

TDRインピーダンス測定



COMPUTING

COMMUNICATIONS

VIDEO

▶ シグナル・インテグリティの基礎

コンピュータ、コミュニケーション、ビデオ、ネットワークシステムのデジタル設計において、クロックとデータの伝送速度の高速化を追求しようとするするとシグナル・インテグリティが一層重要になります。

最近みられるような高速の動作周波数では、信号の立上り時間、パルス幅、タイミング、ジッタまたはノイズ成分に影響する要因は、システム・レベルの信頼性を左右します。

シグナル・インテグリティを確実なものとするには、信号伝送路のインピーダンスについて、理解し、かつ、管理する必要があります。

インピーダンスの不整合とばらつきにより反射波が発生し信号品質を劣化させます。

Rambus、USB 2.0 (Universal Serial Bus)、Firewire (IEEE 1394) などのデジタルシステムに採用されている多くのインタフェースでは、インピーダンスの許容誤差が電氣的仕様に規定されています。

また、高周波回路設計をするためにモデリング・ツールを使うことは標準的な手法となっています。

モデリングは、設計時間の短縮と設計エラーの発生を最小にします。

しかし、モデル化された回路は、プロトタイプを作成し、インピーダンス測定を含む実測値と比較、検証しなければなりません。

インピーダンスは、80E04型TDRサンプリング・モジュールを搭載したTDS8200型オシロスコープを用いてTDR (Time Domain Reflectometry) 法により測定します。

波形信号品質が時間領域で解析されるように、TDRにより信号伝送路を時間領域で解析することが可能になります。

Tektronix

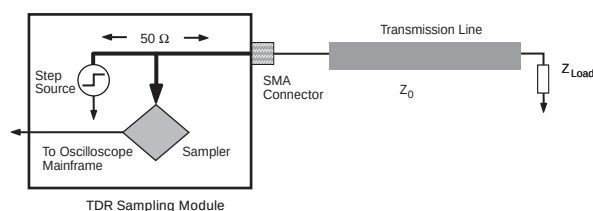
TDRインピーダンス測定

▶ アプリケーション・ノート

■TDRとは？

TDRは、回路基板内の信号パターン、ケーブル、コネクタなどの伝送路を信号が伝わる時に生じる反射波を測定します。

TDS8200型/80E04型は、標準インピーダンス (50 Ω) をもつモジュールから、インピーダンスが不明の測定対象にパルスを送出し、その反射を比較することから測定対象のインピーダンスを求めます。



▶ 図1：TDR測定ブロック図

単純化されたTDR測定ブロックを図1で示します。

TDRの表示は、立上りの速いステップ信号が伝送路を伝達されるときに反射波の電圧波形です。

測定波形は、伝送路の中のインピーダンス不連続点で発生する反射波形と入射されるTDRステップ波形の合成波形になります。

反射係数の計算について

TDR測定の数学的な意味は、簡単ですが重要です。TDR測定は連続したインピーダンスの比率に基づいて計算されます。

ほとんどのTDR測定器は、必要な比率計算を自動的に計算して、数値として表示します。

TDR測定結果は、反射係数 ρ として表示します。

反射係数としての ρ は入射パルス振幅と反射パルス振幅の比率です。

$$\rho = \frac{V_{\text{reflecte}}}{d}$$

負荷インピーダンス Z_L と伝送路特性インピーダンス Z_0 を用いて反射係数 ρ を表現することもできます。

$$\rho = \frac{V_{\text{reflecte}}}{d} = \frac{(Z_L - Z_0)}{(Z_L + Z_0)}$$

負荷インピーダンスが伝送路特性インピーダンスと合致、短絡 (SHORT)、開放 (OPEN) されている場合の反射係数 ρ について記述します。

まず、負荷ロードインピーダンス (Z_L) が特性インピーダンス (Z_0) と等しい場合には、反射係数 ρ は0になります。この場合には反射は生じません。

$$\rho = \frac{V_{\text{reflecte}}}{d} = \frac{0}{V} = 0$$

次に $Z_L=0$ の短絡の場合には、反射波は入射波と振幅において等しくなります。但し極性が反転し負パルスとなります。反射係数 ρ は-1になります。

$$\rho = \frac{V_{\text{reflecte}}}{d} = \frac{-V}{V} =$$

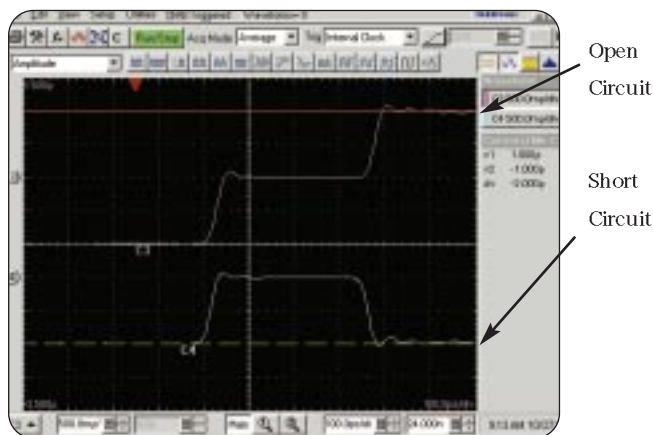
最後に Z_L =無限大の開放の場合、反射波は入射波と等しく極性は同じになります。

図2に見られる様に反射波は入射波の一部に重なり増幅された様に見えます。

反射係数 ρ は1になります。

$$\rho = \frac{V_{\text{reflecte}}}{d} = \frac{V}{V} = 1$$

図2は、TDS8200の実際に測定している状態を示します。



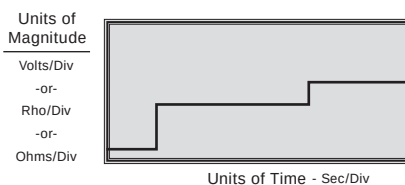
▶ 図2: 終端短絡と終端開放の時のステップ反射波形を時間領域で表示します。

伝送路と負荷のインピーダンス計算

負荷インピーダンス Z_L と伝送路特性インピーダンス Z_0 を用いて反射係数 ρ を表現することもできます。

$$\frac{(1+\rho)}{(1-\rho)}$$

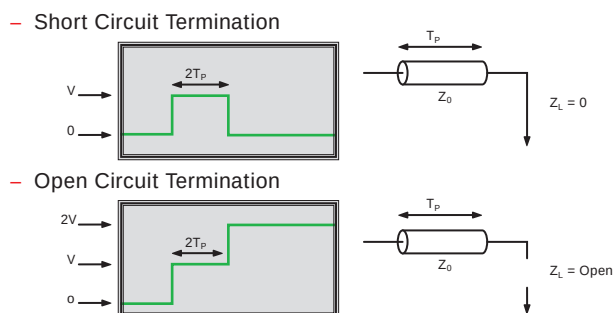
TDS8200型では、測定結果の垂直軸の単位を、ボルト (V)、オーム (Ω)、ロー (ρ) であらわすことができます。



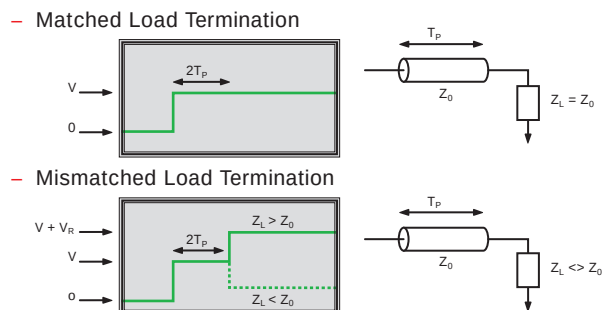
▶ 図3: TDR波形の表示例

TDR技術により、集中定数回路と分布定数回路を組合せた時の振る舞いを観測、評価することができます。

図4から図8に、様々な伝送路インピーダンスと終端の組合せた場合のTDR結果を示します。



▶ 図4: 短絡終端と開放終端

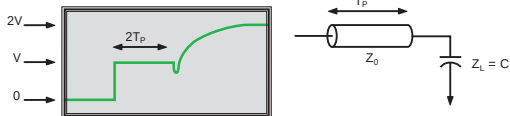


▶ 図5: 整合終端と不整合終端

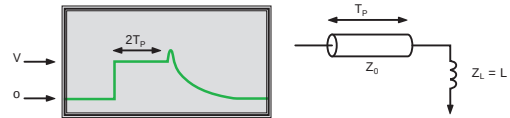
TDRインピーダンス測定

▶ アプリケーション・ノート

Capacitor Load Termination

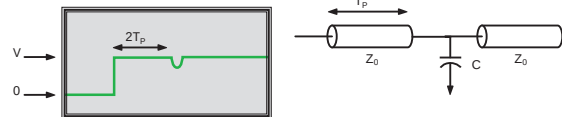


Inductor Load Termination

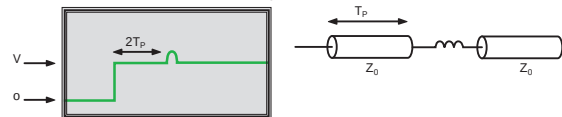


▶ 図6：容量性負荷終端と誘導性負荷終端

Shunt Capacitance Discontinuity

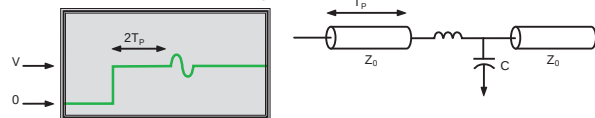


Series Inductance Discontinuity

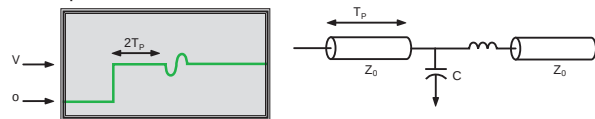


▶ 図7：容量性不整合と誘導性不整合

Series Inductance – Shunt Capacitance



Shunt Capacitance – Series Inductance



▶ 図8：誘導性負荷と容量性負荷の組合せ

実際の回路の特性評価

一般的に、エッチングされた回路基板は、インピーダンス制御されたマイクロストリップとストリップ伝送路があります。これらの伝送路中の部品、ビア、コネクタや他の“妨害物”は、インピーダンスの不連続の原因となります。

これらの不連続は、インダクタンス、コンデンサとそれらをつなぐ伝送線路としてモデル化することができます。

TDR波形は図9で示すように、インピーダンス不連続によって発生される全ての反射の結果として表示されます。

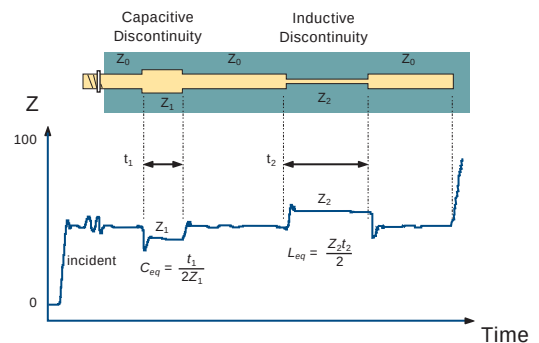
反射波形は、線路に沿ってインピーダンス変化をグラフの様に表示され、規定のインピーダンスから測定結果がどれ位ずれているのかを評価できます。

TDS8200型/80E04型は、波形演算機能により実際の部品パラメータ値と伝送路上の物理的な距離を計算することができます。

図9は伝送線路をステップ・パルス反射波形が伝わる典型的な例を示します。

80E04型TDRサンプリング・モジュールは、正確で高速な立ち上がり時間と最小の波形ひずみとなるように制御されたパルスを出力します。

TDR測定の結果を解析、伝送路のインピーダンス不連続を修正することにより実際に回路を通る信号波形の品質を飛躍的に改善することができます。



▶ 図9：不連続なTDR波形表示

■TDR測定分解能を決める要因

TDR測定は回路インピーダンスを測定し信号波形品質を向上させるために役に立ちます。

しかし、TDRシステムの測定性能、精度は、条件により異なります。いくつかの要因は、近接したインピーダンスの不連続の分離能力に影響します。

もし、TDRシステムが十分な分解能を持っていないければ、レベルが小さく、近接した複数のインピーダンス不連続点はひとつの連続した歪んだ波形に見えます。そのため、不連続点が不明瞭になるだけでなく、測定値も不正確になります。

立上り時間、セッティング時間、パルス・アベレーションは、TDRのシステム分解能に大きく影響します。

立上り時間

インピーダンス不連続点からの反射は、入射ステップ波と等しい立上り時間、または入射波よりも遅い立上り時間を持ちます。

TDRシステムにおいて任意の近接する2つの不連続点は、2点間の距離がTDRシステムパルスの立上り時間の半分以上あれば認識できます。

つまりTDRで測定できる電気長の分解能はシステム立上り時間の半分になります。

$$T_{\text{(resolution)}} = 1/2 \quad T_{\text{R(system)}}$$

プレ・アベレーション

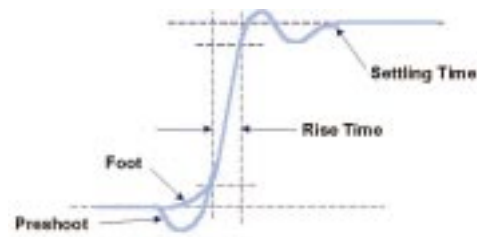
メインステップの前に生じる波形のプレ・アベレーションは特に問題となります。プレ・アベレーションは、メインステップの前に不連続点に到達し、反射を発生します。

これらの早期に発生する反射は、近接する不連続点を不明瞭にすることで測定分解能を低下させます。

セット・アベレーション

図10に示す様な入射ステップの後に生じるリングングのようなアベレーションは、反射波によるアベレーションと同じ場所に発生します。これらのアベレーションはDUTに起因する不連続なのか区別することが困難です。

TDR測定器のステップ発生器のアベレーションとサンプラーのアベレーションは殆ど同様の影響を与えます。



▶ 図10：TDRパルスのアベレーション

■TDR精度要因

TDR測定の精度に影響を与えるものはいくつかあります。それらは、TDRシステムのステップ応答、接続部品からの反射、DUTロス、ステップ入射波の振幅精度、ベースライン補正、測定に使用するリファレンス・インピーダンスの精度などがあります。

リファレンス・インピーダンス

TDR測定は相対的な測定になります。入射波の信号振幅と反射波の信号振幅とを比較して測定します。

TDS8200型/80E04型は、入射波と反射波を比較計算して画面上に反射係数 ρ またはインピーダンス (Ω) にて表示をします。

反射係数とインピーダンス計算精度は、リファレンス・インピーダンス (Z_0) の精度に依存することになります。

TDRアプリケーションではロー (ρ) とオーム (Ω) の計算のために、安定したインピーダンス・リファレンスとして高精度な3.5mmエアライン・コネクタを使います。

これによりコネクタ・インピーダンスは、トレーサブルな相対測定値としてTDR測定で使用されます。

TDRインピーダンス測定

▶ アプリケーション・ノート

ステップ振幅とベースライン補正

一般的なTDR測定器は、入射ステップ振幅を測定、校正し、既知のステップ信号振幅、ベースライン・レベルから Ω と ρ を計算します。

TDS8200型/80E04型は、既知のインピーダンスを持った高精度なエアラインをサンプリング・モジュール内に装備することで一段と進んだ技術を採用しています。

TDS8200型/80E04型は、ベースラインとステップ振幅を定期的にモニタしています。

このようにしてシステムは自動的な補正を行うことにより、ステップ振幅のオフセットがドリフトしたとしても非常に再現性のある測定ができるようになります。

入射ステップ波形アベレーション

入射ステップ波形のアベレーションによる最も重要な問題として、ステップ・パルスが測定対象の電気長と比較して短時間で収束しないときに、反射ステップ振幅を正確に測定できなくなります。

この種の誤差は、50 Ω からかなり異なるインピーダンスをもつDUTのみ問題になります。

インピーダンスが50 Ω に近く反射が小さい状態においては、測定精度はリファレンス・インピーダンスへの依存度が高くなります。

アベレーションの問題として更に、TDRステップ波に先行するフートまたはプレ・シュートがあります。

プレ・シュートは、DUTが開放端の場合に終端近くのインピーダンスが実際のインピーダンスよりも低く表示されるため測定誤差になります。

つぎに、低周波アベレーションの問題です。

このアベレーションは、DUTの代わりの完全な50 Ω 終端のトレースでも現れます。

DUTがリファレンス・インピーダンス測定と異なる周期で測定されるときに50 Ω レベルのオフセットとして現れます。

雑音

小さなインピーダンスの測定においては、ランダム雑音は測定エラーの発生原因となります。

TDS8200型/80E04型では、アベレーシングをすることによりランダムな雑音を低減することができます。

他のTDR測定器においてアベレーシングをしながら自動測定をする場合には、処理速度が低下してしまうことがあります。

TDS8200型/80E04型では複数のDSPを使い処理速度を低下させないでアベレーシング時の自動測定を高速化しています。

プロービングの精度と反射

TDR測定において長いケーブルを使用する場合には、ケーブル損失の影響を無くすためにケーブル端と比べてDUTインピーダンスがどれ位なのかを測定しておくことは懸命な方法です。

この場合にケーブル・インピーダンスはTDR測定の精度に直接的な影響を与えます。

インピーダンスのリファレンス・レベルはケーブルの反射率(ρ_{cable})によりレベルをシフトされ、DUTに入射される波形の振幅は $(1 - |\rho_{\text{cable}}|)$ になります。

最大の測定精度を得るためにこれらのパラメータは測定されインピーダンス計算されます。

DUTへのプロービングからの反射も考慮する必要があります。

特にGNDへのプロービング方法による誘導性反射がみられる場合には、GNDプレーンとプローブGND端子を最短にて接続する必要があります。これは測定において重要なことです。

ケーブルの損失

テスト・セットアップにてケーブル損失はいくつかの問題が提起されます。

損失における導体損失と誘電体損失では、導体損失が支配的になります。

導体損失の原因は、周波数に伴い増加する表皮効果によって金属導体抵抗も増加することによります。

この直列抵抗の増加により、あたかもケーブルのインピーダンスが増加している様に見えます。

それにより、長いテスト・ケーブルを使用する場合のDUTインピーダンスは、実際にそれより高く見えることがあります。

次の問題はケーブル終端にTDRステップ波が到達したときに立上り時間が劣化することです。

入射ステップの振幅が期待される振幅と異なるため、分解能と精度に影響を及ぼすと予想されます。

DUTインピーダンスが50 Ω 近くであれば、このステップ波の振幅による測定精度の劣化は発生しませんが、50 Ω よりも離れているインピーダンスを持つ場合には測定精度に影響を与えます。

導体損失は、エクステンダ・ケーブルを使用してDUTにサンプリング・ヘッドをより近づけることによって最小にすることができます。

その方法が可能でないならば、オフセット法は損失の問題解決をする手助けになります。

このテクニックの例は、次の通りです。

- TDRの接続をDUTから既知の標準インピーダンスをもつエアラインに変更します。そしてエアラインの実際のインピーダンスを測定します。その測定値は、次の測定におけるオフセット値として使われます。このオフセット値はDUTの手前に接続されるケーブルなどの接続部品の影響を定量化します。
- オフセット値をすべての定量的に測定された結果に加えるか、差引きをします。
- TDS8200型/80E04型は優れた直線性を持っているため、ステップ発生源、接続ケーブル、サンプラにおいて誤差がある場合には、DUTと標準インピーダンス測定において同一の影響を受けることになります。

この手法により、インピーダンス測定と反射係数 (ρ) の精度を大きく改善できます。

■立上り時間の制御

多くのTDR測定の場合には、TDR入射波形の最も速い立上り時間が望ましいのですが、非常に速い立上り時間は、若干の場合、TDR測定結果を誤らせることがあります。

例えば、35psの立上り時間をもつTDRシステムで、回路基板上のマイクロストリップラインのインピーダンスを測定すると優れた時間分解能が得られます。

しかし、現在、回路に使用している最も速い論理デバイスファミリでさえ、TDRステップの35ps立上り時間に合致した周波数応答特性を持つものではありません。

ECLのような代表的な高速論理デバイスでさえも、200psから2nsのレンジの立上りです。

スタブ、またはマイクロストリップラインの鋭角での引き回しのような小さな不連続点からの反射波は明確に観測ができますが、35psの立上り時間で測定すると大きい反射を引き起こす可能性があります。

1ns立ち上がり時間のECLで同じ伝送路を駆動すると問題にならない程度の反射になります。

測定と実際の差異を理解することは、シグナル・インテグリティの基本です。

インピーダンス読み値を現実の値に近づけるには、実際の動作信号での測定環境が必要となります。

TDS8200型/80E04型は、double-boxcarアベレージング技術を用いたフィルタを搭載し、反射波の立上り時間を変化させることが可能です。

フィルタ処理、および、結果表示は、リアルタイムで行われます。フィルタにともなう校正を必要としません。

フィルタ処理後の波形結果は、実際と同じ立上り時間に設定した外部の信号ゼネレータによる測定結果と非常によく一致します。

■差動TDR測定

多くの高速設計は差動伝送路で設計されます。

このアプローチは多くの優位性を提供しますが、シグナル・インテグリティを支えるためのTDR測定が不要になることはありません。

これまでのシングルエンド（片端接地）TDR測定のすべての考え方は差動TDR測定にもあてはまります。

差動TDR測定では、ODDモード、EVENモードの特徴ある2つの伝播モードがあります。各モードは、独自の特性インピーダンスと伝播遅延時間を持っています。

- ODDモード・インピーダンスは、一方の伝送線が逆相信号によって駆動される時、他方の伝送線を測定することによって得られるインピーダンスとして定義されます。
- 差動インピーダンスは、差動信号で駆動される差動線の線間インピーダンスです。差動インピーダンスは、ODDモード・インピーダンスの2倍になります。
- EVENモード・インピーダンスは、一方の伝送線が同相信号によって駆動される時、他方の伝送線を測定することによって得られるインピーダンスとして定義されます。
- COMMONモード・インピーダンスは、同極性の平行2線のインピーダンスです。それはEVENモード・インピーダンスの半分の値になります。

TDRインピーダンス測定

▶ アプリケーション・ノート

従来のシングル・エンドTDRシステムを用いても、差動伝送路の2つの伝送線を電氣的に結合させ、シングル・エンド駆動することにより、COMMONモード・インピーダンスの測定ができます。

しかし差動伝送路のインピーダンス測定は、COMMONモード・インピーダンスよりも差動インピーダンス測定が重要になります。

真の差動インピーダンス測定を提供するために、80E04型TDR サンプリング・モジュールは極性選択が可能なTDR ステップ・ゼネレータを2チャンネル装備しています。

差動システムは、実際のアプリケーションの動作時と同様に、真の差動信号で駆動可能です。

差動線の各応答は、別々に取り込まれ、差動測定結果として評価できます。

両サンプラ・チャンネルは、ステップ応答特性が一致している必要があります。2つのステップ・パルスは、同一振幅、逆極性で出力されます。ここで大切なことは、DUT入力端にてこのステップ・パルスが同期している必要があることです。

TDS8200型/80E04型は、2つのアキュイジションと極性が選択可能なTDRチャンネルを共通のクロック源と共に一つのサンプリング・モジュールに組入れることによってこれらの要求を実現しています。

また、2チャンネルのステップ・ゼネレータの信号タイミングは、正確にDUT入力端で時間的に合せることと、ケーブルによるタイミング・ミスマッチを除去するため、デスキューができる機能を備えています。

逆極性のステップ波形を2チャンネル同時に加えることにより差動インピーダンス測定が可能になります。

差動測定 of 各チャンネルの波形は、ODDモード・インピーダンスになります。

差動伝送路の差動特性がバランスしていない場合は、各波形は正確に一致しません。

■ステップ・ゼネレータのデスキュー

真の差動TDR測定は、ステュミラスとアキュイジションシステムがタイミングとステップ応答に関して調和がとれている必要があります。

ステップ応答は、システム設計により固定されています。しかし、2チャンネル間の相対タイミングは調整可能です。

アキュイジション・タイミングとTDRステップ・タイミングは有効な結果を得るために一致させる必要があります。

タイミングを一致させるのはDUTの入力端であり、測定器の前面パネルではありません。DUTとの接続に低品質なケーブルや接続部品を用いると、たとえ、測定器の前面パネルでタイミングが一致していたとしてもDUT入力端でTDRステップが到着するときにスキューが発生させ、重大な測定誤差要因となります。

この問題を除去するか、または影響を減らす最も効果的な手法は、測定対象物までの電気長を最短にすることにあります。

TDS8200型/80E04型は、測定性能を犠牲にすることなくメインフレームからサンプリング・ヘッドを2mまで延長することができます。これにより、ケーブル長を短くすると同時に、ミスマッチ、減衰、ばらつきなどの誤差要因も最小にできます。

■静電気対策

広帯域のサンプリング・ヘッドはとても静電気に敏感です。広帯域のサンプリング・モジュールを扱う場合には、以下の様なガイドラインを守って使用します。

- ・使用中でないときはサンプリング・ヘッドキャップを取付けます。
- ・モジュールに触れる場合には $< 10\text{M}\Omega$ のアース用ストラップを使います。
- ・DUTが静電気を持っている場合には、プロービング前にデイスチャージします。

プローブGNDリード、あるいは、指（手首ストラップを付けていることが前提ですが）をTDRの測定ポイントに接触することでデイスチャージができます。

80A02型（EOS/ESDプロテクション・モジュール）とP8018型（TDRプローブ）とを組み合わせることにより、プロービング時に自動的にDUTのデイスチャージを行ないます。

■プロービングとインタフェースの選択

同軸の 50Ω ケーブルから回路基板のマイクロ・ストリップラインへの接続において、理想的な 50Ω ラインとDUTの間で局所的なインピーダンス・ミスマッチができます。測定上このミスマッチは、コストと操作性も考慮してできるかぎり小さく抑えることが重要です。

P6150プローブ

P6150プローブは便利で手軽なため、多くの製造現場で使われています。

このプローブは、業界標準として多くのテスト・システムに採用されています。

50Ω プローブ・ケーブルは柔軟な素材から造られています。

SMA基板

- ・同軸接続が可能
- ・回路基板として設計、配置
- ・品質と再現性に最適なインタフェース
- ・高周波テストに対応

■再現性の問題

測定精度の重要なものに再現性があります。

測定を繰り返した場合に、同じ箇所での測定結果は同じ結果でなければなりません。

この再現性が精度を保証するものではありませんが、精度は再現性なしでは不可能です。再現性に影響を及ぼすいくつかの要因があります。

- ・プロービング技術と安定性
- ・ケーブルと接続の条件/品質
- ・測定手順
- ・測定器の状態と校正

アプリケーション参考例： USB 2.0での差動TDR測定

背景

USB 2.0の拡張された伝送速度により、信号品質の要求ができました。

その結果、USBデバイスとUSBケーブルのインピーダンスのばらつきが重要視されるようになりました。

TDS8200型/80E04型は、信号品質の完全性をサポートし、インピーダンス測定ソリューションを提供します。High-speed USB2.0は、シールドされたツイストペアの差動線を使います。

ケーブルのインピーダンスは

$$Z_{\text{odd}} = 45\Omega \quad (Z_{\text{diff}} = 90\Omega) \pm 15\%$$

$$Z_{\text{even}} = 60\Omega \quad (Z_{\text{cm}} = 30\Omega) \pm 30\%$$

で、ディレイの最大は26ns（TFSCBL）です。

回路基板上のトランシーバ・チップとコネクタ間のD+/D-のトレースは、差動インピーダンス 90Ω と規定しています。

■USB2.0 TDR測定仕様

High-speedのidle stateでのトランシーバのインピーダンス仕様は、差動TDR測定で定義されています。

この差動測定により、ポートコネクタ、コネクタからトランシーバまでの伝送線路、トランシーバ・パッケージ、トランシーバ・デバイス自身の最大許容インピーダンスを規定します。

ケーブル付きのHigh-speedデバイスの場合には、ケーブルの不連続性も規定されています。

測定の仕様として差動TDRの入射波立上り時間は400psであることが定義されています。

終端インピーダンス (Z_{HSTERM}) はコネクタ位置をリファレンスにしたTDRトレース上の時間位置にて測定されます。

コネクタ・リファレンス時間は、USBケーブルをコネクタから切り離して、オープンの状態にてTDR測定をしてコネクタ位置を特定します。

“USB A” コネクタの場合の測定位置は、コネクタ・リファレンスの8ns以後です。

“USB B” コネクタの場合の測定位置は、コネクタ・リファレンスの4ns以後です。

差動終端インピーダンスは、

$$80 < Z_{HSTERM} < 100$$

にて定義されます。

スルー・インピーダンス (Z_{HSTHRU}) は、コネクタ・リファレンスよりも500ps以前の位置から測定をします。

スルー・インピーダンスは、

$$70 < Z_{HSTHRU} < 110$$

にて定義されます。

例外ウインドウ (スルー・インピーダンスの範囲を1.4nsの幅で移動させたウインドウ) での差動インピーダンス測定値が、スルー・インピーダンス許容値を超えても、単一の不連続波形がTDRステップの立上り時間 (400ps) の2倍以上の時間スルー・インピーダンスの許容値を超えることは許されません。

ケーブル付きのHigh-speedデバイスでは、ケーブル・アセンブリを通してスルー・インピーダンスと同じ様にTDR測定をします。

この場合にはコネクタを切り離せないため、さらにコネクタ・リファレンス位置を決めるのは難しいため、その決定方法については試験者に任せられています。

これらのTDR測定要求事項と測定条件についてのより多くの詳細情報は、Universal Serial Bus Specification (Revision 2.0.1) 規格を参照してください。

TDS8200型/80E04型は、正極、負極両方の個々のTDR測定結果を差動波形として表示することができます。

TDR測定ソリューションの提供でユーザは直接反射特性を見ることができ、個々の伝送路インピーダンスと差動共通モードを測定することができるようになります。

TDS8200型/80E04型は、USBデバイスを検証するために要求されている測定ソリューションを提供します。

参照: 1. Universal Serial Bus 2.0 specification (www.usb.org/developers/usb20)



▶ 図11: USB2.0コンプライアンス・テストにおけるTDR測定治具

■USB 2.0インピーダンス測定手順

DUT接続

図11で示される様に、USB2.0 測定ボードは一方に差動ペアのSMAコネクタ、他方にUSBコネクタの構成をしています。

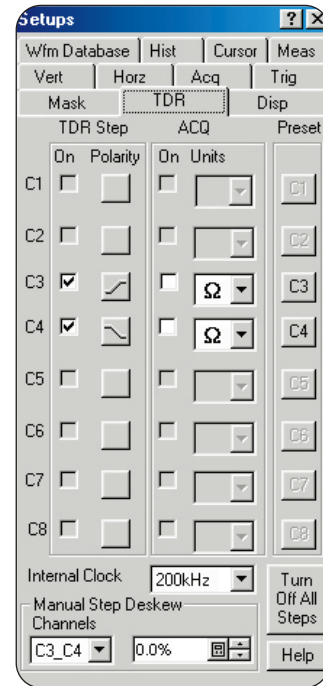
ボード上のSMAコネクタとTDS8200型オシロスコープの80E04型TDRサンプリング・モジュールをSMAケーブルにて接続します。

その際には必ず静電気対策のためのリストバンドをTDS8200型オシロスコープGNDに接続して静電保護をします。

差動ステップ・パルス出力

TDS8200型オシロスコープのTDR SETUPメニューにおいて (図12参照)

- ・TDRチャンネルのプリセット。図12で示すようにこの例ではch3とch4を使用します。
- ・UNIT項目にて Ω を選択
- ・Polarity項目にてC3チャンネルを立上りに、C4チャンネルを立下りに設定します。
- ・DisplayメニューにてVectorsをオンにして、ツール・バーからAveragingをオンにします。



▶ 図12: TDRセットアップ・メニュー

TDRのPolarityにて負極性 (Negative) を指定する場合に、UNITが ρ または Ω であればサンプリングしたステップ結果表示が負極性にならないことに注意をします。

UNIT単位がVであれば負極性の結果が表示します。

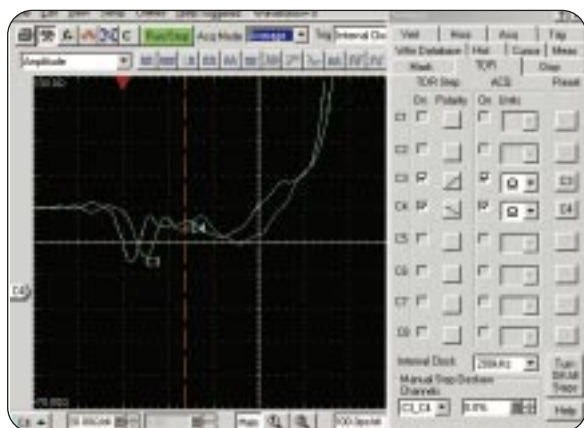
これは、 ρ の定義により反射電圧は入射電圧から分けられたものであるため、入射電圧の極性に依存しないということです。

また、反射波形を反射係数 (ρ) で考えた場合にその符号はリファレンス・インピーダンスよりも大きいのか、または小さいかを意味しています。

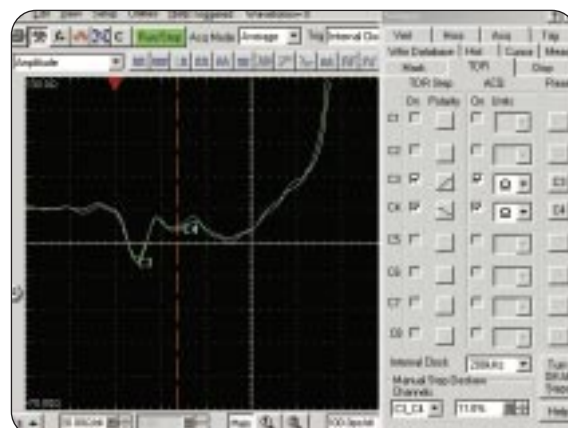
“負のインピーダンス” を意味している訳ではありません。

TDRインピーダンス測定

▶ アプリケーション・ノート



▶ 図13: スキュー調整以前の差動TDR波形



▶ 図14: スキュー調整後の差動TDR波形

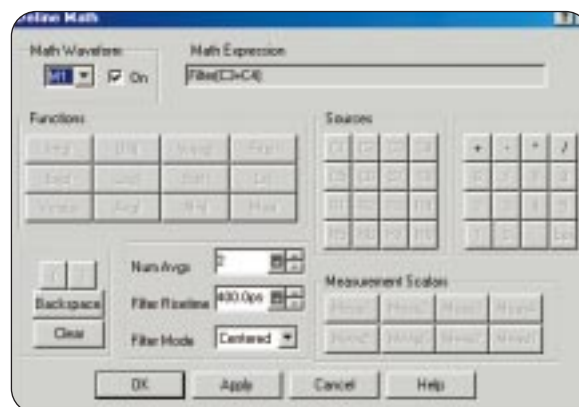
■TDR波形表示の設定

TDRの表示解像度を適切な状態にするために、HorizontalとVertical設定を調整します。

USBコネクタを外した状態で、USBコネクタ部が波形エリアの中心に表示されるように調整します。(図13を参照)

スキュー調節

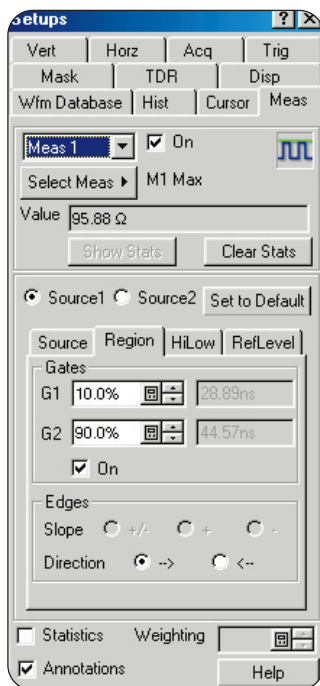
TDR SETUPメニューのDeskew機能を使い2チャンネル間のスキュー調整をします。(図14を参照)



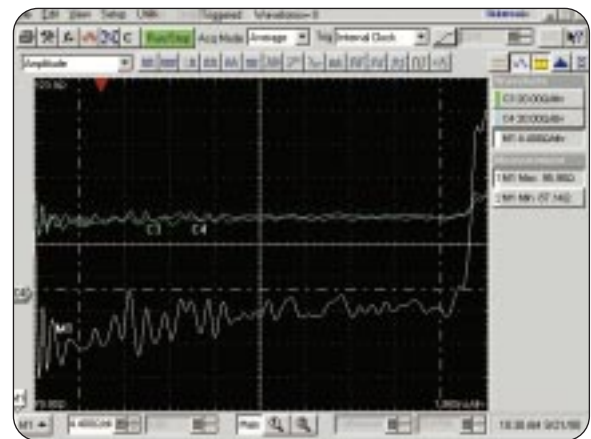
▶ 図15: MATHメニューによるフィルタ定義

差動フィルタ波形の作成

- ・オシロスコープ・ツールバーのMATHアイコンにて起動するMATHメニューにて、Filterを選択します。
- ・MATH画面にてFilter (C3+C4)の様に式を入力して、USB2.0の代表的な立上り時間、400psの立上り時間を入力します。
- ・MATH WaveformのチェックをしてMATH波形の表示をONにします。(図15を参照)



▶ 図16: 測定メニュー



▶ 図17: USB 2.0仕様範囲内のインピーダンス測定

■USB 2.0仕様のコンプライアンス（適合性）の確認

図17は、TDR測定の結果を示します。

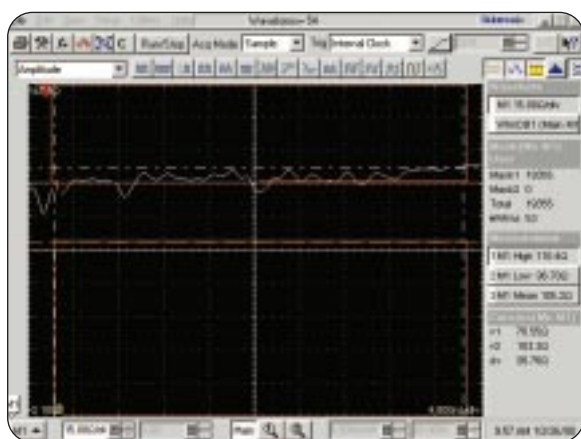
USBコンプライアンスでは差動インピーダンスを $90\Omega \pm 15\%$ と規定しています。

■許容値確認の自動測定

- Amplitude Measurementツールバーからmaxとmin測定のアイコンを選択します。
その際にM1が選ばれた波形であることを確認します。
- Measurement Setupメニュー（図16）を表示します。
Regionタグから波形の測定範囲を（%）で指定します。
この例では水平ディスプレイの10%と90%が測定に使用されます。
- 測定箇所を正確に見るためにはAnnotationsのチェックを入れてオンにします。

TDRインピーダンス測定

▶ アプリケーション・ノート



▶ 図18：USB 2.0のインピーダンス・マスク測定

図18ではUSB2.0の仕様の上限を上回っているインピーダンス測定結果です。

TDS8200型/80E04型では、USB2.0の規格仕様の限界を示すためにマスクを表示させて測定をしています。

この様にマスク機能を使い、局所的にマスク違反している箇所を見つけることが簡単にできます。

マスクは伝送信号の信号品質を評価するためにも有効です。

■ 結論

システム・クロックとデータ転送速度が向上するにつれて、シグナル・インテグリティは一層重要になってきています。

ケーブル、コネクタ、パッケージ・リード、回路基板トレースなどの伝送路のインピーダンスがシグナル・インテグリティの重要な指標となっています。

その結果、インピーダンス測定は、ほとんどのあらゆる高速設計プロジェクトの一部になりました。

TDR (Time Domain Reflectometry) はシングル・エンドおよび差動の伝送路やネットワークの特性インピーダンスを測定するための大変便利で強力なツールです。

TDR測定は、伝送路またはネットワークにおいてインピーダンスのいかなる変化も、その振幅の関数である反射を引き起こすという事象を利用しています。

TDS8200型/80E04型は、入射波と反射波の振幅値を自動的に比較することにより、コモンモードと差動インピーダンスのインピーダンス値、反射係数、時間 (位置) を直接表示します。また、測定器に組み込まれている波形演算機能により、ユーザが指定した立上り時間でのTDR結果を自動的に表示します。DUTのアプリケーションで用いられる帯域での応答をシミュレーションすることができます。

TDS8200型/80E04型は、一貫した手順、静電気対策、正しい測定方法を実践することにより、安定して正確なTDR測定を提供します。

■TDS8200型サンプリング・オシロスコープと 80E04型TDRサンプリング・モジュールについて

高速デバイス測定を支える広帯域・高精度

TDS8200型サンプリング・オシロスコープは、70GHzを超える周波数帯域幅をもっており、高速回路の設計を正確に評価するための十分な帯域幅をエンジニアに提供します。

80E04型サンプリング・モジュールは、業界で唯一、真の差動TDR測定が可能です。

真の差動TDR測定では、単一モジュールの中の共通クロックでドライブされた互いに極性反転した2チャンネルを使用します。シングル・エンドTDRによる擬似差動TDR測定よりも、高精度の差動インピーダンスの測定を行えます。

擬似差動測定では、直接測定ができないため、間接的に得られたシングル・エンド測定値から計算により差動インピーダンス値を推定します。また、測定精度、測定条件設定において制約を受けます。

TDS8200型サンプリング・オシロスコープは、14ビット垂直分解能、および、TDRベースラインとステップ振幅の変動によるrho/ohmリアルタイム補正機能により、プリント回路基板、ケーブル、パッケージ、接続部品のインピーダンスを高い繰返し精度で測定します。

完全なコネクティビティ

TDS8200型サンプリング・オシロスコープは、Windowsオペレーティング・システムをユーザに開放しています。

測定器を専用のオシロスコープとして使用すると同時に、Windowsデスクトップにアクセスすることで強力で新しいツールになります。

ワードパッド、ペイント、ウェブ・ブラウザのような組込アプリケーションによって、測定と並行してドキュメント作成が可能になり、時間が節約できます。

測定後、レポート作成のために画面データと測定を付け合せるといった、間違いが出やすい作業をなくすることができる利点があります。

TDA Systems社のIconnectソフトのような他のアプリケーションをTDS8200型にインストールすることで、TDRモデリングと測定を同時に実行できます。

ネットワーク機能により、測定器上でウェブ情報の閲覧、電子メール交換、印刷とファイル共有が可能になります。

TDS8200型オシロスコープに、外部ディスプレイを接続することで測定器でオシロスコープ画面を表示しながら、同時に外部ディスプレイ上にドキュメント作成、解析、またはブラウジング・ツールのような他のアプリケーションを表示できます。



▶ TDS8200型 サンプリング・オシロスコープ



▶ 電気サンプリング・モジュール

ユーザは、TDS8200型オシロスコープからローカルで実行しているアプリケーションに簡単に波形画像やデータを転送したり、測定しながら設計作業のための各種情報をウェブ経由で参照できます。

標準インタフェース

GPIOコマンドセットは、ハードウェアとソフトウェアのパフォーマンスを向上させると同時に、他のTDSシリーズ測定器と共通化を図っています。

USBとPS-2インタフェースにより、マウス、キーボード、周辺機器を接続します。

USBはhot-plug（電源ON状態での抜き差し）が可能です。ネットワーク接続のためのLANインタフェースを標準搭載しています。

TDRインピーダンス測定

▶ アプリケーション・ノート

■関連製品



オシロスコープ

DPO機能、デジタル・リアルタイム技術など、世界最高の技術と高信頼性を備え、コンピュータ、通信、半導体をはじめ、自動車、機械、医療、化学などあらゆる分野で使用されています。



ロジック・アナライザ

TLA700シリーズ、TLA5000シリーズは、今日の高速で複雑化するデジタル回路のデバッグ、評価のために、革新的なアキュイジション、解析、表示技術を提供します。



プローブ

信号品質を最大限維持しながら、DUTへのアクセスを可能にする広範囲で先進的なプローブを開発、提供しています。



信号発生器

基本波形から複雑な任意波形まで幅広い用途の信号を簡単な操作で出力でき、高度化する各種機能の開発や評価に必要なシミュレーションのニーズに対応します。

Tektronix お問い合わせ先:

東南アジア/オーストラリア/パキスタン (65) 6356 3900

オーストリア +43 2236 8092 262

ベルギー +32 (2) 715 89 70

ブラジルおよび南米 55 (11) 3741-8360

カナダ 1 (800) 661-5625

中央ヨーロッパおよびギリシャ +43 2236 8092 301

デンマーク +45 44 850 700

フィンランド +358 (9) 4783 400

フランスおよび北アフリカ +33 (0) 1 69 86 80 34

ドイツ +49 (221) 94 77 400

香港 (852) 2585-6688

インド (91) 80-22275577

イタリア +39 (02) 25086 1

日本 81 (3) 6714-3010

メキシコ、中米およびカリブ海諸国 52 (55) 56666-333

オランダ +31 (0) 23 569 5555

ノルウェー +47 22 07 07 00

中華人民共和国 86 (10) 6235 1230

ポーランド +48 (0) 22 521 53 40

大韓民国 82 (2) 528-5299

ロシア、その他の旧ソ連共和国およびバルト海諸国 +358 (9) 4783

400

南アフリカ +27 11 254 8360

スペイン +34 (91) 372 6055

スウェーデン +46 8 477 6503/4

台湾 886 (2) 2722-9622

英国およびアイルランド +44 (0) 1344 392400

アメリカ 1 (800) 426-2200

アメリカ (輸出販売) 1 (503) 627-1916

その他の地域からのお問い合わせ Tektronix, Inc. at: 1 (503)

627-7111

Last Update March 01, 2004

*記載されているすべての会社名および製品名は、各社の商標です。

Tektronix

Enabling Innovation

日本テクトロニクス株式会社

東京都港区港南2-15-2 品川インターシティ B棟6階 〒108-6106

製品についてのご質問・ご相談は、お客様コールセンターまでお問い合わせください。

TEL 03-6714-3010 FAX 0120-046-011

電話受付時間/9:00~12:00・13:00~19:00 月曜~金曜(祝日は除く)

当社ホームページをご覧ください。 <http://www.tektronix.co.jp/>

お客様コールセンター ccc.jp@tektronix.com

●記載内容は予告なく変更することがありますので、あらかじめご了承ください。このカタログは再生紙を使用しております。

PT-020132-01 2004年09月