

第 4 章

見
本

通信用増幅回路

Walt Kester / 訳：細田裕司

通信システムの信号経路で使われるデバイスには、高周波領域での広いダイナミック・レンジが求められます。このダイナミック・レンジを主に制約するものは、増幅器やミキサなどの能動素子をもたらす歪みやノイズにほかなりません。かつての通信分野の増幅器は、適切な仕様のゲイン・ブロックを多用して構成されました。通常、それらはゲイン、帯域幅、歪みといった項目が通信システムの設計時に規定され、単体で動作するユニットとして供給されていました。それらのユニットが実際の通信用サブシステムとして利用されました。

しかしながら現在では、数百 MHz の帯域幅、低雑音、広いダイナミック・レンジ、そして柔軟な電源電圧仕様をもつ OP アンプが、通信システムにおける一般的な構成要素となっています。OP アンプのゲイン設定は容易であり、良好な性能が期待できます。

4-1 通信分野で特有の仕様項目

高周波 OP アンプは、従来からの交流特性(帯域幅、スルー・レート、セトリング・タイム)だけでなく、通信分野で特有の仕様についても十分に規定される必要があります。この仕様には、高調波歪み、スプリアス・フリー・ダイナミック・レンジ(spurious free dynamic range ; SFDR)、相互変調歪み、インターセプト・ポイント(intercept point, IP_2 , IP_3)、ノイズ、そしてノイズ・フィギュア(noise figure ; NF)といった項目が含まれます。表 4-1 に、それらを示します。

この節では、これらの仕様について検討を行い、無線および有線の通信システムで使用される増幅回路への適用方法について考察します。さらに、特定のアプリケーションに特化した増幅器として、可変ゲイン・アンプ(variable gain amplifier ; VGA)、CATV ドライバ、そして xDSL ドライバについても解説します。

表4-1 通信システムにおけるノイズと歪みの仕様

- ノイズ
 - ・入力に換算したノイズ(RTI ; referred to input)
 - ・出力に現れるノイズ(RTO ; referred to output)
- 歪み
 - ・2次および3次インターセプト・ポイント(IP_2, IP_3)
 - ・スプリアス・フリー・ダイナミック・レンジ(SFDR)
 - ・高調波歪み
 - シングル・トーン
 - マルチトーン
 - 帯域外
 - ・マルチトーン電力比(MTPR ; multitone power ratio)
 - ・ノイズ・ファクタ(F), ノイズ・フィギュア(NF ; noise figure)

●歪みに関する仕様

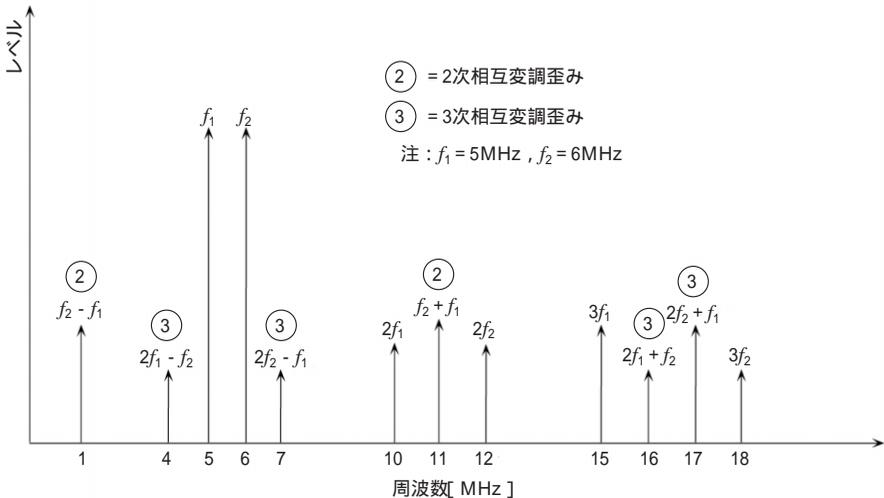
純粋な単一周波数のサイン波が増幅器(あるいは他の能動素子)を通過すると、その特性と非直線性に依りてさまざまな高調波歪みが発生します。ここで、サイン波の周波数を変えながら高調波歪みを測定しただけでは、通信用途に使用する増幅器の真の性能を評価するには不十分です。多くの通信システムでは、周波数領域で多重化した多数のチャネルを使っています。そのために、二つあるいはそれ以上の規定された周波数での相互変調歪み(intermodulation distortion ; IMD)の量を用いて、増幅器を評価することが必要になります。

無線受信機では、高周波(RF)と中間周波数(IF)の領域での相互変調歪みはとりわけ重要であり、回路設計上の主要な関心事になります。シングル・トーンのサイン波を入力して単純に高調波歪みや全高調波歪み(THD)を評価するより、ツー・トーン信号による歪みの発生を調べるほうが有用なことが多いのです。

図4-1に示すように、ツー・トーン信号は2次および3次相互変調積を発生させます。この例は、周波数が f_1 と f_2 の二つの信号を非線形素子に加えたときに発生する、2次と3次の相互変調積を示しています。周波数軸の $f_2 + f_1$ と $f_2 - f_1$ にある2次相互変調積は、ツー・トーン信号からずっと離れたところにあり、フィルタで取り除くことができます。また、 $2f_1 + f_2$ と $2f_2 + f_1$ の周波数にある3次相互変調積も、同様に除去することが可能でしょう。しかしながら、 $2f_1 - f_2$ と $2f_2 - f_1$ の周波数にある3次相互変調積は、もとの信号の近傍にあるため、フィルタで取り除くことは困難になります。

とくに、帯域中のチャネル間隔が一定であるマルチチャネル通信システムでは、3次相互変調積が問題を起こしやすくなります。大信号により発生する3次相互変調積により、小信号が覆い隠されてしまう場合があるからです。

図 4-1 2次と3次の相互変調歪み(IMD)



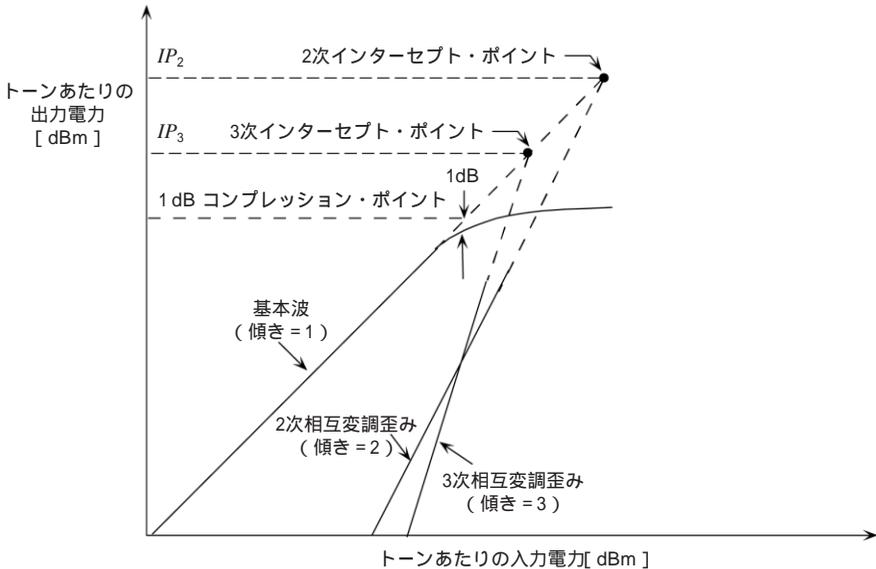
通常、図 4-2 のように、3 次相互変調歪みは IP_3 の値を使って規定します。ここでは、周波数の近い二つのサイン波(ツー・トーン信号)を同時にシステムに加えている状態です。この図は、シングル・トーンの入力信号電力(dBm)とともに、3 次相互変調歪みの(シングル・トーンに対する)相対値を、入力信号電力の関数としてプロットしたものです。基本波に対する関数は傾き 1 のカーブとして表されます。システムの非線形性をべき級数展開で近似すると、2 次相互変調歪みの振幅は信号入力が 1 dB 増加するごとに 2 dB 増加するので、これを傾き 2 のカーブとして図に表してあります。

同様に、3 次相互変調歪みの振幅は入力信号が 1 dB 増加するごとに 3 dB 増加するので、傾き 3 のカーブで表されることとなります。低レベルのツー・トーン入力信号を使って 2 点をプロットすれば、図 4-2 に示すように、2 次と 3 次相互変調歪みの直線を引くことができます(傾きが既知なので通過点がわかれば直線が決まる)。

しかし現実には、入力信号が特定のレベルを越えると、出力信号の増加が頭打ちになりはじめます。これは、出力がコンプレッション(compression; 圧縮)を受けはじめると言うことができます。ここで注目すべきパラメータが、1 dB コンプレッション・ポイント($P_{1\text{dB}}$)であり、これは、出力信号が理想的な出力のレベルより 1 dB 圧縮されるポイントです。図 4-2 において、理想的な傾き 1 の直線が破線で示されている領域は、実際には実線で示されるように出力が圧縮されることを示しています。

ここで、2 次および 3 次相互変調歪みの直線を延長すると、理想的な出力応答を表す破

図4-2 インターセプト・ポイントと1 dB コンプレッション・ポイント



線の延長部分と交差します。ここが、2次および3次インターセプト・ポイント、つまり IP_2 、 IP_3 と呼ばれるものです。これらは、デバイスが整合負荷(通常 50 Ω)だが、このかぎりではない)に供給する出力電力を dBm で表します。

IP_2 、 IP_3 、1 dB コンプレッション・ポイントはいずれも周波数の関数であり、高い周波数になるほど歪みは悪化します。

与えられた周波数での3次インターセプト・ポイントを知れば、出力信号レベルから3次相互変調歪みの概略のレベルを求めることができます。図4-3は、一般的な広帯域低歪み増幅器の3次インターセプト・ポイントの周波数特性を示しています。

例として、信号を 5 MHz と仮定し、OP アンプが 100 Ω 負荷(信号源抵抗と終端負荷のそれぞれが 50 Ω)に対して、 $2 V_{pp}$ の出力を与えているとします。したがって、50 Ω 負荷での電圧は $1 V_{pp}$ 、dBm で表すと +4 dBm となります。図4-3から、5 MHz での3次インターセプト・ポイントは 36 dBm と読めるので、その差は 32 dB です。この値を2倍すると 64 dB(シングル・トーン出力に対する3次相互変調歪み)となるので、3次相互変調歪みは -64 dBc(キャリア出力に対してのdB値)、あるいは電力値で -60 dBm と求められます。

図4-4は、この関係を図示したものです。 IP_2 を使えば、同様にして2次相互変調歪み