

基礎から学ぶ
『EMI&シグナル・インテグリティ』

第2回：信号波形とプリント基板の等価回路

池田三喜夫

前回到続いて、高速デジタル回路を設計する際に必要となる電気信号の基礎知識について解説する。まず、デジタル回路における理想的な波形と実際の波形の違いを示す。回路の動作周波数が上がると、デジタルであっても交流信号の集まりと見なして、アナログ的に取り扱う必要がある。次に、プリント基板の配線パターンやビアのモデリングの考え方について解説する。 (編集部)

からっとした季節になってきたので、先日、久しぶりに秋葉原へ行ってきました。どこの店先にもIT (information technology) 革命の原動力となる最新の携帯電話、パソコン、ゲーム機器などがあふれており、多くの人がむらがっていました。筆者も娘にテレビ・ゲームのセットをせがまれてしまい、思わぬ出費をしてしまいました。娘は家に帰るやいなやさっそくゲームを始めましたが、その画像の鮮明さと応答の早さにあらためて驚かされました。新しいゲーム機器、あるいはゲーム・ソフトの大作が発売されるたびに、多くの人が徹夜で並んでしまう理由がわかるような気がします。

さて、前回はマイクロプロセッサや電子回路の高速化の歴史から始まって、高速回路設計を行ううえでの注意点、オーバ・シュート、アンダ・シュート、リングングなどの信号ノイズを抑えるためのシグナル・インテグリティ (信号波形の品質) について説明しました。今回はその続きです。

1. 電気信号の基礎知識(承前)

●デジタル信号を交流信号の集まりとして考える

デジタル信号波形の理想の形が台形波形であることは、前回お話ししました。この台形波が(前段の)ICから出力されて、プリント基板の配線を経由してそのままの形で、接続されている(後段の)ICの入力に伝搬されればなんの問題も発生しないわけです。しかし、現実にはそう単純ではありません。なぜなら、ICや基板には必ずインダクタンス L やキャパシタ

ンス C の成分が含まれており、信号波形のもつ固有の周波数の値によっては、インダクタンスの抵抗成分 $j\omega L$ が0から無限大に、キャパシタンスの抵抗成分 $1/j\omega C$ は逆に無限大から0に変化するからです。

デジタル信号には、電圧や電流が変化している過渡状態と変化していない定常状態があります。定常状態では信号は変化しないので、信号波形のもつ周波数は0となり、インダクタンスの抵抗成分は0、キャパシタンスの抵抗成分は無限大になります。ところが過渡状態では信号はある周波数で変化しており、信号波形にはその基本周波数に加えて、基本周波数の整数倍の成分(高調波)が含まれます。周波数が異なれば、当然インダクタンスとキャパシタンスのもつ抵抗成分が変わってくるので、デジタル信号波形の過渡解析を正確に行うためには、すべての周波数で計算を行わなければなりません。

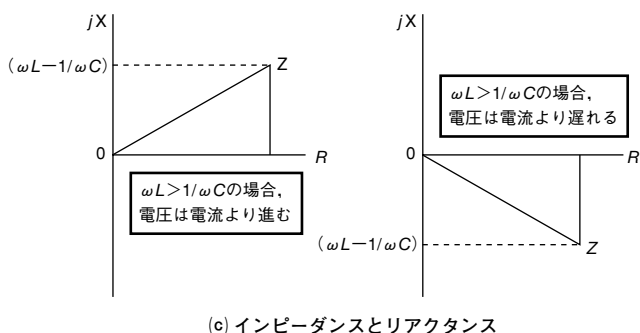
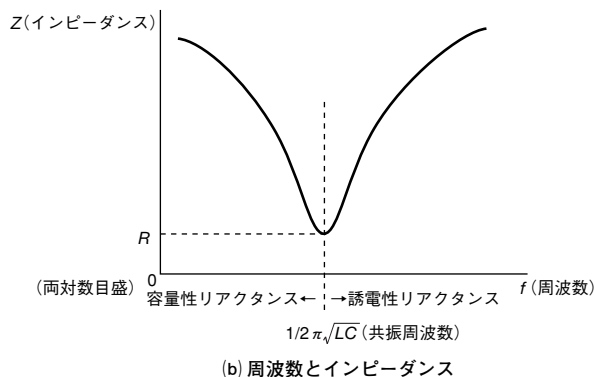
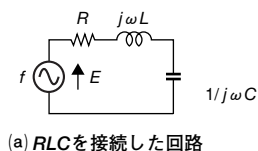
信号がある周波数で変化するということは、デジタル信号は交流信号として考える必要があるということです。純粋にインダクタンスとキャパシタンスだけから成り立っている回路をリアクタンス回路と呼びますが、現実には少なからず純抵抗が存在するのでその抵抗分を加える必要があります。しかし、純抵抗に交流電圧をかけたときの電流は直ちに流れますが、インダクタンスに流れる電流は電圧より位相が 90° 遅れ、キャパシタンスに流れる電流は反対に位相が 90° 進むので、単純にそのまま加えることはできません。すなわち、複素数で表すインピーダンスという考え方が必要になります。

L の抵抗成分は $j\omega L$ 、 C の抵抗成分は $1/j\omega C$ で表されるので、純抵抗 R を加えたときの複素インピーダンスは以下の式で求められます。

$$Z = R + j(\omega L - 1/\omega C) [\Omega]$$

ここで ω は角周波数で、 $\omega = 2\pi f$ (f は周波数) となります。 j は複素数を意味します。

RLC を接続した場合、複素インピーダンス Z の虚数部分



〔図1〕 周波数とインピーダンスの関係

RLCを接続した場合、複素インピーダンス Z の虚数部分 $(\omega L - 1/\omega C)$ をこの回路のもつリアクタンスと呼ぶ。リアクタンスが0、すなわち ωL の値と $1/\omega C$ の値が等しいときに、インピーダンスが最小になる。このときの周波数 $f = 1/2\pi\sqrt{LC}$ を共振周波数と呼び、回路には最大の電流が流れるため、放射ノイズ発生大きな原因となる。また、 ωL が $1/\omega C$ より大きいときに誘導性リアクタンスとなり、電圧の位相が電流の位相よりプラス方向に進む。逆に ωL が $1/\omega C$ より小さいときには容量性リアクタンスとなり、電圧の位相は電流の位相よりマイナス方向に進む。これは、一つの信号波形であっても信号のもつ基本周波数の整数倍の高調波成分をもっているため、その高調波の周波数の大きさによって電流の位相が電圧の位相より進んだり遅れたりすることを意味している。

$(\omega L - 1/\omega C)$ をこの回路のもつリアクタンスと呼び、リアクタンスが0、すなわち ωL の値と $1/\omega C$ の値が等しいときにインピーダンスが最小になることがわかります。このときの周波数 $f = 1/2\pi\sqrt{LC}$ を共振周波数と呼び、最大の電流が流れるため、放射ノイズが発生する大きな要因となります。また、 ωL が $1/\omega C$ より大きいときには誘導性リアクタンスとなって電圧は電流よりプラス方向に進み、逆に ωL が $1/\omega C$ より小さいときには容量性リアクタンスとなって電圧は電流よりマイナス方向に進むこともわかります。これは一つの信号波形でも信号のもつ基本周波数の整数倍の高調波成分を含んでいるため、その高調波の周波数の大きさによっては電流の位相が電圧の位相より進んだり遅れたりすることを意味しています(図1)。

●理想的な波形と実際の波形の違い

このあたりで少し話を切り替えて、いろいろな回路を伝搬したときの信号波形の変化について説明していきましょう。抵抗、インダクタンス、キャパシタンスを回路に接続した場合、信号波形にどのような影響がでるのでしょうか。それをシミュレータで解析してみました。

実際の回路に理想的な台形波を入力信号として与えた場合、接続されている受動素子の種類によっては信号波形がさまざまに変化します。ときには、信号ノイズが発生する場合があります。それでは5種類の回路の例を挙げて、その違いを説明していきます。それぞれの回路について、理論的に考えられる入出力波形(理想的な波形)と、配線を含んだ実際の回路を解析したときの波形を表1に示します。

(1) Rの波形

まずは抵抗だけを接続した回路を考えてみましょう。回路には純抵抗だけが接続されているわけですから、入力した信号波形のもつ周波数成分の影響は受けません。オームの法則にしたがい、接続している抵抗の値で入力電圧を分圧しただけの波形になります。したがって信号波形の品質に対してなにも影響を及ぼさず、電圧が論理しきい値を超えていれば、信号の遅延以外の問題は発生しません。ただし、実際の回路では抵抗器を接続すると、リードにインダクタンスやキャパシタンスの成分が存在します。現実には純抵抗だけで考えられる回路というものは存在しません。

(2) RCの波形

次に、終端抵抗の代わりに C (静電容量)を、 R とグラウンドの間に接続した回路について考えてみます。台形波の信号を入力すると、波形が立ち上がっている間はキャパシタンスに充電されるまで電流が流れ、その後は定常状態になって電流が流れません。波形が立ち下がっている間はキャパシタンスに充電されてきた電圧源が抵抗を通して放電し、その後は定常状態になります。これは、キャパシタンスの両端間の電圧が急激に変化しないため、ある時間をかけしだいに変化していくからです。この時間を回路のもつ「時定数」と呼びます。このときに流れる電流はキャパシタンスの両端間の電圧が変化したときに一番多く流れ、定常状態では0になります。このことから電流は電圧に対して位相が 90° 進んでいることがわかります。また、数学的に見ると出力波形は入力波形を積分したものに近くなるので、この回路を積分回路と呼んでいます。

キャパシタンスに電荷が蓄積されないと電圧は上昇しないので、電圧的に見ると信号波形はなまってきます。 C の値が大きくなるほど、この信号波形の立ち上がりの傾きは小さくなります。回路に接続されている負荷の容量があまりにも大きくなると、信号の立ち上がりが遅くなってしまいます。すなわち、伝送線路による信号の遅延が大きくなりすぎて、信