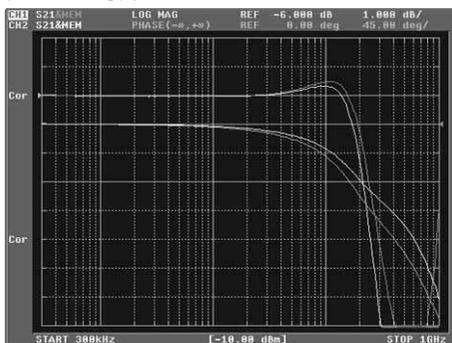


ICレビュー 実験室

8 高速OPアンプの評価(後編)

川田 章弘
Akihiro Kawata



前回に続いて、高速OPアンプの周波数特性と相互変調ひずみを調べてみることにします。今回は後編として、非反転増幅器(+1倍)/反転増幅器(-1倍)の相互変調ひずみについて調べます。

各OPアンプで使用した評価回路の抵抗値は、前回(2004年7月号)の表7-1を参照してください。

非線形性の測定方法

相互変調ひずみの測定には、スペクトル・アナライザ R3273を使用しました。

評価方法は図8-1に示すとおりです。2台のシグナル・ジェネレータを使用し、パワー・コンバイナで合成することで2信号を作っています。2信号間は100 kHz 離しました($\Delta f = 100 \text{ kHz}$)。

高調波ひずみとは

図8-2および図8-3に示すように、バイポーラ・トランジスタやJFETの入出力伝達特性は非線形性をもっています。

基本波周波数の信号を入力すると、2倍、3倍…の

周波数成分が出力に生じます。この2倍、3倍の成分を、それぞれ2次高調波ひずみ、3次高調波ひずみと呼びます。入出力間の非線形性によって、高調波ひずみが生じることを数学的に説明したのが図8-4です。

この高調波ひずみは、増幅器にとってみれば不要な信号です。しかし、無線通信に使用する電子回路などでは、この高調波ひずみが発生することを利用して周波数通倍を行うことがあります。現在、周波数通倍といえばPLLを使う方法が主流です。しかし、高調波ひずみを取り出せば、信号の周波数を2倍、3倍にできるということは知っておいてよい技術でしょう。

高調波ひずみについての数学的な説明には、ちょっと辟易してしまった人もいると思いますが、もう少し辛抱して図8-5を見てください。信号を差動で取り扱おうと、2次ひずみがキャンセルされることがわかると思っています。

実際は、完全に差動で動作する回路を作ることは無理なので、2次ひずみは発生してしまうのですが、それでも2次ひずみを軽減する効果は期待できます。差動増幅の利点は、こんなところにもあるのです。

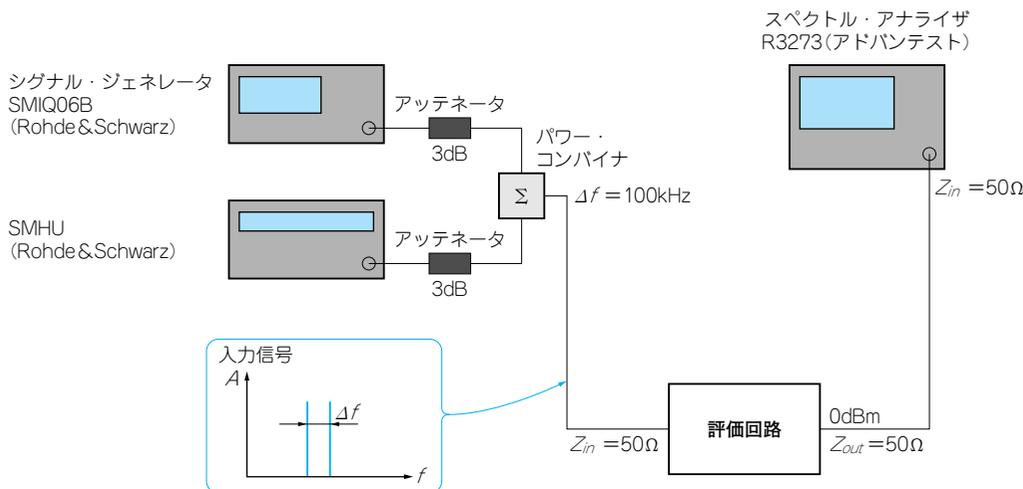
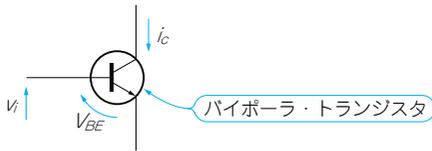


図8-1 IP_2/IP_3 の評価方法



バイポーラ・トランジスタ

$$i_c = I_S \exp \frac{V_{BE}}{V_T} \exp \frac{V_C}{V_T}$$

ただし、 $V_T = kT/q \approx 26\text{mV}$ 、 I_S ：飽和電流、 k ：ボルツマン定数 ($1.38 \times 10^{-23}\text{JK}$)、 T ：絶対温度 ($300\text{K} @ 27^\circ\text{C}$)、 q ：キャリア(電子)の電荷 ($1.6 \times 10^{-19}\text{C}$)

$$I_C = I_S \exp \frac{V_{BE}}{V_T} \text{をバイアス電流とすると、}$$

$$i_c = I_C \exp \frac{V_i}{V_T}$$

べき級数展開すると、

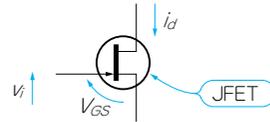
$$i_c = I_C \left(1 + \frac{V_i}{V_T} + \frac{1}{2!} \left(\frac{V_i}{V_T} \right)^2 + \frac{1}{3!} \left(\frac{V_i}{V_T} \right)^3 + \dots \right)$$

よって、

$$V_o = a_1 V_i + a_2 V_i^2 + a_3 V_i^3 + \dots$$

と考えることができる

図8-2 バイポーラ・トランジスタは非線形性



JFET

$$i_d = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS} + V_i}{V_P} \right)^2$$

ただし、 V_P ：ピンチオフ電圧

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2 \text{をバイアス電流とすると、}$$

$$i_d = I_D + I_{DSS} \left\{ \left(1 - \frac{V_i}{V_P} \right)^2 + \frac{2V_{GS} V_i}{V_P} - 1 \right\}$$

また、エンハンスメント・モードのFETでは、

$$I_D = K (V_{GS} - V_{th})^2$$

ただし、 K ：定数、 V_{th} ：スレッシュホールド電圧

ディプレッション・モードのFETでは、

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_{th}} \right)^2$$

であるため、いずれも3乗の項は含まない。

よって、理想的には、

$$V_o = a_1 V_i + a_2 V_i^2 + a_4 V_i^4 + \dots$$

と考えることができる

図8-3 JFETは非線形性

アンプなどの非線形は、

$$V_o = a_1 V_i + a_2 V_i^2 + a_3 V_i^3 + \dots$$

と表すことができる。

$$V_i = A \cos \omega t \text{とすると、}$$

$$V_o = a_1 A \cos \omega t + a_2 A^2 \cos^2 \omega t + a_3 A^3 \cos^3 \omega t + \dots$$

2倍角の公式から、

$$\cos^2 \omega t = \frac{1 + \cos 2\omega t}{2}$$

3倍角の公式から、

$$\cos^3 \omega t = \frac{\cos 3\omega t + 3\cos \omega t}{4}$$

よって、

$$V_o = a_1 A \cos \omega t + \frac{a_2 A^2}{2} (1 + \cos 2\omega t) + \frac{a_3 A^3}{4} (\cos 3\omega t + 3\cos \omega t) \dots$$

$$= \frac{a_2 A^2}{2} + \underbrace{\left(a_1 A + \frac{3 a_3 A^3}{4} \right)}_{\text{基本波成分}} \cos \omega t + \frac{a_2 A^2}{2} \cos 2\omega t + \frac{a_3 A^3}{4} \cos 3\omega t + \dots$$

となり、高調波が発生することがわかる

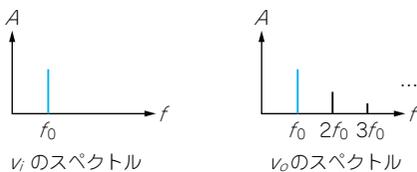
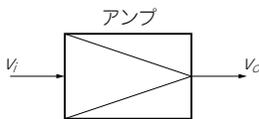


図8-4 非線形性によって高調波ひずみが発生することの証明

■ 相互変調ひずみで評価する

入出力の非線形性を評価するのに、高調波ひずみを測定するのは一般的です。しかし、高調波ひずみの評価では限界があることもあります。それは、増幅器の初段でひずみが発生しているのに、後段の回路で周波数帯域が低下している場合、高調波成分がフィルタリ

ングされて出力に現れなくなるからです。

出力に出てこないなら問題ないとも言えるのですが、入力される信号がシングル・トーンの正弦波ばかりであるとは限りません。オーディオ信号にしても、入力信号が正弦波であることはまれではないでしょうか。また、携帯電話のベース・バンド信号などはデジタル変調された広帯域信号となっています。そのような

