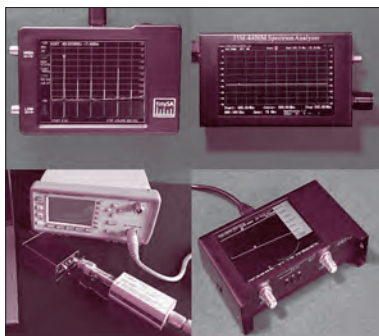


特集



第5章 ケーブル不良などインピーダンス 非連続点を距離も含めて測れる

NanoVNAの TDR測定機能の原理と使用例

cho45(渡辺 博文)

Hirofumi Watanabe

1 はじめに

1.1 NanoVNAとの関わり

NanoVNA(写真1)をご存じのかたもすでに多いでしょう。大変小さくまとめられた簡易VNAで、何より低コストなのが魅力です。私は日本語マニュアル⁽¹⁾を勝手に書いたり、本体ファームウェアへいくつか機能を追加したりして遊ばせて学ばせてもらっています。ちなみに日本語マニュアルがオリジナルであり、英語版は機械翻訳したものです。

本稿ではTDR機能にまつわる時間領域変換機能の初期実装を行なった立場から、この機能について解説します。

1.2 TDR機能追加のきっかけ

2019年8月ごろにNanoVNAのクローンの一つを入手しました。NanoVNAのファームウェアのソースコードはすべてgithub上⁽⁶⁾で公開されており、誰でもビルド可能でしたから、画面キャプチャ機能をつけたバージョン画面を作ったりなど、あまり信号処理と

は関係のないパッチを書いてはブル・リクエストを送っていました。

そうこうするうちにVNAによるTDRシミュレーションという方法を知りました。この時点ではNanoVNA本体にTDRの機能は入っていません。周波数ごとの反射係数を測っているだけなのに、信号処理で時間領域測定できるのはおもしろく、この小さな測定器にTDR機能も入っていたら格好よさそうだとということで、実機で動くようなパッチを作ることになりました。

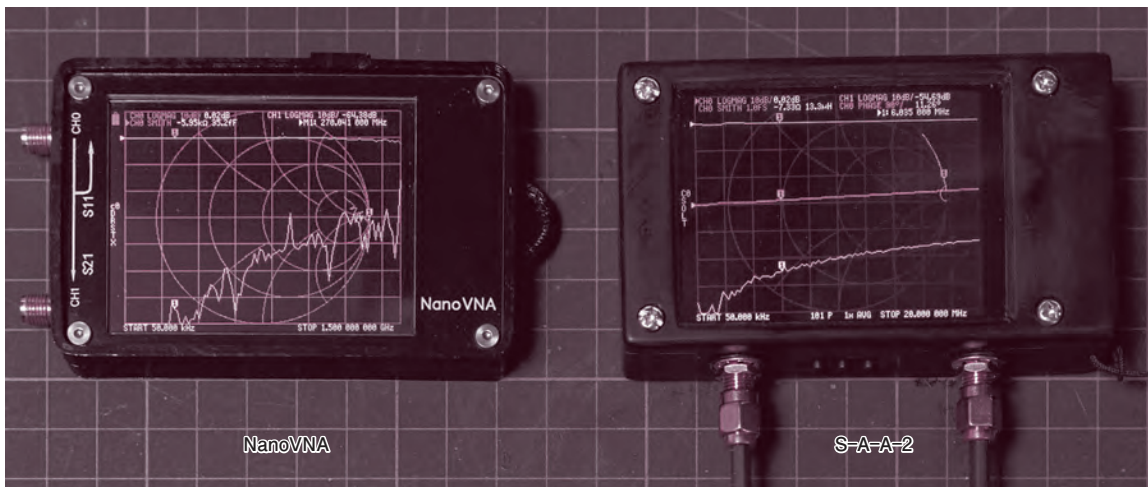
その結果、現在のNanoVNAには実機内にTDR機能が組み込まれており、簡単に試してみることができます。今回はそれによって何ができて何が嬉しいか、どのように実現されているか、具体的な利用例について紹介します。

2 TDRとは

Time Domain Reflectometry

TDRすなわち「時間領域反射率測定」とは、オシロスコープのように横軸を時間、縦軸を信号振幅とした領域で、被測定物(DUT)^{Device Under Test}に対してある信号を入力したとき、入力側に返ってくる反射波を観測するものです。

どのくらい反射してきたか、その振幅や位相と反射し



〈写真1〉左はNanoVNA、右は改良型のS-A-A-2(通称NanoVNA V2)

てくるまでの時間を計測することで、ある特定の場所の特性インピーダンスの乱れを知ることができます。

2.1 TDRで何が測れるのか

TDRのよくある使いかたは、長いケーブルの不良箇所特定です。断線とかショート、中継コネクタがなんだかおかしいといった、つまりインピーダンスの非連続地点を距離も含めて知ることができます。反射の測定はケーブルの一端にさえアクセスできれば良いので、長いケーブルの場合は特に便利です。

さらにいえば伝送路特性を計測することもできます。ある伝送路の特性インピーダンスが50Ωか75Ωかは一般的なテスタでは測定できないため、ケーブルに表示されているスペックを信用するしかないことが多いと思いますが、TDRなら比較的簡単に実測できます。

2.2 TDRのおもしろさ

TDRのおもしろさの一つは光の速度をより身近に感じられるところだと思います。50cm程度のケーブルの中を往復する光速の電磁波がグラフで可視化されるのは、なかなか不思議な体験です。

3 TDRの測定原理

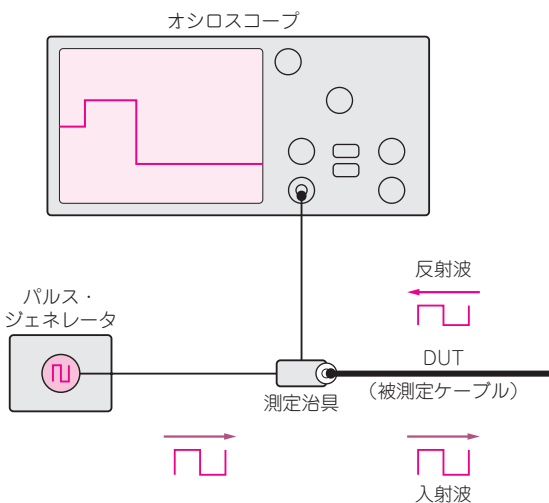
TDRの測定には大別して以下の方法があります。

(1) オシロスコープによる反射波観測

パルス・ジェネレータと簡単な治具を使って、被測定物に信号を注入し、反射波をオシロスコープで観測する方法です。

(2) VNAによるTDRシミュレーション

周波数特性をVNAで測定し、時間領域に変換する方法です。



〈図1〉 オシロスコープによる反射波観測

3.1 オシロスコープによる反射波観測

図1のように直接的に反射波を観測する方法です。非常に立ち上がりの早いパルスを送送路に入力し、このときの入力端を広帯域なオシロスコープで観測します。オシロスコープは時間領域の測定器ですから、そのまま結果を見ることができます。これが本来のTDRです。

3.2 VNAによるTDRシミュレーション

VNAは周波数ごとの反射率などを測定する周波数領域の測定器であり、根本的にTDR測定器とは測定原理が異なります。しかし、その測定結果を信号処理することにより「反射率を時間領域でみたらどうなるか？」すなわち時間領域の反射率を知ることができます。

ここで行う信号処理とは逆離散フーリエ変換です。図2のように波形(時間領域)に対してフーリエ変換を行うと周波数ごとのスペクトル強度など(周波数領域)を得ることができます。この処理は可逆的なため、逆方向に行えば波形を復元、つまり周波数領域のデータを時間領域のデータに変換できます。これを利用するとTDRのシミュレーションもできるわけです。

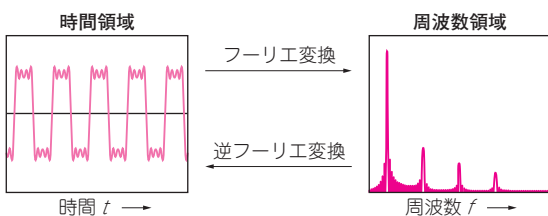
4 NanoVNAに実装した時間領域機能の概要

NanoVNAに実装した時間領域機能の変更点は図3(b)のようになっています。とくに大きな変更点ではなく、既存の処理に一つ追加の処理を加えただけというのがわかりいただけると思います。このうち重要なのは逆高速フーリエ変換(IFFT)部分です。

VNAの周波数領域の計測結果に対する逆離散フーリエ変換の結果は、時間領域でのインパルス応答になります。ステップ応答はインパルス応答を積分することで得られますので、信号処理により二つの見方が可能です。

4.1 メモリ制限下で逆高速フーリエ変換を行う

離散フーリエ変換と逆離散フーリエ変換はマイクロプロセッサ上で高速に行うアルゴリズムである、高速



〈図2〉 フーリエ変換と逆フーリエ変換