの場合、逐次比較か並列の変換方法を取ります。このテストの独特な点は、入力信号の位相から 180° よりやや大きくずらした点で入力波形を量子化することによって、テスト中のA/Dコンバータにフルにダイナミックな動作をさせることです。A/D変換されたデータが交互にラッチすることにより、D/Aコンバータの出力には低周波に変換された入力信号に相似な波形が出力されます。入力波形は、各変換周期に1LSBの端数部分より多く変化するので、A/Dコンバータの入力を固定する優れたサンプル/ホールドが必要です。

図9の例は、入出力波形に可能な最大の周波数を解説したものです。変換時間(サンプル/ホールドのアクイジション・タイムも含む)が $1 \mu \text{sec}$ の高速12ビットA/Dコンバータについて考えてみましょう。出力用のD/Aコンバータは、交互の変換が完了した時ラッチに保持されるので、 $2 \mu \text{sec}$ ごと

に更新されます。すべての4096の出力コードをテストするのが望ましいので、最大出力周波数は、 $1/(4096 \times 2 \mu \text{ sec})$ あるいは122Hz となります。最大入力周波数は、一周期に2つサンプルするので500kHzとなります。そして、出力信号をハイパスフィルタに通した後、歪率測定器やスペクトル・アナライザを用いて出力波形の品質、すなわちサンプル／ホールドとA/Dコンバータの総合特性を測定することができます。

結び

コンバータ・ユーザに視野を広げていただくために、A/DコンバータやD/Aコンバータの持つ独特の特性の、各々に適したテスト方法をいくつか取り上げてきました。もちろん他にも多くのパラメータのテスト方法がありますが、ここでは一般的に必要とされるテストについて述べました。

本著で述べた方法を使って、各々のアプリケーションに最適なテストシステムを作り上げていただけることと思います。

日本バー・ブラウン株式会社

本社 〒107 東京都港区赤坂7-10-20 アカサカセブンスアヴェニュービル ☎03-3586-8141
大阪営業所 〒532 大阪市淀川区中島4-5-1 新栄ビル ☎06-305-3287
名古屋営業所 〒465 名古屋市名東区本郷2-175 サニーホワイト藤 ☎052-775-6761

(LI-342)

フリーダイヤル

東京



FAX.01 20-068801

フリーダイヤル

大阪



FAX.01 20-068805

回線設計およびデータ収集・コントロールシステムの構築のあらゆるご相談をいつでも承ります。