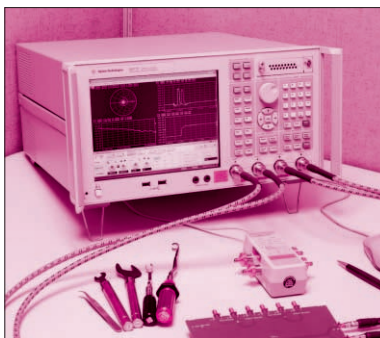


## 特集



## 第7章 反射波形によるインピーダンス測定やケーブル不良位置の特定など

### TDR とベクトル・ネットワーク・アナライザ

小室 貴紀  
Takanori Komuro

第5章で、インピーダンスの特殊な測定方法の一つとしてTDR(Time Domain Reflectometry)があることを述べました。第7章では、この手法について解説します。

TDRは、基本的にはDUTにステップ波を入力し、その応答波形からDUTのインピーダンスを求める手法です。いわば横軸時間でのインピーダンス測定であり、PG(パルス発生器)とオシロスコープを使って測定を行います。第5章で説明した手法は、いずれも正弦波入力に対するレスポンスを測定していますから、TDRはかなり毛色の異なった測定だと理解していただけるでしょう。

#### インピーダンス測定とTDR

#### ■ 同軸ケーブルをテスタ、インピーダンス・アナライザ、TDR法で測定すると?

- 50Ω同軸ケーブルを75Ωの抵抗器で終端したDUT  
DUTとして、特性インピーダンス50Ωで長さ1mの同軸ケーブルの先に75Ωの抵抗が付いているもの(図1)を考えましょう。注意してほしいのは、先端についている75Ωの抵抗だけではなく、ケーブルも含

めてDUTであることです。

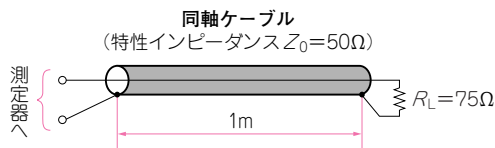
ケーブルの端点のうち、抵抗が付いていない側(図の左側)を測定器につなぎます。まずハンドヘルド・テスタを接続して抵抗値を測ると、当然ながら75Ωが読み取れます。このケーブルをインピーダンス・アナライザにつなぐと、ケーブルと抵抗を組み合わせたインピーダンスが読み取れるわけです。

さて、このDUTをTDRにつなぐと図2のような波形が見えます。この図から、ケーブルの特性と終端部の抵抗の値を別々に求めることができます。

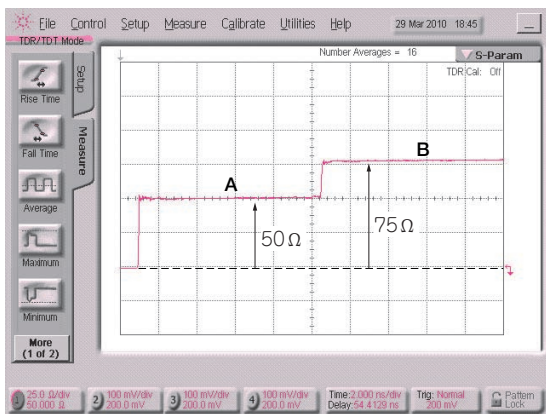
図中のAの部分は、ケーブルの特性インピーダンスに相当していますし、Bの部分は終端部の抵抗のインピーダンスに相当しています。

このようにTDRを使うと、ほかの手法と違った情報をDUTから取り出すことができます。

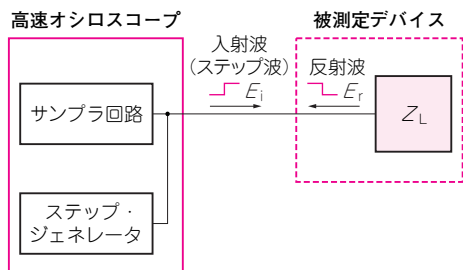
TDRはパルス波に対する応答が、時間とともにどのように変化していくかを観測することによって、DUTの性質を測定すると述べました。図3が基本的なTDR測定法の構成です。



〈図1〉 特性インピーダンス50Ωで長さ1mの同軸ケーブルの先に75Ωの抵抗を接続したDUT



〈図2〉 図1をTDR法で観測した波形(2 ns/div., 25 V/div.)



〈図3〉 基本的なTDR測定法の構成

### ● 50 Ω 同軸ケーブルを 50 Ω の抵抗で終端した DUT

次にケーブルの端点を同軸ケーブルの特性インピーダンスと同じ 50 Ω の抵抗で終端した場合を考えてみます。この場合は反射波が発生しないので、いつまでたってもステップ波形は返ってきません。これはいわば無限に長いケーブルと同じです。つまりこの例では、ケーブルと抵抗は同じ働きをしているわけです。

終端抵抗を付けずにテスタを使ってケーブルの(直流)抵抗を測っても 50 Ω と表示しませんが、この例では 50 Ω の抵抗と同じ働きをしているわけです。

私は数十年前に、特性インピーダンスや反射といった分布定数回路に特有の現象を電磁気学の講義で学びました。そのときには、単に数式を変形して結果をどのように解釈するかといった、いわば形而上学的な話題と感じていました。しかし、社会人となって TDR を扱うことにより、初めてこれらの現象を現実のものとして理解できるようになりました。

### ● ケーブル端を開放した場合——時間軸と位置の対応

今度は、ケーブルの先端に何も付いていない場合を考えてみます。PG を出たパルスはケーブル内を進んで行き、開放端に到達すると全反射して返ってきます。

オシロスコープで観測される波形は図 4 のようになります。最初の変化は、PG からステップ波が出力された時点で発生します。それまで 0 V だった信号が、立ち上がった状態です。このときの振幅は、PG から(ケーブルの特性インピーダンスである)50 Ω を負荷

とした場合の電圧が発生します。

次にステップ波がケーブルの開放端に到達すると全反射が起こり、反射波がケーブル内を逆方向に進み始めます。そして反射波が測定器に到達したときに、オシロスコープ上に変化が現れ、出力振幅は 2 倍になります。なお、図 4 では縦軸を Ω 単位に換算しているもので、表示は上に振り切れています。

このとき、最初の変化から次の変化までの時間は、ケーブル内部をステップ波が往復する時間に相当します。つまりこの期間は、信号が伝送していくケーブルの情報が表示されていると考えることができます。

ちなみに、ケーブル中を伝搬する電磁波は真空中を伝搬する場合よりも遅くなることを考慮に入れば、反射が帰ってくるまでの時間から換算することにより、ケーブルの物理的な長さを特定することが可能です。

### ● 負荷が抵抗とコンデンサの並列回路の場合

次に、ケーブルの先端に抵抗とコンデンサの並列回路が付いている場合を考えてみます。

まず、ステップ波がケーブルを往復する時間については、先の例と変わりません。その後は、負荷にステップ波が入力された場合の応答が観測されます。

大雑把に考えると、PG の出力インピーダンス 50 Ω と負荷抵抗で決まる駆動インピーダンスと容量によって決まる時定数にしたがって出力は上昇して行きます。このようすを図 5 に示します。

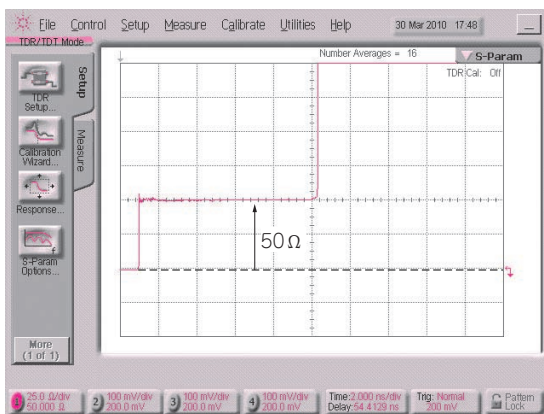
### ■ ケーブルの先にある負荷に応じた波形応答のまとめ

コンデンサの例でわかるように、ケーブルの先端に接続した負荷に応じて TDR の応答波形は変化します。つまり、負荷のインピーダンス  $Z_L$  と相関のある情報を取り出すことにより、TDR をインピーダンス測定に活用することができるのです。

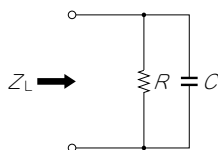
図 6 にさまざまな負荷を接続した場合の TDR 波形をまとめておきます。

### 広帯域オシロスコープによる Sパラメータの測定

TDR は、ケーブルの一端から信号を入れて反射を測定することによりケーブルを含んだ特性を観測でき



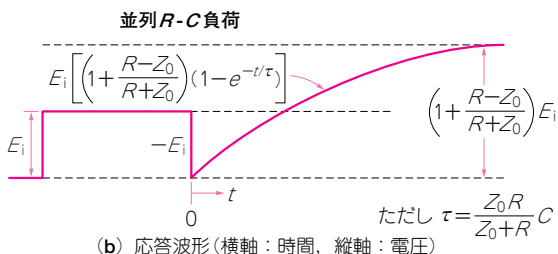
〈図 4〉 ケーブル端を開放した場合の波形(2 ns/div., 25 Ω/div.)



〈図 5〉

負荷が抵抗とコンデンサの並列回路の場合の応答波形

(a) 負荷の等価回路



(b) 応答波形(横軸:時間, 縦軸:電圧)