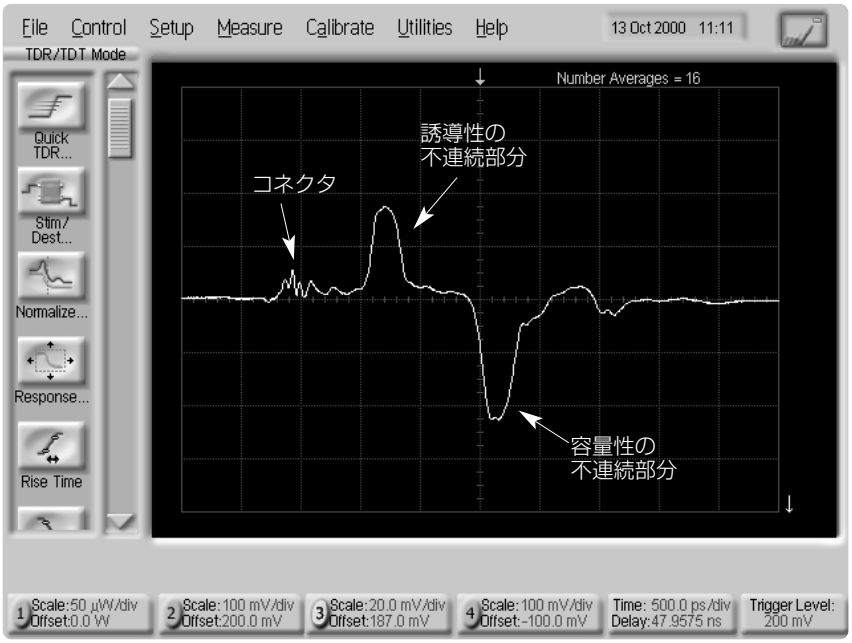
タイム・ドメイン・リフレクトメトリによるマイクロストリップの特性評価

アプリケーション・ノート1304-1



Agilent Technologies
Innovating the HP Way

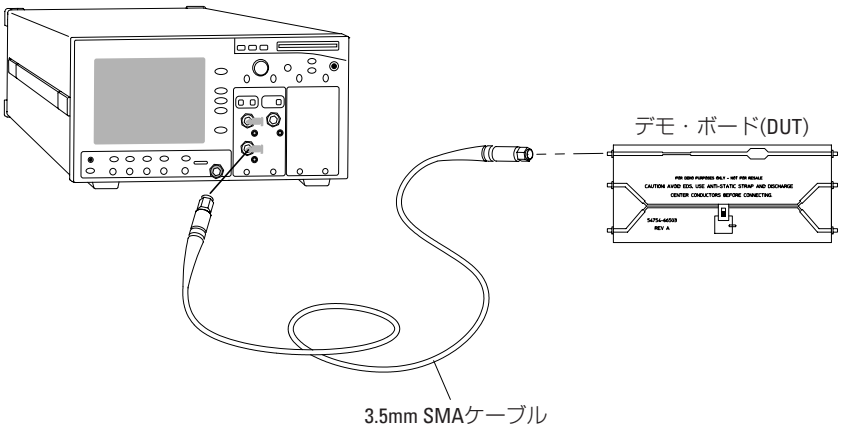
はじめに

高速デジタル・デザインの世界では、劇的なペースでクロック速度が上昇しています。ギガビット/秒のデータ速度により、バックプレーン、マイクロストリップ・ライン、相互接続などのプリント基板構造における信号品質の問題が発生しています。シミュレーション・ツールは構造性能を予測する上で有効ですが、高速エッジに対する実際の応答を測定/実証するための、テストおよび計測ツールがさらに必要とされています。タイム・ドメイン・リフレクトメトリは、特性インピーダンス、反射係数、伝搬速度、エッジ効果などのパラメータと物理的な相互接続を関連させるために、デジタル・デザイン・エンジニアが最もよく使用するツールの1つです。

このアプリケーション・ノートでは、様々な形状のマイクロストリップ・ラインで行った実験について解説しています。プリント回路基板はスタブやディバイダを使用して作られてるので反射やクロストークの問題が必然的に引き起こってしまいます。高速デジタル・デザインで発生する一般的な問題を発見して回避する手段を示すことが、これらの実験の目的です。

TDR測定を使用したマイクロストリップ伝送ラインの評価

タイム・ドメイン・リフレクトメータ(TDR)は、ステップ・ジェネレータとオシロスコープを一体とした装置で、閉ループ状のレーダを構成していると考えることができます(下図を参照)。ここでは、電圧ステップが同軸ケーブルを伝搬し、被測定デバイス(DUT)に至ります。DUT内にインピーダンスの不連続部分がある場合は、エネルギの一部が反射します。ライン上の特定のポイントで、オシロスコープを使用して、入射と反射電圧波形をモニタします。



タイム・ドメイン・リフレクトメータ

以下の実験で入射電圧は、振幅200mV、立ち上がり時間40psの立ち上がりエッジです。オーバシュートは5%以下で、ソース・インピーダンス50Ωの信号源から出力されています。

TDRは、被測定ラインの特性インピーダンスを明らかにします。ライン上にある不連続部分のそれぞれの位置と特性(抵抗性、誘導性、容量性)を示し、伝送システム内の損失が直列か並列かを示します。次に、TDRによって評価を行うマイクロストリップ・ラインの例を示します。

TDR実験例1:	ボード素材:	Norplex Type G-10
	誘電体厚:	h = 1.57mm
	銅厚:	t = 0.035mm
	誘電率:	$e_r = 5.3$

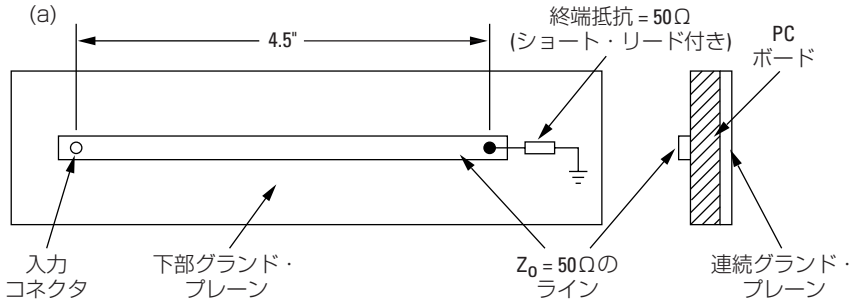


図1A.マイクロストリップ回路の例1

上記の寸法どおりに、図1Aに示すようなプリント基板を作成しました。図1Bと1Cは、TDRで観察した入射波形と反射波形を示しています。垂直軸は電圧(mV)、反射係数(ρ)、インピーダンス(Ω)で表示することができます。水平軸は時間や距離を表します。このラインの特性インピーダンスを表す式は:

$$Z_{line} = \left(\frac{1+\rho}{1-\rho}\right) \bullet Z_{reference} \qquad (1)$$

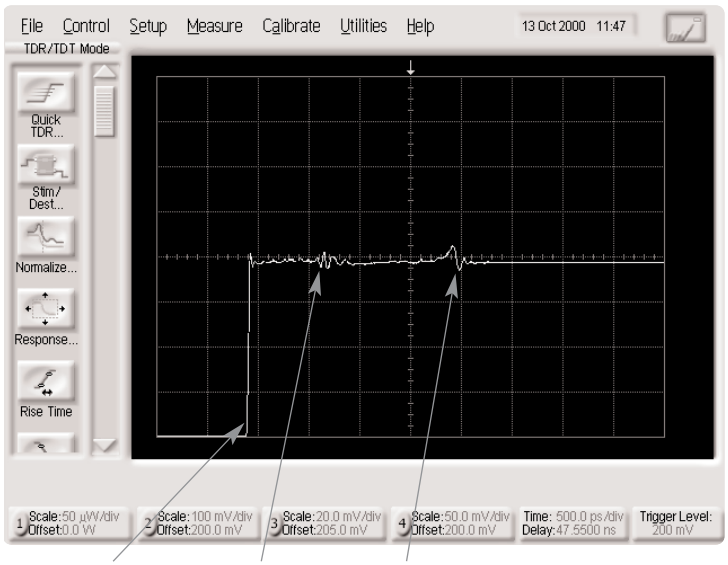
ここで、Z_{line}は被測定ラインの特性インピーダンス、$Z_{reference}$は既知ラインのインピーダンスをそれぞれ表します。

ラインに起因する反射波形の平均レベルは、ρ = 1.08% = 0.0108という値です(図1Bを参照)。この値を式(1)に代入すると、ライン・インピーダンスを計算できます。

$$Z_{line} = \left(\frac{1+0.0108}{1-0.0108}\right) \bullet 50\text{-}\Omega = 51.1\text{-}\Omega \qquad (2)$$

これは図1Bや1Cが示す測定値とほぼ一致します。

(B)



入射ステップ　コネクタ　50Ω抵抗

(C)

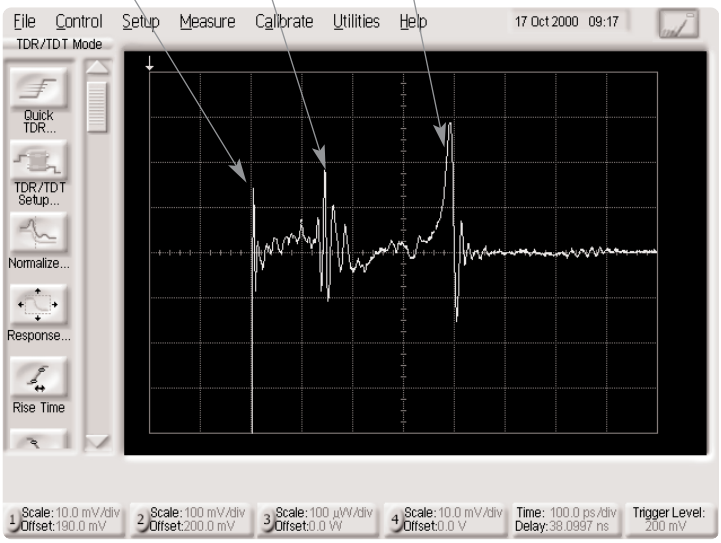


図1B(上).ライン特性インピーダンスのTDR測定

図1C(下).1Bと同じ(垂直軸を拡大)

TDR実験例2:この例では、TDRを使用して、抵抗のリードが長い場合の効果を測定します(長い抵抗リードを使用すること以外は例1と同じ)。図2Aは、この例で使用するマイクロストリップ・ラインの構造を示しており、ここではリード長が2.54cmの抵抗を使用しています。TDR測定による反射係数は71%です。ラインへの入力における立ち上がり時間は40psですが、波形が終端抵抗に達するときには約80psに延びています。

過剰リアクタンス機能を使用して、抵抗リードが引き起こすマイクロストリップ・ラインの過剰インダクタンスを測定することができます。画面下のボタンを押してマーカをオンとします。TDRで使用するマーカは、フロント・パネルの左側から数えて1番目と3番目のボタンです。過剰リアクタンスは、Markerタブの右下隅に表示されます。図2BのTDR波形を図1Bのものと比べると、不必要な反射を防ぐ上で適正な終端がいかに大切であるかが分かります。

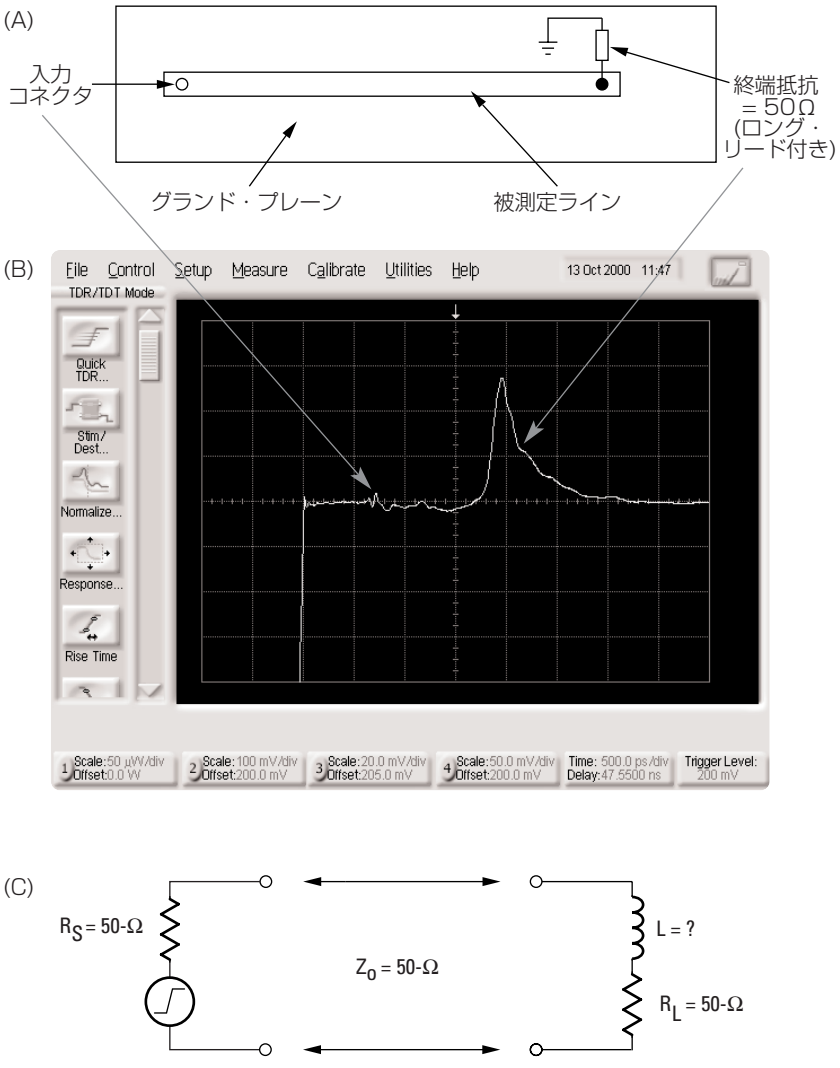


図2.終端抵抗のリードに起因する影響

TDR実験例3: この例では、グランド・プレーンがマイクロストリップ・ラインの特性インピーダンスに与える影響を測定します。図3は、伝送ラインの下部にあるグランド・プレーンの幅が、アクティブ・ラインの幅と同じだけ狭まっている場合の様子を示しています。TDR波形には、このグランド・プレーンにおける不連続性のため、12.4%の反射が生じていることが示されています。

マーカを使用して、長さ6.4cmのストリップ・ラインのインピーダンスが64.2Ωであると測定できます。確認のため式(1)を使用して、これを算出した値とよい一致をしていきます。

$$Z_{line} = \frac{1 + 0.124}{1 - 0.124} \bullet 50 = 64.2\text{-}\Omega \qquad (3)$$

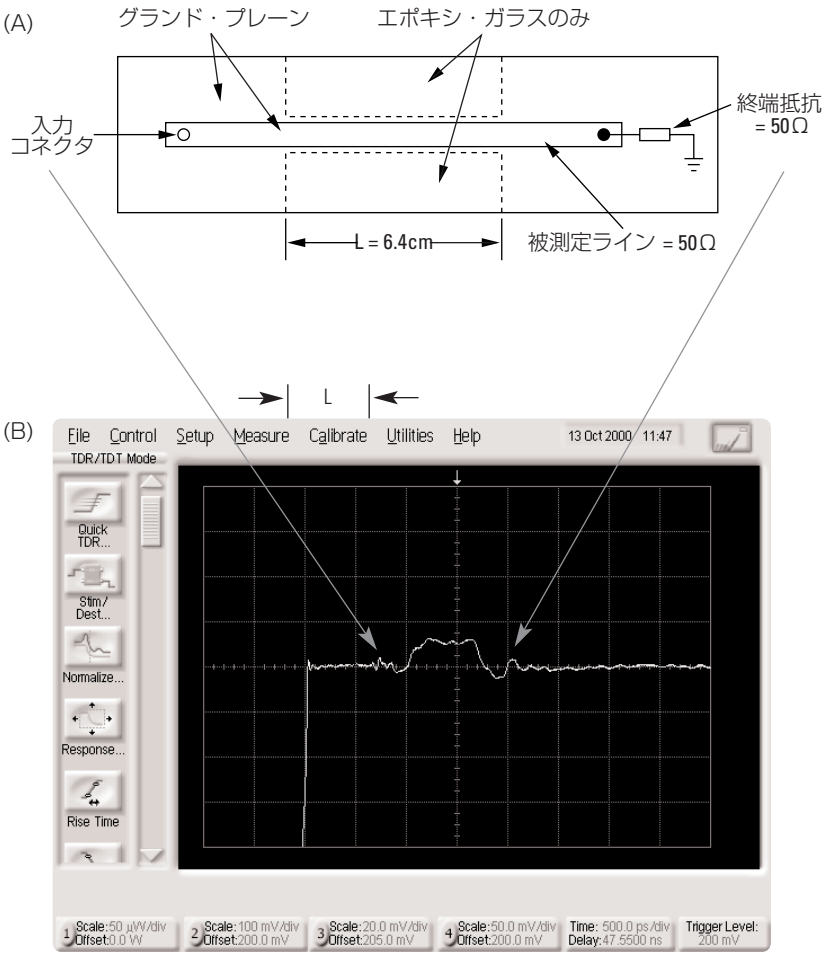


図3.グランド・プレーンの不連続部分の影響

TDR実験例4: 例4は例3に関連して、グランド・プレーンがアクティブ・ラインの真下ではなく、近くにある場合の反射を測定しています。この条件のテスト構成とテスト結果を、図4で示しています。TDR測定では、36%の反射が示されました。これは106Ωのインピーダンスに相当します。

$$Z_{line} = \frac{1 + 0.36}{1 - 0.36} \bullet 50 = 106\text{-}\Omega \qquad (4)$$

あこの反射は、グランド・プレーンがアクティブ・ラインの下部にないために、特性インピーダンスが変化したことが原因で生じます。このような部分では、ラインのグランドに対するキャパシタンスが減り、それとは逆にインダクタンスが増えます。結果的に、全体として特性インピーダンスが増えてしまいます。

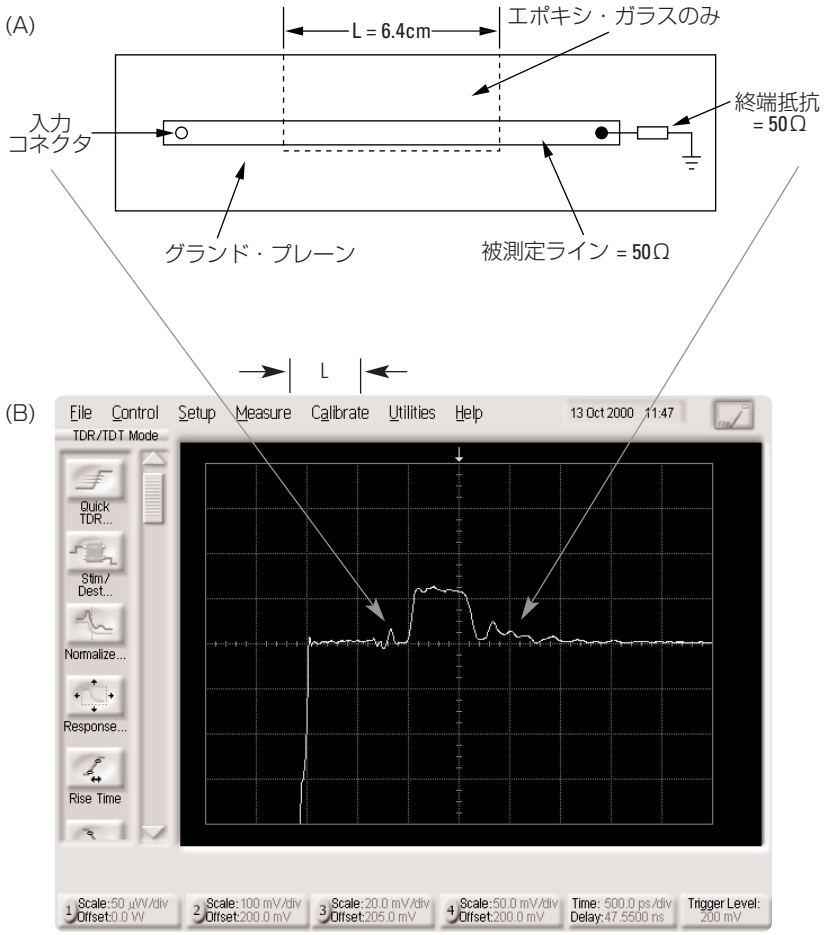
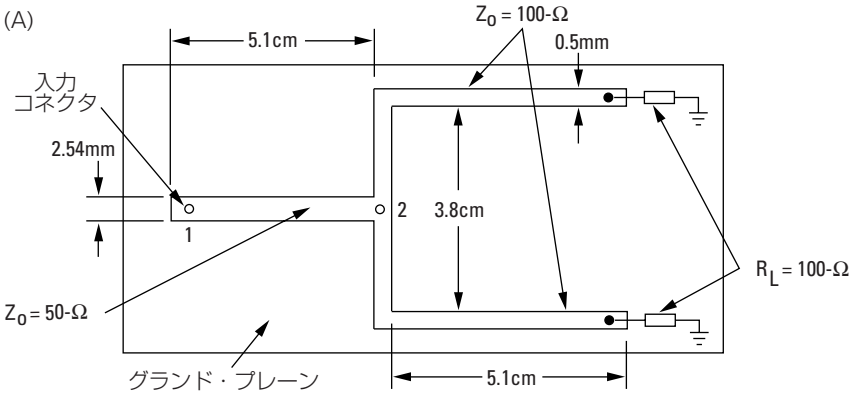


図4.グランド・プレーンの不連続部分の効果

TDR実験例5: 次の例は、ハイブリッド・ディバイダを使用したために起こる反射の測定です。この場合のマイクロストリップ・ボードの構造を、図5で示しています。ここでは50Ωラインが、2本の100Ωラインに分岐しています。分岐点としてのポイント2で、4%の反射が測定されています。

2本の100Ω分岐の間隔が広いため、この2つの分岐の間には、クロストークに起因したインピーダンス不整合は現れていません。



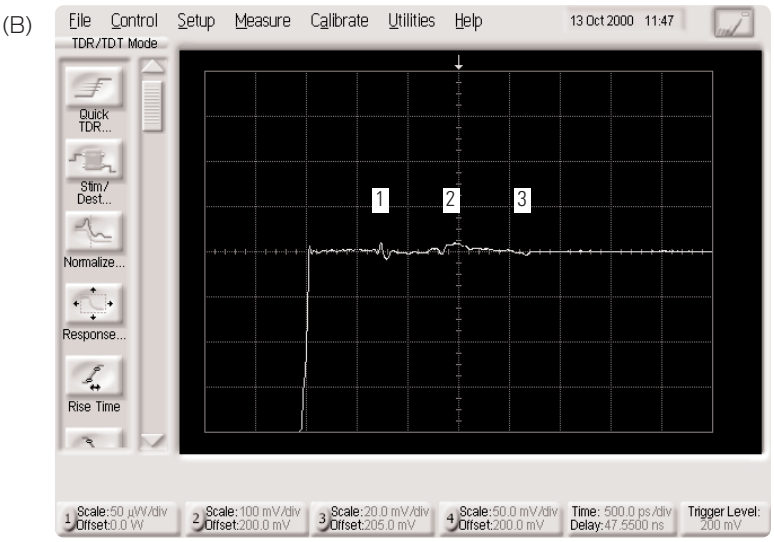


図5.ハイブリッド・ディバイダ

TDR実験例6: 図6では、例5と同じようにハイブリッド・ディバイダを使用していますが、2 本の100Ωラインが互いに接近しています。ポイント2における反射は8.4%ですが、これは2本のラインのクロス結合から起こります。

クロストークがある回路には、偶数モード(Z_{oe})か奇数モード(Z_{oo})の特性インピーダンスが存在すると考えられます。Z_{oe}は、電位が同じで、同じ方向に等しい電流を運んでいるストリップによって起こります。Z_{oo}は、量は等しいものの逆の電位を持ち、逆の方向に等しい電流を運んでいるストリップによって起こります。パッシブ・ライン上の逆クロストーク電圧V_Bは:

$$V_B = \left(\frac{Z_{oe} + Z_{oo}}{Z_{oe} + Z_{oo}} \right) E_1 \qquad (5)$$

ここで、E_1はアクティブ・ラインを伝搬する信号を表しています。図6Bのポイント2における逆クロストーク電圧は、入射電圧E_1の8%となっています。ラインが両方ともアクティブであるため、2mmの間隔の場合、一方のアクティブ・ラインに起因するクロストークはE_1の4%です。

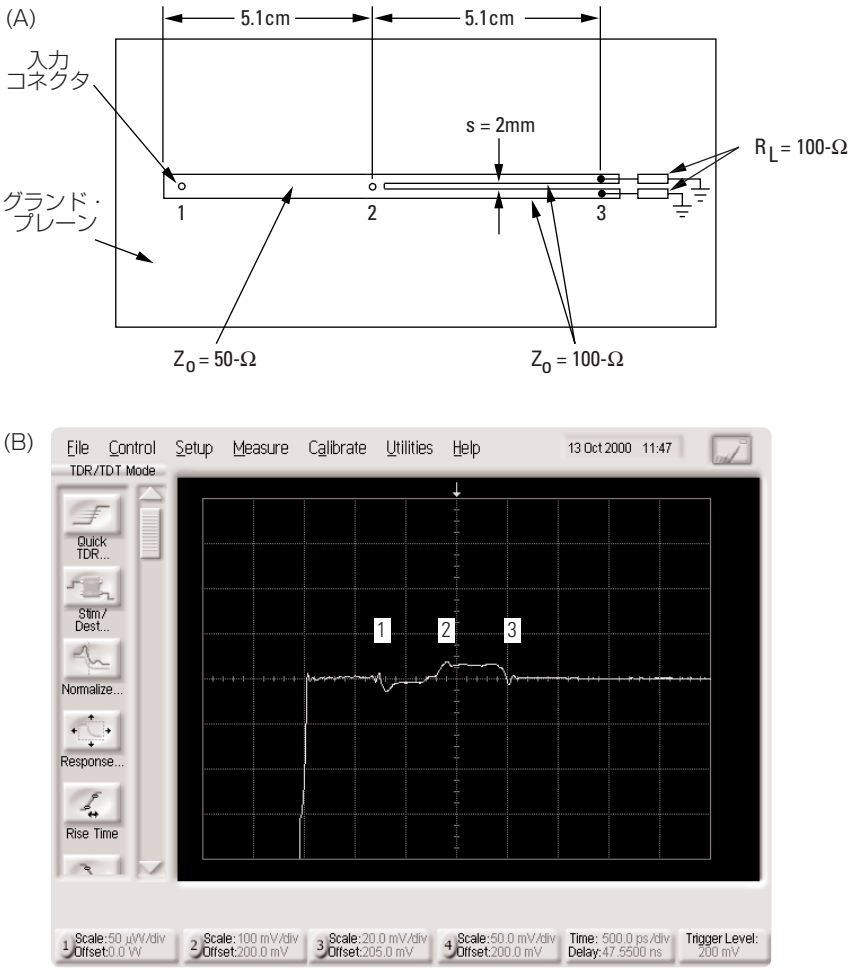


図6.クロストーク問題のあるハイブリッド・ディバイダ

2ライン間の相互クロストークとキャパシタンスは、クロストーク係数を求めるために使用されます。非常に長いライン(>1.5m)の場合を除き、マイクロストリップ・ライン上の順方向クロストークは、通常は逆方向クロストークよりもずっと小さな値です。同一の誘電材料で作られている場合、誘電性と容量性の誘電電流が相殺し合うため、順方向クロストークはストリップ・ライン全体に存在しているわけではありません。

TDR実験例7: 非常に高速なシステムでは、反射を最小限に抑えようとする場合には、ラインの精密な形状が重要になります。この例では、2種類のライン形状での動作を調べるために、図7Aのような構成を使用しました。一方のラインでは、コーナが角形になっています。このため、コーナのライン幅は、他の部分よりも広くなります。図7Bでは、ポイント2とポイント3のコーナにおける特性インピーダンスの低下により、-7.5%の反射が発生しています。もう一方のラインでは、ラインを同じ幅にするために、コーナを丸めてあります。図7Cでは、このラインのライン・インピーダンスが一定であることが示されています。すでに述べたように、ラインの終端では、抵抗のインダクタンスに起因する誘導性反射が起こります。このため、高速システムのための伝送ラインをデザインする場合には、ライン・エッジを丸めてスムーズにし、ライン幅を一定にする必要があります。また、終端インダクタンスを最小にするため、抵抗リードをできるだけ短くする必要があります。

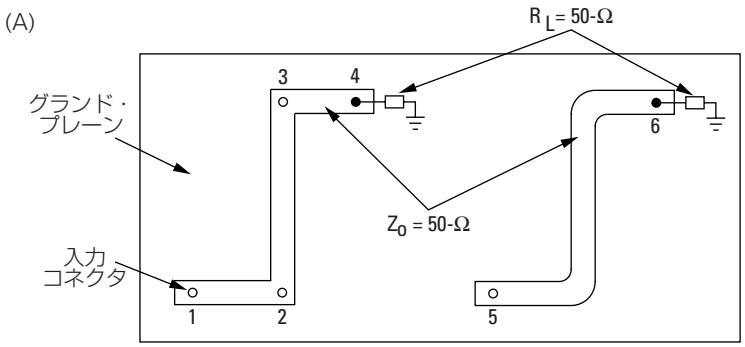


図7A.信号ラインの形状の違いによる反射

(B)

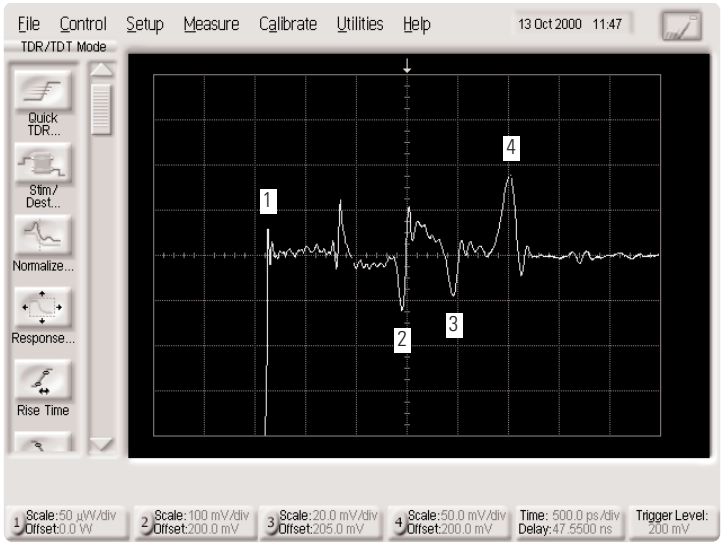


図7B.コーナの信号ライン形状が角形のときの反射

(C)

図7C.コーナの信号ライン形状を丸めたときの反射

本アプリケーション・ノートでは、マイクロストリップの形状とタイム・ドメイン・リフレクトメトリ測定の間に大きな関係があることを示しました。プリント基板の構造と対応するTDRシグナチュアの関係をよく把握しておくと、インピーダンスの不連続性によって起こる反射を最小に抑えた高速デジタル回路をデザインすることができます。デジタル信号が高速になるにつれて、プリント基板や関連構造のデザインとレイアウトにおいて、信号品質がさらに重要な役割を果たすことになるのは明白です。

参考文献

1. Dascher, D.,“Measuring Parasitic Capacitance and Inductance Using TDR” Hewlett-Packard Journal, April 1996, Article 11

2. Merkelo, H.,“Relationships Between Electromagnetic Emissions and Signal Integrity at High Speed”, DesignCon 1998 Symposium Paper, High-Performance System Design Conference

3. McTigue, M., and Duff, C.,“Differential Time-Domain Reflecto-metry Module for a Digital Oscilloscope and Communications Analyzer”, Hewlett-Packard Journal, December 1996, Article 7

4. Johnson, H., and Graham, M.,“High-Speed Digital Design”, New Jersey, Prentice Hall, 1993

5. “Time Domain Reflectometry Theory”, Agilent Technologies Application Note 1304-2, 1998

6. Sayre, E., and Chen, J.,“Design of Gigabit Copper Fibre Channel Equalized Cabling”, DesignCon 1998 Symposium Paper, Digital Communications System Design Conference

7. Mikalauskas, F.,“Electrical Performance Evaluation of Gigabit Copper Interconnects”, DesignCon 1998 Symposium Paper, Digital Communications System Design Conference

8. Fogg, M.,“Faster FireWire: Evaluating the 1394 Interconnect for Gigabit Data Rate Transmission”, Hewlett-Packard Insight Magazine, Volume 3, Issue 1998

9. Kelly, T.,“Treat DUT-to-Tester Links Like Transmission Lines”, Test and Measurement World, March 1998

10. Cosimano, R.,“Design Considerations for High-Performance Backplanes”, Electronic Design, April 1997

11. “Printed Circuit Board Considerations”, Vitesse Communications Products Databook, Application Note 1

Notes

Agilent Technologiesの測定サポート、サービス、支援

Agilent Technologiesは、お客様が抱えるリスクや問題を最小に抑えながら、お客様が受け取るValue（価値）が最大となることを常に目指しています。当社では、お客様が試験・測定機能の恩恵を確実に受け、必要なサポートを得られるように努めています。ご使用のアプリケーションに適した当社製品を選択し、それらを正しく適用することができるように、充実したサポートおよびサービスのリソースを提供しています。販売されるすべての測定器やシステムは保証の対象となっています。製品の販売完了後も最低5年間は、修理等のサポートがご利用いただけます。当社では、全体のサポートポリシーとして、「約束」と「利益」という２つのコンセプトを基本としています。

約束

「約束」とは、Agilentの試験・測定機器が、評判どおりの性能と機能を備えていることを意味します。新しい測定器を選定されるときには、その製品情報を提供いたします。これには、実際の性能仕様書はもちろん経験豊なエンジニアによる実用的なアドバイスも含まれます。当社の測定器をご利用になるときには、ご要望に応じて測定器が適切に動作していることを確認し、製品の操作のお手伝いをし、基本的な測定の支援をします。また、数多くのセルフ・ヘルプのツールをご利用いただけます。

利益

「利益」とは、Agilentの専門スタッフによる広範囲に渡る一歩進んだ測定サービスを、お客様に固有のテクニカル・ニーズもしくはビジネス・ニーズに合わせてご購入いただけることを意味しています。問題を効率よく解決し、お客様の競合力を向上するために、当社の様々なプロフェッショナル・エンジニアリング・サービスをご用命下さい。定期校正、付加価値をつけるアップグレード、保証期間外の修理、お客様サイトにおける教育やトレーニング、さらにシステムの設計やインテグレーション、プロジェクト管理に至るサービスを提供しています。世界各国にいる経験を積んだ当社エンジニアや技術者が、お客様の生産性を最大とし、当社測定器に対する投資効果を最善とし、さらに信頼のある測定確度を製品寿命に渡って確保するためのお手伝いをしています。

ホームページ
www.agilent.com/find/si

アジレント・テクノロジー株式会社
本社 〒192-8510 東京都八王子市高倉町9-1

計測お客様窓口
受付時間 9:00～17:00
（土・日・祭日を除く）
※FAXは24時間受付け

TEL 0120-421-345
(0426-56-7832)
FAX 0120-421-678
(0426-56-7840)
E-mail:mac_support@agilent.com

電子計測ホームページ
http://www.agilent.co.jp/find/tm

●記載事項は変更になる場合があります。
ご発注の際はご確認ください。

5968-0007J
010103301-NMC