

ミックスド・シグナルLSI設計 における信号の取り扱い

——周波数領域、サンプリング、A-D/D-A変換時の問題

湯川 彰



ミックスド・シグナル回路を扱う場合、周波数領域やサンプリング理論の理解は避けて通れない。ここでは、こうしたアナログ信号を取り扱う際に必要となる基礎知識や基本的な概念についておさらいする。また、A-D変換やD-A変換における問題についても解説する。なお、フーリエ変換やラプラス変換、 z 変換の複素関数論などの詳細については、説明を省いた。必要に応じて、専門書を参照していただきたい。

(編集部)

最近、ノイズが原因と思われる回路動作の不具合の報告を受け、そのレポートに入力信号波形と電源ノイズ波形のデータが付いていました。オシロスコープの波形ですが、ディジタル・オシロスコープでした。ノイズによる誤動作かどうかを検討するためにピーク・ツー・ピーク(peak-to-peak)でどのくらいの変動があるのかを確認しようと思ったのですが、相手はパルス性のノイズです。ピーク値をサンプリングできている保証はありません。

アナログ・オシロスコープであれば、システムが応答する周波数帯域を知っていれば、ピーク値を推定できます。しかし、ディジタル・オシロスコープでは、入力のア-Dコンバータへ入力するプリアンプの帯域に加えて、A-Dコンバータの前に折り返しノイズ防止(anti-aliasing)フィルタが付いているのか、付いているのであればフィルタの種類は何で、カットオフ周波数はいくらかを調べ、目的に合わせて観測できているかどうかを判断しなければなりません。

ここでは、これらを考えるうえで基礎となるアナログ信号の取り扱いについて解説します。

● フーリエ変換を使って周波数平面に展開

オシロスコープで観測すると、私たちが取り扱っている

電気信号は電圧や電流が時間的に変化している波形であることがわかります。この信号は、いろいろな周波数と位相を持った正弦波を足し合わせて成り立っていると考えることができます。これを「重ね合わせ」と呼びます。

正弦波の各周波数成分の表現方法には、極座標を用いて振幅と位相角で表現する方法と、直交座標を用いて正弦($\sin$)成分と余弦($\cos$)成分の2成分で表現する方法があります。極座標による表現は回路解析で、直交座標による表現は信号の演算を行うときによく用いられます。

時間的に変化する信号を解析するとき、回路にコイルやコンデンサが含まれていると、微分方程式を解く必要があります。ここで、回路が線形素子で構成されていると近似できれば、信号を周波数と位相を持った正弦波に変換して周波数領域に持ち込み、応答特性を複素数の四則演算で解析できます。この変換が「フーリエ変換」です。

なお、フーリエ変換は正弦波の重ね合わせを前提としているので、定常的な波形しか扱えません。そこで、これを例えば一定傾斜で増加する波形(ランプ波)や指数関数的に減衰する波形なども扱えるように拡張したものが「ラプラス変換」です。

フーリエ変換に関する説明は専門書に譲りますが、フーリエ変換した後の周波数領域における2種類のグラフがアナログ・ディジタル混載の回路設計でよく使われます。その一つは x 軸を周波数、 y 軸を利得や振幅、位相にしてプロットしたグラフです。とくに信号の伝達特性をプロットしたグラフは「ボード線図」と呼ばれます。

OPアンプ(演算増幅器)の利得と位相の周波数特性をプロットしたものは、OPアンプの設計では欠かせないグラフです。図1にOPアンプ回路のオープン・ループ特性をプロットしたものを示します。低周波利得の大きさ、ユニテ

イ利得周波数^{注1}，位相余裕^{注2}，利得余裕^{注3}を見て，目的に使えるかどうかを判断します．この図面では内部の接点の特性もプロットしています．このように，内部の接点を合わせて観測することで，どこを改善する必要があるかを判断する指標を得ることができます．

図1の実線は利得を，破線は入力正弦波に対する位相変化を示しています．この回路では数字が大きいほど後ろの端子になっています．入力差動段の一方の出力であるAの端子で大きく位相が回っていますが，次段に相当するB，Cではそれほど位相回転は早くありません．このことは，ここでは出力していないほかの信号経路による寄与が大きいことを示しています．そして，回路的なバランスが悪い

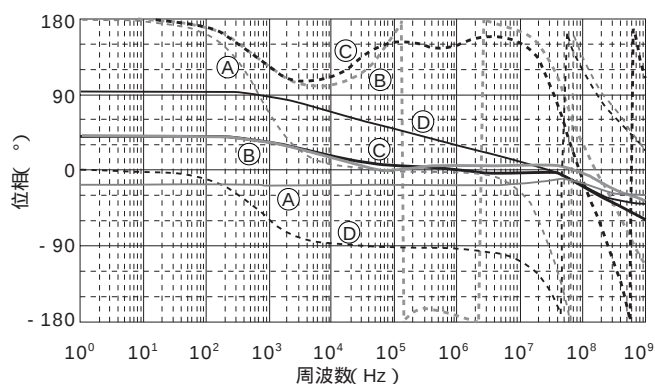


図1 プッシュプル・アンプの周波数特性

実線は振幅特性，破線は位相特性．Aは入力段の出力，B，Cはプッシュプル駆動点，Dは出力．初段での位相回転が大きすぎる．

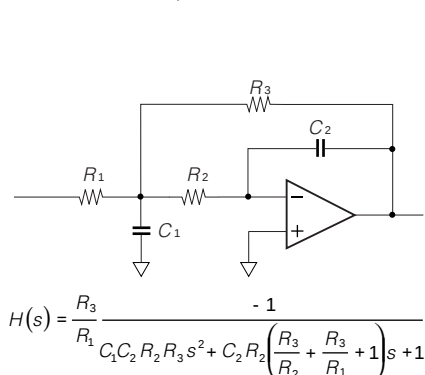


図2 2次アクティブ・フィルタ回路

オーバ・サンプル型A-Dコンバータなどによく用いられる．極の位置が抵抗とコンデンサの値で決まるため，周波数特性の高精度化は困難．信号源インピーダンスも極の位置に影響を与える．

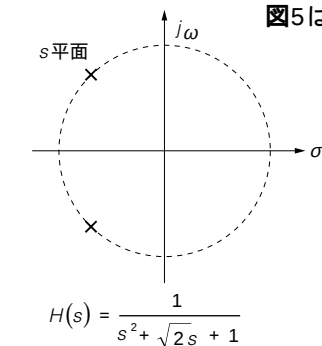


図3 2次パワース・フィルタの極の位置

2次のアクティブ・フィルタをパワース型としたときの極の位置．パワース型のフィルタでは，極は原点を中心とする円上に等間隔に並ぶ．

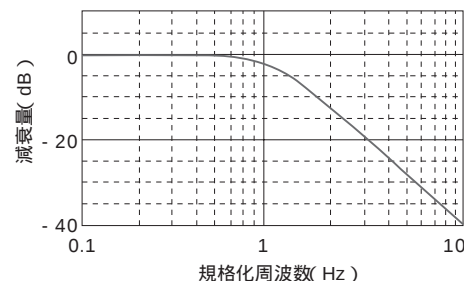


図4 2次パワース・フィルタの周波数特性

2次であるので，周波数が1けた上になると40dBの減衰となる．

とを示しており，対策が必要なことが読みとれます．

もう一つのよく使うグラフは，伝達特性の関数の分母がゼロとなる極，そして分子がゼロとなるゼロ点の実数部と虚数部の位置をプロットしたものです．とくに極の実数部が負でなければ，その回路は安定して動作しないことが知られています． z 平面上の極軌跡のほうが分析によく使われますが，ここでは2次のアクティブ・フィルタ回路とラプラス面上の伝達関数を図2に示します．このフィルタがパワース特性(通過域がフラットな特性)を持つように設計したときの極の配置は，図3に示すように原点を中心とする円上の位置になります．周波数特性は，図4に示すように周波数が1けた上になると40dBの減衰となります．

● サンプリング周波数に依存する折り返しノイズ

デジタル信号処理を行うための入力信号は，等しい時間間隔でサンプリングすることにより，アナログ信号をデジタル・データに変換したものであることを前提としています．信号をサンプリングするとき，サンプリング周期の逆数，すなわちサンプリング周波数の半分の周波数を「ナイキスト周波数」と呼びます．この周波数以下の周波数成分の信号はデジタル・データに忠実に変換されますが，それ以上の周波数はナイキスト周波数以下の周波数に変換されてしまいます．これを「信号の折り返し」と言い，ノイズとなるのが普通なので，「折り返しノイズ」と呼びます．

図5は16回サンプリングする間に1周期と17周期の正弦

注1：ユニティ利得周波数は，演算増幅回路をフィードバックのない状態で動作させたとき，入力から出力への利得が1となる周波数．OPアンプの直流利得は大きいですが，周波数が高くなるにしたがって利得は低下する．利得が1になる周波数は，その回路がどのくらいの周波数まで使えるかの指標となる．

注2：位相余裕はユニティ利得周波数における正転入力から出力への位相特性で，位相が180°回転するまで何°残っているかを示す．帰還増幅器を構成するときの安定度の指標であり，スイッチ・キャパシタ回路などを構成したときには出力が安定するまでどのくらいかかるかの指標となる．なお，アナログ増幅器として使うときは45°以上，サンプル・ホールドなどでは60°以上の位相余裕が必要なが多い．

注3：利得余裕は，位相が180°回転する周波数において利得が負に何dBあるかを示す．位相が180°回転して利得が1を超えると発振するので，利得余裕は6dB以上あることが望ましい．