

トランジスタCooking!

〈第11回〉

フラッシュ型A-Dコンバータを作る

柴田 肇
Hajime Shibata

今回は、トランジスタを使ってフラッシュ型のA-Dコンバータを作ります。CDプレーヤや携帯電話だけでなく、テレビ放送もデジタル方式に置き換わり、アナログではなくデジタルによる信号処理が一般的になってきました。これとともに、A-Dコンバータがその役割を増しています。

A-Dコンバータには、フラッシュ型、パイプライン型、 $\Delta\Sigma$ 型などいろいろな種類があります。本連載では、いつものようにトランジスタを使ってフラッシュ型を作ってみます。その中身の大事な部分は、これまで取り上げたアンプやスイッチを巧妙に利用したアナログ回路です。

● クロックで動作するコンパレータでサンプリング

図11-1に示すように、A-Dコンバータは、電圧や電流などの連続的な信号を周期的なタイミングで離散的な信号に変換して出力する回路です。

連続値を離散値に変換できる最も単純な回路は、クロックに同期して動作するコンパレータ(電圧比較器)です。

コンパレータは、入力電圧と参照電圧を比較して、ロジック・レベルの“H”または“L”を出力します。単なるコンパレータは、信号を時間で離散化する機能を持っていません。図11-2(a)のような入力信号を加えると、図11-2(b)のように単純に参照電圧と比較して正負の比較結果を出力します。

1ビットのA-Dコンバータに期待される波形は、

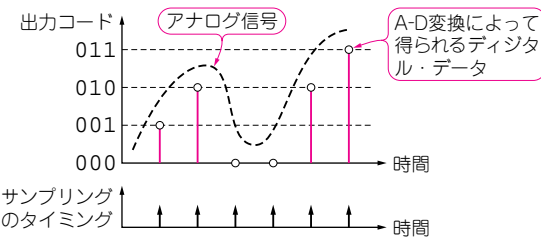


図11-1 A-Dコンバータの基本動作

図11-2(c)で与えられた変換タイミングにおける比較値の波形 [図11-2(d)] です。実際のフラッシュ型A-Dコンバータに必要なのは、クロックに同期して動作するコンパレータです。これをクロック・コンパレータと呼びます。

図11-3に示すように、フラッシュ型のA-Dコンバータは、複数のクロック・コンパレータを並べてできています。それぞれのコンパレータには、抵抗で分圧された参照電圧が与えられていて、この参照電圧と入力電圧を、クロックに同期して比較し、出力します。

クロック・コンパレータに要求される性能

● 大きなゲインが必要

クロック・コンパレータに要求される最も基本的な特性は大きなゲインです。

コンパレータは、入力電圧を V_{in} 、参照電圧を V_{ref}

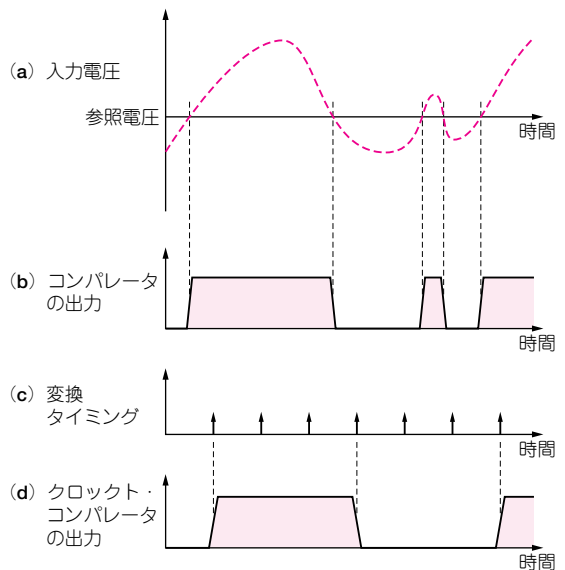


図11-2 コンパレータとクロック・コンパレータの変換動作の違い

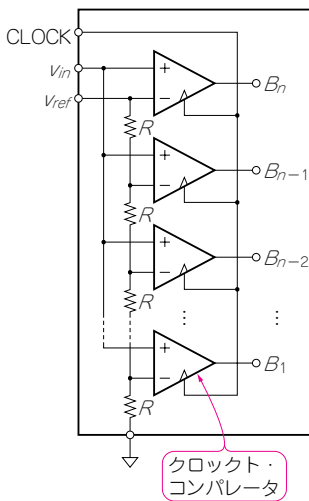


図11-3 フラッシュ型A-Dコンバータは複数のクロック・コンパレータでアナログ信号をデジタル信号に変換する

とすると差電圧 ($V_{in} - V_{ref}$) をロジック・レベルに到達するまで大きく増幅する回路です。その増幅率が十分ではなく、入力電位差が小さい場合、ロジック・レベルの電圧にまで増幅することができません。

仮に、増幅率を $A = 80 \text{ dB}$ (10000 倍)、必要なロジック・レベルが“H”のとき $+1 \text{ V}$ 、“L”のとき -1 V とすると、差電圧 $V_{in} - V_{ref} = 1 \text{ mV}$ の入力に対して、

$$V_{out} = A(V_{in} - V_{ref}) = 10000 \times 1 \text{ mV} = 10 \text{ V} \dots\dots\dots (11-1)$$

というぐあいに、十分な電圧を出力できます。

しかし、差電圧が $1 \mu\text{V}$ と微小な場合はどうでしょう？ 出力電圧は、

$$V_{out} = A(V_{in} - V_{ref}) = 10000 \times 1 \mu\text{V} = 0.01 \text{ V} \dots\dots\dots (11-2)$$

となり、判別可能なロジック電圧に到達せず、誤動作の要因になります。このような状態をメタステーブルといいます。メタステーブル状態に陥ると出力が不定の値になり、フラッシュ型 A-D コンバータに接続される論理回路が誤動作してしまいます。コンパレータには、どのようなレベルの信号が入ってくるかはわかりません。入力信号が $1 \mu\text{V}$ のときには動作しなくてよいというわけにはいきません。

そこで、ゲインをとっても大きくとることで、不定な論理レベルが出力される確率(ビット・エラー・レート)がととても低くなるようにします。ビット・エラー・レートは利用されるシステムによっても違いますが、 1×10^{-10} 程度とするのが普通です。

● どのくらいのゲインが必要か？

コンパレータに必要なゲインを計算してみましょう。

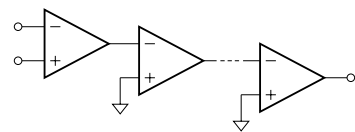


図11-4 大きなゲインのコンパレータを作る方法その①…コンパレータを従属接続する

コンパレータのゲインを A 、入力電圧を V_{in} 、不定となる出力電圧範囲を V_{danger} とすると、

$$|V_{in}| < \frac{V_{danger}}{A} \dots\dots\dots (11-3)$$

が満たされる場合に、ゲインが不足して正しくない値が出力されます。

このような範囲の電圧が入力される確率 P_{err} は、入力信号が入力電圧範囲 V_{range} 内で均等に分布していると仮定すると、

$$P_{err} = \frac{V_{danger} / A}{V_{range}} \dots\dots\dots (11-4)$$

となります。 V_{danger} と V_{range} をともに $\pm 1 \text{ V}$ とすると、式(11-4)は、

$$P_{err} = \frac{1}{A} \dots\dots\dots (11-5)$$

となります。 1×10^{-10} 程度のビット・エラー・レートを実現するためには、

$$A = \frac{1}{P_{err}} = 1 \times 10^{10} = 200 \text{ dB} \dots\dots\dots (11-6)$$

の増幅率が必要になります。増幅段1段では 60 dB 程度の増幅率ですから、 200 dB は増幅段が4段必要です。これはなかなか大きな値ですね。

● 正帰還で大きなゲインを得る

どのようにして、 200 dB などという大きなゲインを実現したらよいのでしょうか。

図11-4に示すように、増幅回路を従属接続が一番最初に思いつくでしょう。

このような構成で 200 dB を実現するためには、4段程度の増幅段が必要です。コンパレータは、OPアンプと違って出力から負帰還をかけないため、4段従属接続しても、動作が不安定になるなどの問題は起きません。ただし段数を増やしたぶん、消費電力が増えます。

増幅回路の多段接続以外に、簡単な回路で大きなゲインを得る方法があります。それは正帰還を利用する方法です。負帰還では、出力が増えたら、入力を減らすというように制御しますが、正帰還は出力が増えたら、入力も増やすように制御します。

正帰還回路の出力信号は時間とともに増大しますから、ある一定時間待ってから、出力信号を取り出すことで、等価的にゲインの大きな増幅器を作ることができます。

