正弦波を用いたTDR法による特性インピーダンス測定法の開発

作左部 剛視*, 高橋 丈博*, 澁谷 昇*

Development of New Characteristic Impedance Measurement Method Using Sinusoidal Wave TDR

Takashi SAKUSABE*, Takehiro TAKAHASHI* and Noboru SCHIBUYA*

*拓殖大学工学部情報工学科 (〒193-0985 東京都八王子市館町815-1)

*Department of Computer Science, Faculty of Engineering, Takushoku University (815-1 Tate-machi, Hachioji-shi, Tokyo 193-0985)

Abstract

New measurement method for characteristic impedance of Printed Circuit Board was developed and its usability was demonstrated. This method is based on a conventional TDR method, but using burst sinusoidal wave modulated by step pulse as a input signal instead of direct step pulse. Characteristic impedances of 5m semi-rigid cable and 28cm Microstrip PCB are measured at 70MHz–350MHz frequency range using this new method. For the long cable the characteristic impedance can be measured consistently with the conventional method between 200MHz to 350MHz. For the short microstrip line however the measured values fluctuate in some extent. The reason for obtained results are discussed.

Key Words: TDR (Time Domain Reflectometry), Sinusoidal Wave TDR, Characteristic Impedance, Printed Circuit Board

1. はじめに

最近では、電子機器の高速・高周波化に伴い、高周波におけるプリント配線板の伝送特性、特に特性インピーダンスを把握する必要がある。そのため、当然のごとく配線板の“インピーダンス制御”が行われている。

一般に無損失線路では、特性インピーダンスは伝送路の形状だけに依存するが、高周波化を迎えて、プリント配線板のような損失のある線路については、特性インピーダンスの周波数依存性も十分考慮に入れて設計しなければならない時代が来ると考えられる。

伝送線路の特性インピーダンスを測定する方法は開放・短絡法（周波数領域法）¹⁾とTDR法（時間領域法）²⁾に大別されるが、これらの方法にはそれぞれ一長一短がある。開放・短絡法では、特性インピーダンスの周波数特性は測定できるが、高周波領域では開放・短絡時の線路長の差が無視できないため、正確さに欠ける。また、特性インピーダンスの場所的な変化を測定することができない。逆にTDR法は簡便であり、プリント配線板の特性インピーダンス測定では、TDR法が用いられていることが多いが、周波数依存性が測定できないという欠点がある。また、ネットワークアナライザでタイムドメイン解析が可能なものもあるが、求まる反射係数は測定周波数の平均値であり、個々の周波

数での特性は求めることができない。

そこで、TDR法を用いて特性インピーダンスの周波数依存性を測定するために、新しい測定法を考案した。本測定法（以下、正弦波TDR法と呼ぶ。）は、TDR法の入力矩形波の代わりに矩形波で変調した正弦波を用いるものである。本報告では、正弦波TDR法の原理、回路の試作および実験、特性インピーダンス測定結果および今後の課題について述べる。

2. 正弦波TDR法の原理

正弦波を用いたTDR法の測定原理について以下に述べる。図1に示すように、特性インピーダンス Z_0 、位相定数 β 、長さ l の伝送線路の送電端に、出力インピーダンス Z_s をもつ信号源が接続され、受電端が負荷インピーダンス Z_r で終端されているものとする。

$$V(0) = V_{in} \frac{Z_0}{Z_0 + Z_s} \left[\sin(\omega t) \theta(t) + \Gamma_r (1 + \Gamma_s) \sin(\omega t - 2\beta l) \theta\left(t - \frac{2\beta l}{\omega}\right) + \Gamma_r^2 \Gamma_s (1 + \Gamma_s) \sin(\omega t - 4\beta l) \theta\left(t - \frac{4\beta l}{\omega}\right) + \dots \right] \quad (1)$$

図1. 正弦波 TDR の原理

図2. 正弦波 TDR 波形の計算例

$$V(l) = V_{in} \frac{Z_0}{Z_0 + Z_s} \left[(1 + \Gamma_r) \sin(\omega t - \beta l) \theta \left(t - \frac{\beta l}{\omega} \right) + \Gamma_s \Gamma_r (1 + \Gamma_r) \sin(\omega t - 3\beta l) \theta \left(t - \frac{3\beta l}{\omega} \right) + \Gamma_s^2 \Gamma_r^2 (1 + \Gamma_r) \sin(\omega t - 5\beta l) \theta \left(t - \frac{5\beta l}{\omega} \right) + \dots \right] \quad (2)$$

信号源として、正弦波のバースト信号 V_{in} を入力し、送電端、受電端での電圧反射係数をそれぞれ、 Γ_s , Γ_r , また $\theta(t)$ を単位ステップ関数とすると、送電端および、受電端での電圧波形は(1), (2)式で与えられる。

したがって、送電端の電圧は進行波と反射波が線路の往復時間後に重なり、図2のような複雑な波形を示す。図2は周波数 200 MHz, $l=5$ m, $Z_0=70 \Omega$, $Z_s=50 \Omega$, $Z_r=\infty$ (開放) の場合の、(1)式より求めた送電端での正弦波 TDR 波形の計算例である。本方法では、信号源の電圧値 V_{in} (開回路電圧), および伝送線路の入力端での電圧値 $V(0)$ より、(3)式にしたがって、特性インピーダンスを求める^{3), 1E)}。

$$Z_0 = Z_s \frac{V(0)}{V_{in} - V(0)} \quad (3)$$

信号源の正弦波の周波数を変化させながらこのような TDR 波形を測定することにより、各周波数に対応する特性インピーダンスを求めることが可能であると考えられる。

3. 正弦波 TDR 法による特性インピーダンスの測定

3.1 測定回路および測定方法

正弦波 TDR 法による特性インピーダンスを測定するために、図3に示すような、正弦波発振器、ステップ波形発生器、スイッチングマルチプレクサ(IC)からなる回路を作成

図3. 測定回路の構成

図4. 開回路電圧波形

図5. 送電端の波形 (終端短絡)

した。スイッチングマルチプレクサにより正弦波がステップ状に変調されて出力される。

3.2 測定結果

(1) セミリジッドケーブルの測定

まず、本方法による測定が可能かどうかを確認するために、入射した信号が反射して返ってくるまでの時間が、スイッチングマルチプレクサのスイッチング時間である 10 ns より長い、5 m のセミリジッドケーブル ($Z_0: 50 \Omega$) を用いて測定を行った。測定結果の 1 例を図4, 図5に示す。

図6. 5mのセミリジッドケーブルの特性インピーダンスの周波数依存性

図7. 5mのセミリジッドケーブルのネットワークアナライザによる測定結果

測定で得られた V_{in} , $V(0)$ から (3) 式を用いて特性インピーダンスを求めた結果を図6に示す。測定結果より、200–300 MHzの周波数範囲では、特性インピーダンスの値はほぼ 50Ω と測定されている。200 MHz以下および300 MHz以上では、10%–30% 程度高く測定されている。この測定方法で、5mのセミリジッドケーブルの特性インピーダンスを測定することは可能と思われる。

次に、この測定結果がどの程度合っているのかを確認するために、ネットワークアナライザを用いて、同じ試料の特性インピーダンスの測定を行った。結果は、図7に示すように50 MHzから400 MHzまで 50Ω 一定であった。違いの原因については考察で述べる。

(2) マイクロストリップ線路

次に、28 cmのマイクロストリップ線路基板 ($Z_0: 70 \Omega$) を用いて測定を行った。測定波形の1例を図8に、また得られた特性インピーダンスの周波数依存性を図9に示す。

図9からわかるとおり、測定された周波数帯で特性インピーダンスは 50Ω の周辺でかなり大きく変動している。変動が大きいことの原因として、配線長が短いため、測定に必要な正弦波のサイクルが少なく、重なった波形を目視で正確に分離することができないためと考えられる。

4. 考察および今後の課題

4.1 考察

(1) 長い線路の場合

5mのセミリジッドケーブルにおいて、200 MHz以下、および300 MHz以上の周波数で正確に測定できなかった理由

図8. 28 cmのマイクロストリップ線路の送電端の波形

図9. 28 cmのマイクロストリップ線路の特性インピーダンスの周波数依存性

は以下のように考えられる。

- ① 使用したオシロスコープの帯域が500 MHzであり、高い周波数帯では測定器の帯域制限により波形が正しく測定できなかった。
- ② 低い周波数帯では、線路の長さ l によって正確に測定できる周波数の下限が決まってくるものと考えられる。たとえば、100 MHz電磁波の波長は真空中では3 mであり、これは今回使用した線路長と同程度である。伝送線路理論が適用される周波数(波長)と線路長の関係は、媒質中の電磁波の速さを v とすると

$$f \approx \frac{nv}{l} \quad (n: 5 \text{ 程度の整数}) \quad (4)$$

といわれている。ここで、 $n=5$, $l=5 \text{ m}$, $v=2 \times 10^8 \text{ m/s}$ とすると、

$$f \approx 200 [\text{MHz}] \quad (5)$$

以上の周波数でより正確な測定ができると考えられる。したがって、測定する線路長が短いほど、低い周波数での測定が困難となり、高い周波数での測定に限定される。

(2) 短い線路の場合

図8に示すように、たとえば、30 cmの線路に信号が入力したあと、反射されて戻ってくる時間は3 ns(伝搬速度を $2 \times 10^8 \text{ m/s}$ とすると)程度である。それに対して、使用したスイッチング素子の立上り時間は10 nsであり、本実験

ではスイッチング中に反射が返ってくることになる。したがって、測定する線路が極端に短いと、目視では正確な計測ができないと考えられる。

4.2 今後の課題

今回の試作実験により、正弦波を用いたTDR法により特性インピーダンスを測定することが原理的に可能であることがわかった。しかし、考察の項で述べたように、測定する周波数と線路長の関係について、多くの問題点が残っており、今後、以下の点を考慮して改良していく予定である。

- (1) 重なった反射波形を分離して、特性インピーダンスを求める手法の開発。
- (2) 現在500MHzまでの測定しかできないが、広帯域オシロスコープおよび高速スイッチングICを使うことにより、より高周波領域での測定が可能になると考えられる。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、実験、測定に協力していただいた研究室卒研生の荻野智紀、丹治史裕の両君に感謝いたします。

(2003.4.11-受理)

文 献

- 1) 平山 博, 大附辰夫: “電気回路論”, 電気学会, 2003
- 2) “タイムドメインリフレクトメトリの原理”, Agilent アプリケーションノート 1304-2, 2002
- 3) 澁谷 昇: “信号信頼性とEMC”, エレクトロニクス実装学会誌, Vol. 5, No. 2, pp. 192-196, 2002

注) —————

市販のTDRメータでは、以下のような測定を行う¹⁾。

図aのように、測定する回路にステップ波形を入力し、反射波形をオシロスコープで測定することにより、波高値よりインピーダンスを、ステップ波形の段差の位置から伝搬速度（あるいは不整合の位置）を計測する。

電圧反射係数は

$$\rho = \frac{E_r}{E_i} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad ①$$

と表されるので、測定したい線路の特性インピーダンスは

$$Z_L = Z_0 \frac{1 + \rho}{1 - \rho} \quad ②$$

となる。ここで Z_0 は特性インピーダンスである。したがって、反射係数 ρ を測定することにより、線路の特性インピーダンス Z_L を求めることが可能になる。

図a. TDR解析の原理図