

高速デジタル回路 計測入門

第4回 (最終回)

物理層のシミュレーション

明石芳雄



前回(本誌2003年10月号, pp.156-163)は、計測器を使った伝送線路の計測方法について解説しました。今回は、伝送線路のシミュレーションについて解説します。伝送線路の解析には、回路シミュレータ(または伝送線路シミュレータ)と伝送線路モデルを使用します。ここでは、伝送線路の測定結果とシミュレーション結果の比較も示します。(編集部)

今回は、連載の最後として、シミュレーションについて説明したいと思います。過去3回の記事の中で、シミュレーションについて触れましたが、ここではシミュレータを使った伝送線路の設計例や測定値との比較例を示します。また、シミュレーションを行う際に注意すべき点について述べます。

●物理層の解析には回路シミュレータを使用する

本誌の読者である皆さんは、すでにシミュレータを使用している方が少なくないと思います。ここでは、高速デジタル信号を伝搬させる伝送線路をシミュレータによって解析することを前提に、シミュレーションに必要な要件について述べます。

電気回路のシミュレーションとは、回路の動作を計算によって求めることであり、そのためには使用される部品の「動作(ふるまい)」を数値化、関数化して、コンピュータで計算できるように定義する必要があります。一般に、シミュレーションで使用する回路部品を「モデル」と呼びます(右掲のコラム「ドライバ/レシーバのインピーダンス」を参照)。

物理層の回路をシミュレーションするためには、ドライバやレシーバ、伝送線路の動作、あるいは伝送線路における反射や損失、クロストークといった現象をシミュレータ

によって模擬する必要があります。また、回路の各ノードにおいて「キルヒホッフ(Kirchhoff)の法則」が満たされるように、回路方程式を解かなければなりません。このようなシミュレータの代表格が「SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)」です。

●伝送線路モデルを作成する三つの方法

物理層のシミュレーションを行うには、伝送線路の動作を正確に表わすモデルが必要となります。本連載の第1回(本誌2003年6月号, pp.102-109)でも述べたように、伝送線路はインダクタンスとキャパシタンスによってモデル化することができます。しかし、高周波になると、この方法では伝送線路の動作を正確に表現できなくなります。高周波で使用することを考えた場合、以下のような三つの手段を検討する必要があります。

1) 回路シミュレータの伝送線路モデルを使用する

高速デジタル信号を伝搬させるPCI ExpressやXAUI (10Gigabit attachment unit interface)などの物理層のシミュレーションは、もはやマイクロ波回路の世界となります。マイクロ波回路では、伝送線路を単なる信号伝搬経路ではなく、回路を構成する部品として積極的に使用します。したがって、比較的古くから伝送線路モデルの考えかたが利用されています。当然、高速デジタル信号を伝搬する伝送線路でも、同じモデルを使用できます。伝送線路モデルは、物理寸法や材料特性(比誘電率、誘電体損失、導電率)の情報をもとに電気的特性が計算されます。一般に、あらかじめ定義された計算式を用いているため、非常に短い時間でモデルが計算されます。

2) 測定値を用いる

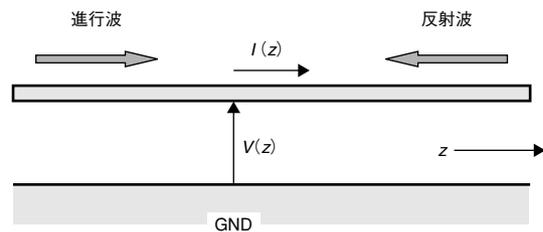
回路シミュレータの中には、測定したSパラメータを読

み込み、シミュレーションする機能を持っているものがあります。この機能を利用すると、ネットワーク・アナライザで測定したSパラメータを、そのままシミュレーションに使用できます。また、伝送線路モデルを作成できないような複雑な形状のパターンでも、測定によってSパラメータを求めることができればシミュレーションを行えます。ただし、測定した形状の伝送線路にしか対応できないため、伝送線路の長さや幅が変わるたびにパターンを作成し、実測しなければなりません。つまり、この方法は手間がかかり、汎用性に乏しいと言えます。また、後述しますが、測定に必要なコネクタなどの影響を取り除く必要があるため、測定するだけでも相当な技量が必要となります。

3) 電磁界解析を行う

一般に、回路シミュレータがあらかじめ用意している伝送線路モデルは、マイクロストリップ線路やストリップ線路、コプレーナ線路などに限られます。そのため、高速デジタル回路で使用されるような、多層で複雑な配線のシミュレーションを行うには不十分な場合があります。

そこで、多層の基板や多数並行して走る線路の動作を正確に解析するためには「電磁界シミュレータ」が必要となります^注。伝送線路モデルを作成する場合と同様、電磁界シミュレータには物理寸法と材料特性の情報を与えますが、形状を図形として入力するため、任意形状パターンの電気特性を求めることができます。電磁界シミュレータは、「マクスウェル(Maxwell)の方程式」を数値解析で解くことにより、電気的特性を求めます。マクスウェルの方程式の解きかたには、モーメント法や有限要素法、FDTD (finite



〔図1〕伝送線路の進行波/反射波と電圧/電流

信号の伝搬方向をzとした場合の伝送線路上の進行波と反射波を示す。また、任意のzにおける電圧電流をV(z)、I(z)とする。

difference time domain) 法， TLM (transmission line matrix) 法など、いくつかの計算手法があります。

電磁界解析は非常に汎用性が高く、便利なツールなのですが、その反面シミュレーションに要する時間が長く、また、必要なメモリ容量も多くなります。

●伝送線路は特性インピーダンスと伝搬定数でモデル化

ここで、伝送線路の基本的なモデルを紹介します。伝送線路は「特性インピーダンス」と「伝搬定数」という二つのパラメータによって特性を定義することができます。この二つのパラメータの意味を理解することは、伝送線路の設計を行う上で非常に役に立ちます。また、測定値や電磁界解析の結果をもとに、自分で伝送線路モデルを作成する際にも必要な知識です。

一般に、伝送線路上の任意の位置zにおける電圧と電流の関係は、以下のように表すことができます(図1)。

$$\begin{aligned}
 V(z) &= Ae^{-\gamma z} + Be^{\gamma z} \\
 I(z) &= \frac{1}{Z_c} (Ae^{-\gamma z} - Be^{\gamma z})
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

注：米国 Agilent Technologies 社の回路シミュレータである「ADS」には、多層線路に対応できる伝送線路モデルが存在する。実はこれは、電磁界解析を併用して解を求めている。

COLUMN

ドライバ/レシーバのインピーダンス

回路の信号波形をシミュレーションするためには、伝送線路のモデルだけでなく、伝送線路につながるLSI(デバイス)のモデルも必要です。しかし、LSIの回路のすべてをシミュレーションすると時間がかかり過ぎます。そこで、物理層の評価を行う際には、LSIのI/O部とパッケージの特性のみをモデルに含めます。LSIのI/O部のモデルには、IBIS(I/O buffer information specification)モデルやSPICEモデルなどが使用されます(IBISモデルについては参考文献6)で説

明されている)。

また、GHz帯のシミュレーションを行うとなると、パッケージの特性を無視できなくなります。これは、実際の測定値からモデル化を行うか、電磁界解析によって求めます。電磁界シミュレーションを行う場合でも、回路シミュレーションと同じように測定との比較・検証が必要であると筆者は考えます。