

# プリント基板の 品質検証における クロストーク測定 のための 時間ドメイン手法



このアプリケーション・ノートでは、クロストークの要素を説明し、DSA8200 型デジタル・シリアル・アナライザと TDR モジュールを使用したプリント基板のクロストーク測定方法について説明します。

通信、ビデオ、ネットワーク、コンピュータ技術におけるデジタル・システムが高速になると、それらのシステムで使用されるプリント基板（以下 PCB）に対する品質要求も厳しくなります。信号周波数や立上り時間の高速化に直面している今、初期の PCB 設計では性能や動作が保証されません。

最新の PCB とその構成要素（エッジ・コネクタ、マイクロストリップ、ストリップ・ライン、コンポーネント・ソケット）は、伝送線路手法によってモデリングしなければなりません。PCB のクロストークの形態、メカニズム、影響を理解し、クロストークを最小にする技術を採用して PCB を設計すると、その PCB を採用したシステムの信頼性も向上します。このアプリケーション・ノートは PCB 設計とその周辺に関するものですが、ケーブルやコネクタの特性評価などのアプリケーションにも参考になるはずです。

## クロストークの影響

PCB の設計では、以下のような問題を引き起こす可能性のあるクロストークに注意しなければなりません。

- ▶ ノイズ・レベルの上昇
- ▶ 予期しないスパイク
- ▶ データ・エッジのジッタ
- ▶ 望まない信号反射

これらの問題が PCB 設計にどのように、また、どの程度の影響を及ぼすかは、使用するロジック・ファミリの属性、基板設計、クロストークのモード（逆方向または順方向）、アグレッサ・ラインとビクティム・ライン（後述）の両端の終端など、いくつかの要素で決まります。クロストークの検証方法に関する以下の説明を参考に、クロストークが回路設計に及ぼす影響を最小に抑えてください。

## 検証方法

PCB 設計におけるクロストークを最小にするには、容量とインダクタンスのバランスを考慮し、特性インピーダンスを目標にする必要があります。いずれにせよ、製造段階では、PCB のトレース・ラインのインピーダンスが制御されていなければなりません。設計した PCB の回路に影響を及ぼすクロストークの種類や程度は、使用する部品、コネクタ、ターミネーションによって量が決まります。時間ドメインで測定し、二周波数を計算し、PCB のクロストーク・モデルを理解することで、クロストーク解析の限度点を知ることができます。

## プリント基板の品質検証におけるクロストーク測定のための時間ドメイン手法

▶ アプリケーション・ノート

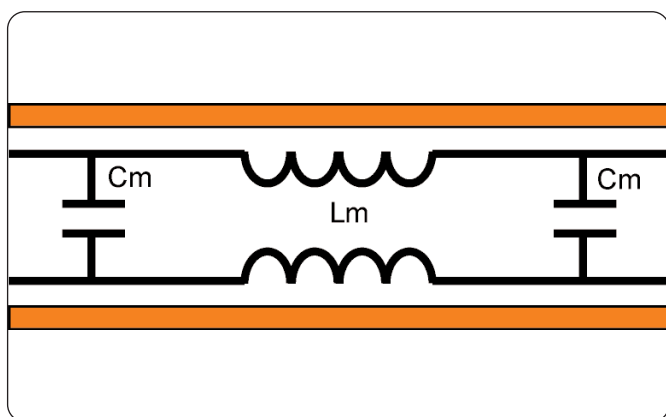


図 1. PCB のライン間の相互インダクタンス

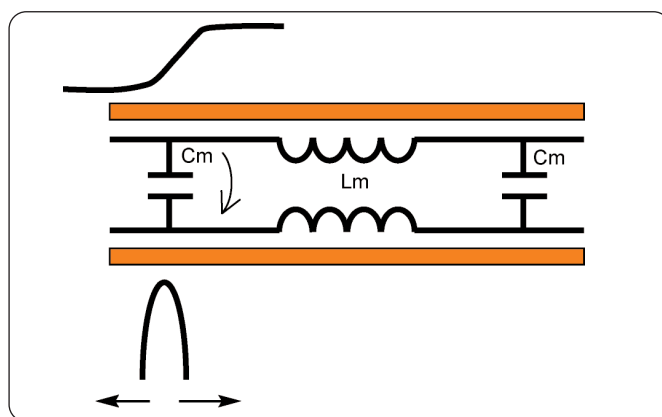


図 2. 容量結合のクロストーク

### 時間ドメイン測定

クロストークは、周波数ドメイン技術を使用して、周波数における EMI リミット・レベルに対する周波数スペクトラムのクロック高調波を観測するという方法で、測定および解析することができます。しかし、デジタル信号エッジを時間ドメインで測定する（具体的には、10～90% レベルの立ち上がり時間測定）と、以下のような利点があります。

- ▶ デジタル信号のエッジ速度、または立ち上がり時間から、各周波数においてどの程度のパワー・レベルがあるかを直接理解することができる。
- ▶ 信号エッジによる速度（立ち上がり時間）の定義から、クロストークのメカニズムを説明することができる。
- ▶ 立ち上がり時間から、以下に説明する二周波数を直接計算することができる。

このアプリケーション・ノートでは、立ち上がり時間測定を使ったクロストークの測定方法について説明します。

### 二周波数

デジタル・システムの動作の信頼性を保証するには、二周波数以下で設計回路を開発、検証する必要があります。デジタル・システムの周波数ドメイン解析によると、二周波数以上の周波数は減衰するため、クロストークには事実上影響しません。一方、二周波数以下の周波数には十分に高いパワーがあり、回路動作に影響を及ぼします。二周波数は以下の式で求められます。

$$f_{\text{knee}} = \frac{0.5}{t_{\text{rise}}}$$

### PCB のクロストーク・モデル

以下に示すモデルから、さまざまな形態のクロストークと、PCB のマイクロストリップ・ライン間の相互インピーダンスによってクロストークが引き起こされるメカニズムを説明することができます。図 1 は、相互インピーダンスの概念モデルを示します。このモデルでは、2本の伝送線路の長さに沿ってインピーダンスが均等に分布しています。

このモデルの説明にはアグレッサ・ラインとビクティム・ラインという用語を使用します。

- ▶ アグレッサ (Aggressor: 侵略者) とはクロストークの影響を与えるラインを指して呼びます。
- ▶ ビクティム (Victim: 被害者) とはクロストークの影響を受ける側のラインを指して呼びます。

デジタル・ゲート出力がアグレッサ・ラインに立ち上がりエッジを出力すると発生し、ラインを伝搬します。

- 1 相互容量 Cm と相互インダクタンス Lm による結合で、近くのビクティム・ラインにマクスウェルの原理により電圧を発生します。
- 2 ビクティム・ラインに発生するクロストーク電圧は、アグレッサ・ラインのパルスの立ち上がり時間と同じ時間幅の狭いパルスとして観測されます。
- 3 ビクティム・ラインでは、パルスは2つの方向に分かれ、それぞれは以下のように反対の極性で伝搬を開始します。
  - ▶ 順方向クロストーク – 信号源のアグレッサ・パルスと同じ方向に伝搬する成分
  - ▶ 逆方向クロストーク – 信号源の信号伝搬方向とは逆方向に伝搬するクロストーク

### クロストークの種類と結合メカニズム

ここでは、先に説明したモデルに基づいて、クロストークの結合メカニズムと2種類のクロストークについて説明します。

#### 容量結合

回路の相互容量によるクロストークの発生過程は次のとおりです。

- ▶ アグレッサ・ラインのパルスがキャパシタに到達すると、キャパシタはビクティム・ラインに幅の狭いパルスが発生させます。
- ▶ 結合パルスの振幅は、2線間の相互容量の値によって決まります。ビクティム・ラインの結合パルスの極性は順方向、逆方向ともに正極性で伝搬します。
- ▶ 結合パルスが2つの成分に分かれ、それぞれがビクティム・ラインに沿って逆方向に伝搬します。図 2 参照。

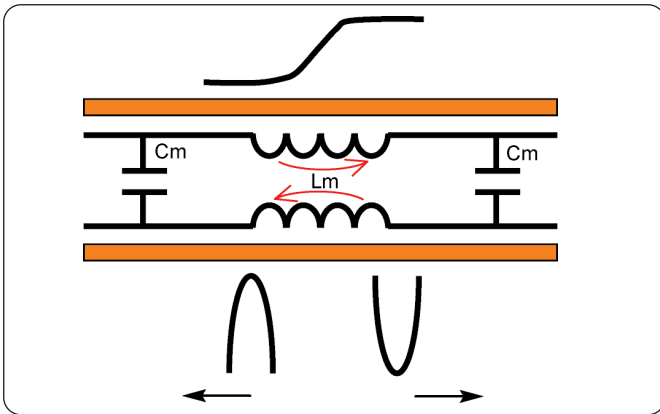


図 3. 誘導結合のクロストーク

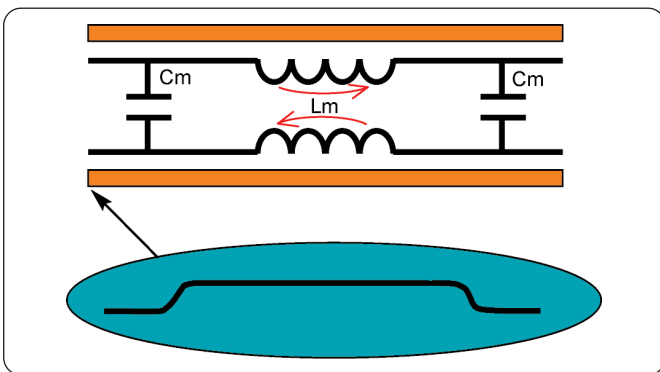


図 4. 逆方向のクロストーク

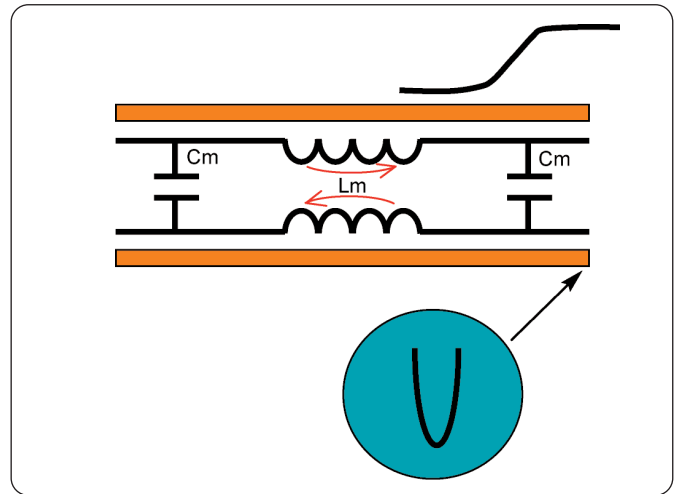


図 5. 順方向のクロストーク

### 逆方向クロストーク

先に説明したモデルでは、容量結合、誘導結合されたクロストーク電圧は、ビクティム・ラインのクロストークの位置で合成されます。この結果発生する逆方向クロストークには、次の特徴があります。

- ▶ 逆方向クロストークは、アグレッサ・ラインの正極とビクティム・ラインの正極の 2 つの同じ極性のパルスの合算となる。
- ▶ クロストークの位置はアグレッサ・パルスのエッジによって伝搬するため、逆方向クロストークは、ビクティム・ラインの左端のソース位置において、振幅の小さな、ライン長に比べて比較的幅の広いパルスとして観測される。
- ▶ 逆方向クロストークの振幅は、アグレッサ・パルスの立上り時間には関係なく、相互インピーダンスの値によって決まる。図 4 参照。

### 順方向クロストーク

先にも説明したように、容量結合と誘導結合のクロストーク電圧は、ビクティム・ラインのクロストークの位置で合算されます。順方向クロストークには次の特徴があります。

- ▶ 順方向クロストークは、2 つの逆極性のパルスの合算となる。
- ▶ アグレッサ・ラインの正極とビクティム・ラインの負極の合算を指します。
- ▶ 極性が逆であるため、合算された値は容量とインダクタンスの相対値によって決まる。
- ▶ 順方向クロストークは、ビクティム・ライン右端において、アグレッサの立上り時間の幅を持った狭いパルスとして観測される。
- ▶ 順方向クロストークは、アグレッサ・パルスの立上り時間で決まり、立上り時間が高速なほど振幅は大きく、形状は狭くなる。
- ▶ 順方向クロストークの振幅もペア信号線路長に依存し、クロストークの位置はアグレッサ・パルスのエッジに沿って伝搬するため、ビクティム・ラインの順方向クロストークのパルスはより大きなエネルギーを受ける。図 5 参照。

## 検証方法

PCB 設計におけるクロストークを最小にするには、容量とインダクタンスのバランスを考慮し、特性インピーダンスを目標にします。いずれにせよ、伝送ラインのインピーダンスを制御できなければ、PCB の製造に着手することはできません。設計した PCB の回路に影響を及ぼすクロストークの種類や程度は、使用する部品、コネクタ、ターミネーションによって量が決まります。時間ドメインで測定し、二周波数を計算し、PCB のクロストーク・モデルを理解することで、クロストーク解析の限度点を知ることができます。

## 誘導結合または電磁結合

回路の相互インダクタンスによるクロストークの発生過程は次のとおりです。

- ▶ アグレッサ・ラインを伝搬するパルスは、線路の分布容量をチャージしながら移動し、その電流はスパイク形状となります。
- ▶ この電流スパイクにより磁界が発生し、さらに、ビクティム・ラインに電流スパイクが発生します。
- ▶ 電磁結合は、ビクティム・ラインに極性の異なる 2 つの電圧スパイクを発生します。負のスパイクは順方向に、正のスパイクは逆方向に伝搬します。図 3 参照。

## プリント基板の品質検証におけるクロストーク測定のための時間ドメイン手法

▶ アプリケーション・ノート

### クロストークの特性評価

ここでは、シングル・レイヤの PCB を測定することにより、クロストークのメカニズムと種類について説明します。

注：多層プリント基板やそのグランド層で発生するクロストークと影響の詳細については、このアプリケーション・ノートの最後に紹介する資料をご参照ください。

### 計測器とセットアップについて

実験室でクロストークを効率的に測定するには、測定帯域 20GHz 以上の広帯域オシロスコープが必要です。被測定回路のドライブには、オシロスコープの立ち上がり時間と同じパルスを出力できる、高品質なパルス・ジェネレータを使用します。テスト対象の PCB と接続するケーブル、ターミネーション、アダプタについても、高品質の製品を使用してください。

当社の DSA8200 型と 80E04 型電気サンプリング・モジュールは、クロストークの測定に最適な組合せです。80E04 型 2 チャンネル TDR サンプリング・モジュールでは、内蔵の TDR ステップ・ジェネレータで立ち上がり時間 23ps のパルスをソース・インピーダンス 50Ω、振幅 250mV で出力することができます。これに、テスト対象の PCB を接続するだけで測定が行えます。

さらに最新の 80E10 型 (50GHz 帯域) では 12ps、80E08 型 (30GHz 帯域) では 18ps のパルスを入射することができます。

### 順方向クロストークの測定

順方向クロストークのみを測定する場合は、すべてのラインを終端して反射を防いでください。測定は、終端されたビクティム・ライン右端で行います。セットアップを図 6 に示します。

相互インダクタンスが、2 線間相互容量よりも大きなクロストークと結合すると、パルスは正のアグレッサ・エッジにおいてビクティム・ラインでは負極性となります。幅はアグレッサ・エッジの立ち上がり時間になります。計測器では、負のパルス (C4) の振幅は 48.45mV と測定されています。アグレッサ振幅は 250mV、ビクティム・ラインのクロストークは約 50mV であるため、この高速なエッジによってこのラインには 20% のクロストークが発生しています (図 7 を参照)。

80E04 型からの入力ステップ波形は非常に高速なエッジを持っているため、測定されるクロストークは、実際のロジック・ファミリのドライブ信号を表すには速すぎます。たとえば、ドライブ信号が 1.5ns の CMOS ゲートからの場合、クロストークのパルス幅はより広く、振幅は低くなります。このケースの場合、計測器の演算定義機能を使い、波形取込後のローパス・フィルタを生成します。図 7 の M1 波形 (白) がその結果です。M1 波形の垂直軸設定は、フィルタしていない波形に比べて 10 倍以上高い感度になっていることにご注意ください。

このように、演算による解析手法は、ラインに接続されたアグレッサ・パルスを物理的にフィルタした結果と同じ結果になることが証明されますが、次の手順を実行することでその等価性を検証できます。

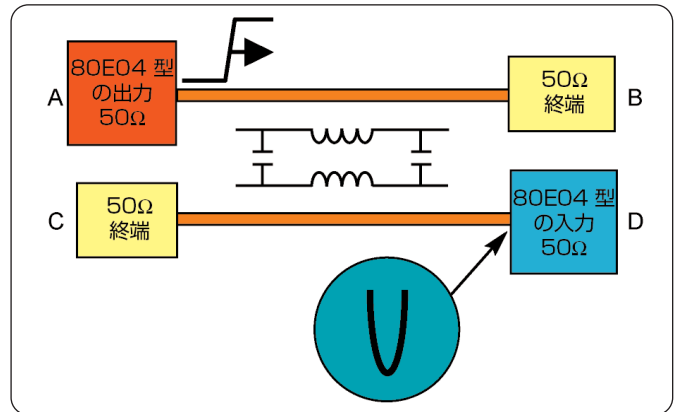


図 6. 順方向クロストークの測定

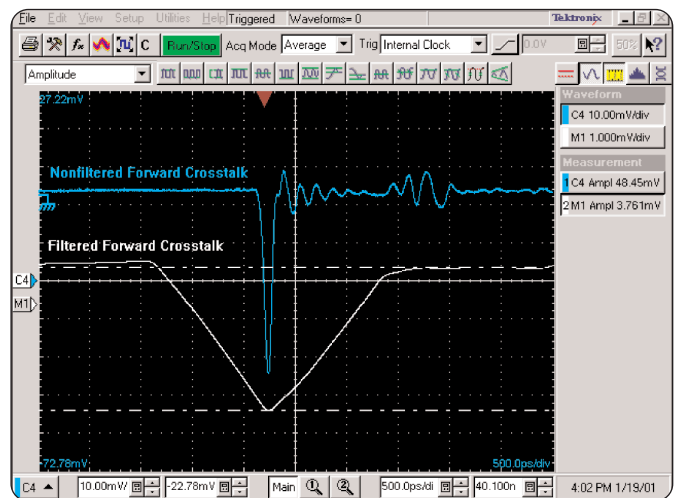


図 7. 測定された順方向クロストーク

- ▶ 同じ振幅の高速エッジと低速エッジで発生するクロストークを測定します。
- ▶ 次に、クロストークを高速エッジから低速エッジの立ち上がり時間にローパス・フィルタでフィルタし、結果を検証します。

測定された結果は、図 8 に示すように計測器のスクリーンに次のように測定されます。

- ▶ 赤い波形 (R3) は、低速のジェネレータ・パルス (黄色の波形、R2) によるクロストークです。
- ▶ 白い波形 (R4) は、高速の TDR パルス (緑色の波形、R1) によるクロストークです。
- ▶ 青い波形 (M1) は、白い波形をフィルタしてパルスの立ち上がり時間を低速にしており、ポストフィルタを使用したクロストークを表しています。この 2 つのクロストーク波形は、同じ電圧スケールで表示されています。

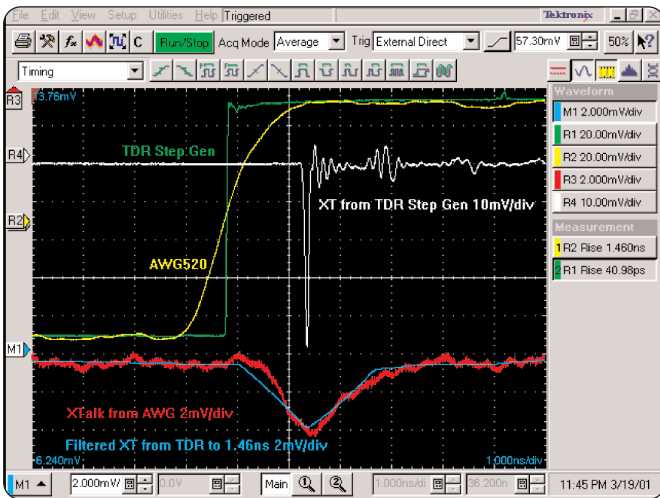


図 8. 順方向クロストークのポストフィルタ

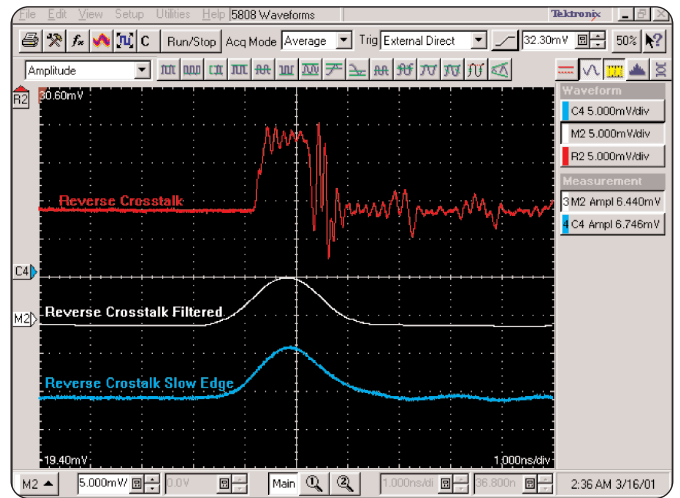


図 10. 測定された逆方向のクロストーク

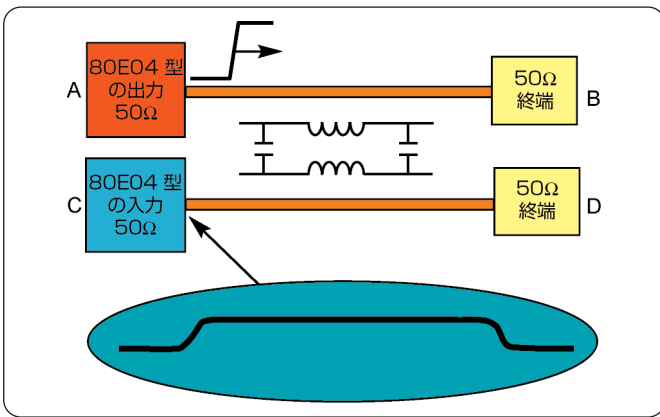


図 9. 逆方向のクロストーク測定

### 逆方向クロストークの測定

逆方向クロストークのみを測定するには、図 9 に示すように、両方のラインを 50Ω 抵抗で終端して反射を防ぎ、ビクティム・ラインの左端で測定します。

ライン端からのクロストークはソースから返ってくるため、リターン・パルスの振幅は低く、幅はライン長の 2 倍になります。図 10 の測定結果から、高速エッジからのクロストークは約 10mV で 4% に相当します。

逆方向クロストークの振幅は、アグレッサの立ち上がり時間には関係ありません。図 10 の 2 つの低い波形は、低速パルスからのクロストークと、高速パルスのポストフィルタされたクロストークを示しています。どちらの波形の振幅も約 6.5mV です。立ち上がり時間と比べたライン長により、この低速パルスは低い振幅となっています。この例では、立ち上がり時間はラインに比べて長く、エッジはフル振幅になる前にラインを伝搬しています。図 11 は、200ps の立ち上がり時間を持ったジェネレータ (DG2040 型) と、立ち上がり時間 17ps の 80E04 型サンプリング・モジュールによるクロストーク測定を示しています。

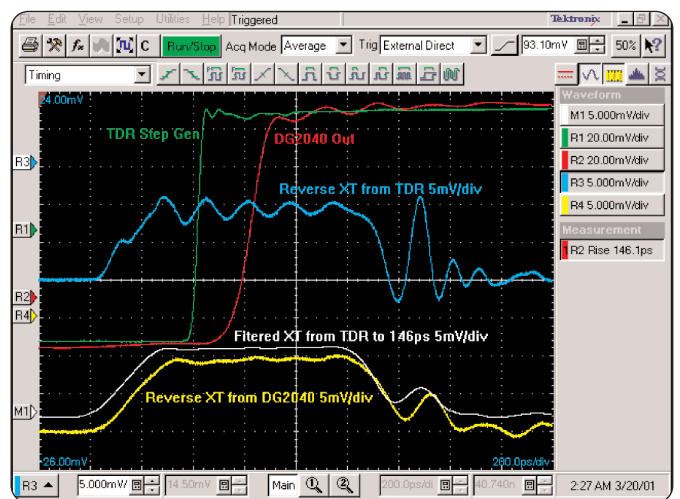


図 11. 逆方向のクロストークは立ち上がり時間とは関係しません。

図 11 の 3 つのクロストーク波形は、すべて 5mV/div の電圧軸スケールです。白い波形が 17ps 立ち上がり時間で計測したクロストークの結果であり、波形演算によって 200ps 立ち上げ時間にポストフィルタされたものです。この結果から、立ち上げ時間がラインより長くない限り、アグレッサの立ち上げ時間は逆方向のクロストークには影響しないことが確認できます。アグレッサの立ち上げ時間がライン長より長い場合、ラインに対してエッジはフル振幅にならないため、クロストークの振幅は低くなります。

### クロストークによる回路設計への影響

慎重に PCB を設計することでクロストークを低減し、その影響を排除することはできませんが、それでも PCB にはクロストークが残ります。これらのクロストーク対策としてライン端における適切な終端が必要です。しかし、終端によりクロストークの量や時間遅延も影響を受けるため、慎重な回路設計が必要です。次に、ライン端およびロジック・ゲート出力の終端によって、どの程度クロストークとその要因を減衰できるか、測定例を使って説明します。

# プリント基板の品質検証におけるクロストーク測定のための時間ドメイン手法

▶ アプリケーション・ノート

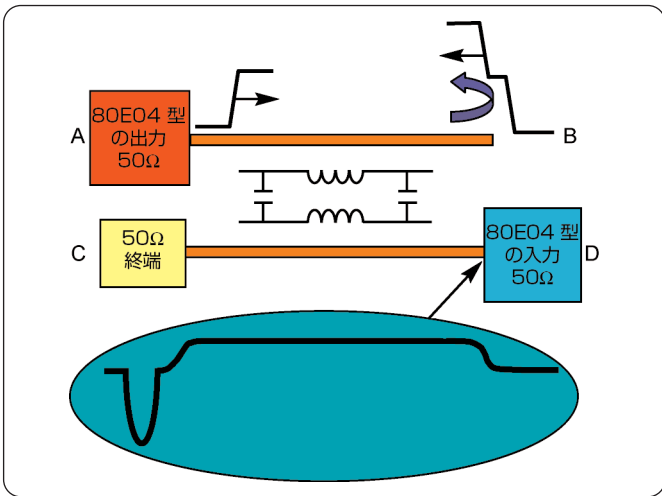


図 12. 線路端を終端しないクロストーク

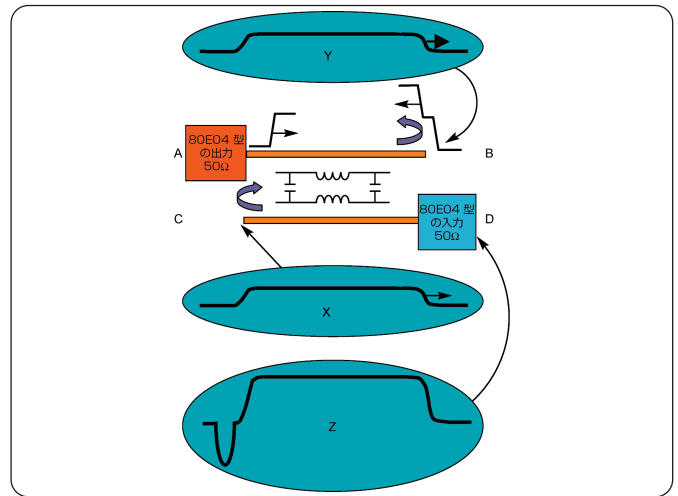


図 14. 両端を終端しないクロストーク

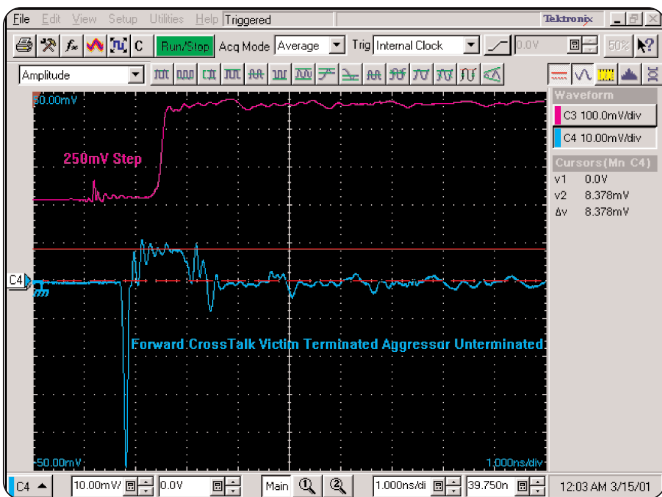


図 13. 線路端を終端しないで測定したクロストーク

## 受信端が終端されていない場合の影響

受信端で終端されないケースの測定のため、アグレッサ・ラインは終端しないでおきます。このセットアップでは、終端抵抗のないラインで CMOS ゲートをドライブする場合をシミュレーションします。図 12 に示すように、CMOS ゲートには、50Ω の一般的なライン・インピーダンスに比べて非常に高い入力インピーダンスがあります。

回路応答は、伝送ラインのオープン端から左端ソース方向に、フル振幅、同じ極性で反射となってパルスは到達します。ソースが終端されていると、2 番目の反射は起きません。ビクティム・ラインの右側線路端では、2 種類の波形が観測されています。幅の狭い元の順方向クロストークと、それに続いて、反射パルスで発生する、振幅が低く、幅の広いパルスです。図 13 では、これらのパルスをいっしょにして (C4)、アグレッサ・ラインのソースで測定されたアグレッサ・パルス反射 (C3) と共に表示しています。

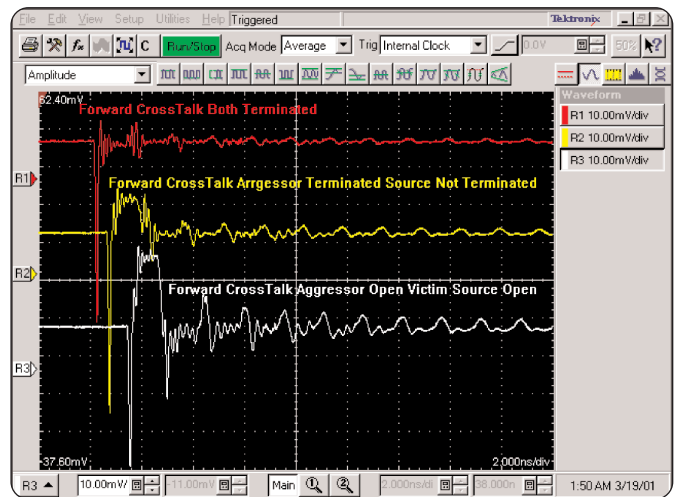


図 15. 両端を終端しないで測定したクロストーク

## ソースなし、または受信端終端がない場合の影響

終端のない 2 番目のケースとして、アグレッサ・ラインの両端がオープンで終端されず、ビクティム・ラインがオープンで、左端ソース終端がない場合を考えます。このケースでは、逆方向、順方向のクロストークと反射が累積され、図 14 に示すように、ビクティム・ラインのノイズ電圧が増加しています（隣接するラインでも同様の電圧が発生しているものと推測されます）。

ビクティム・ライン右側端 (Z) には元の順方向クロストークからのスパイクがあり、さらにアグレッサ・ラインの最初の反射からの逆方向クロストーク (X) が続きます。オープン・ソースで反射したオリジナルのビクティム・ラインの逆方向クロストーク (Y) は、同時に (X) と加算され、2 倍の電圧で幅の広いパルスになります。さらに、順方向クロストークの幅の狭いパルスは、オープン端で行ったり来たりします。図 15 に、この波形を示します。

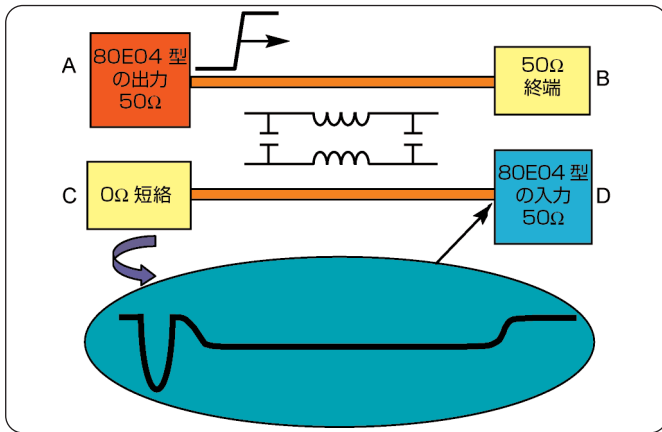


図 16. 低インピーダンス・ソースによるクロストーク

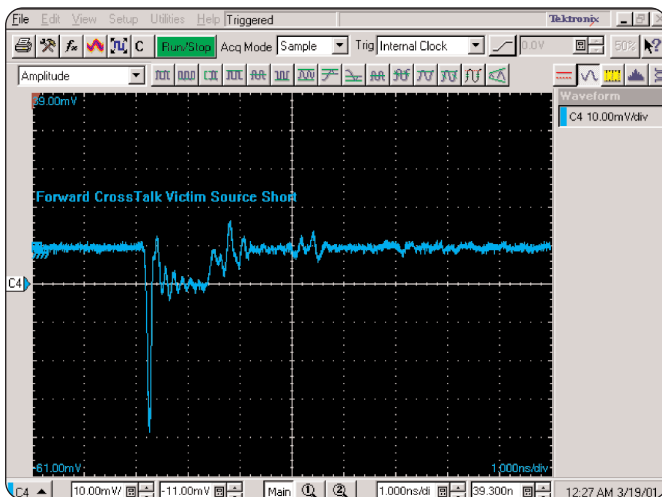


図 17. ビクティム・ソースを短絡して測定したクロストーク

注：すでに説明したように、測定する際は、ノイズ・レベルを抑えるために、すべての未使用のラインを終端します。終端しないと、これらのラインからのクロストークが結合され、ビクティム・ラインにさらにクロストークが発生することになります。

### 低インピーダンス・ソースの影響

ビクティム・ラインの低インピーダンス・ソースを考慮するため、ビクティム・ラインを ECL ゲートでドライブします。測定セットアップでは、短絡終端でゲートをシミュレーションします（高速 ECL ゲートの出力インピーダンスは 15 ~ 25Ω です）。測定のためのセットアップを、図 16 に示します。

ECL ゲート・インピーダンスとライン・インピーダンスの不整合のため、アグレッサ・ラインに負の反射が発生しています。アグレッサ・ラインにパルスがあると、アグレッサ・ラインの逆方向クロストークにより、負の極性でビクティム・ラインに反射が発生します。反射は、図 17 に示すように、ビクティム・ラインの両端で負のパルスとして観測されます。

### まとめ

TDR 測定ができる 80E04 型などの電気サンプリング/TDR モジュールを装備した、DSA8200 型を、このアプリケーション・ノートで説明した方法で使用すると、クロストークがもたらす設計上の課題に対処することができます。ここで説明した測定をプロトタイプで実行して、自分の設計がこれらの課題に対処できているかどうかを検証してください。クロストークの影響を正確に測定することと、正しい終端を施すこと。これがクロストークの影響を最小限に抑えるためのカギになります。

当社の DSA8200 型デジタル・シリアル・アナライザであれば、非常に高速な電気回路の設計と検証に対応できます。アプリケーションとしては、以下のようなものが挙げられます。

- ▶ PCB とケーブルのクロストーク測定。80E04 型電気サンプリング・モジュールで立ち上がり時間 23ps のステップ波形を出力し、DSA8200 型の演算機能で実際の回路速度をシミュレーションします。さらに最新の 80E10 型、80E08 型を使用すれば立ち上がり時間 12ps、18ps のステップ波形を出力可能です。
- ▶ TDR 測定。インターコネク、伝送ライン、マイクロストリップ・ラインのインピーダンスを測定および解析します。DSA8200 型と 80E04 型の組合せでは、通常の PCB 材料を 3mm、80E10 型との組合せでは 1mm の距離分解能で測定することができます。
- ▶ 電気の AC パラメータ測定。超高速ロジック・ゲートの基本動作を検証します。70GHz を超える周波数帯域、マルチチャンネル構成、非常に安定した時間軸などにより、1ps 以下のジッタまで、正確かつ柔軟に測定することができます。
- ▶ 通信分野の光インタフェースの測定。標準のレーザと光サンプリング入力を使用します。DSA8200 型と 80C00 シリーズに 80C00 シリーズ光サンプリング・モジュールを組合せることで、光信号のオンボード自動測定が可能です。

## 著者：

Tuomo Heikkilä  
Systems Applications Engineer  
Applications Project Center  
Tektronix Oy, フィンランド  
tuomo.heikkila@tek.com

## 参考文献：

Howard Johnson and Martin Graham: "High Speed Digital Design", Prentice Hall, ISBN 0-13-395724-1, 1993

Mark D Tilden: "Measuring Controlled Impedance Boards with TDR", Tektronix Inc. Application Note, 85W-8531-O, 1992

Tektronix, Inc. "11800/CSA803 Using Filtering to Control Rise Time", アプリケーション・ノート、85W-6893-O, 1993

Tektronix, Inc. "TDR Tools in Modeling Interconnects and Packages", アプリケーション・ノート

## Tektronix お問い合わせ先：

アメリカ 1 (800) 426-2200  
イタリア +39 (02) 25086 1  
インド (91) 80-22275577  
イギリスおよびアイルランド +44 (0) 1344 392400  
オーストリア +41 52 675 3777  
オランダ 090 02 021797  
カナダ 1 (800) 661-5625  
スイス +41 52 675 3777  
スウェーデン 020 08 80371  
スペイン (+34) 901 988 054  
大韓民国 82 (2) 528-5299  
台湾 886 (2) 2722-9622  
中央ヨーロッパおよびギリシャ +41 52 675 3777  
中華人民共和国 86 (10) 6235 1230  
中東アジア/北アフリカ +41 52 675 3777  
東ヨーロッパ/ウクライナおよびバルト海諸国 +41 52 675 3777  
デンマーク +45 80 88 1401  
ドイツ +49 (221) 94 77 400  
東南アジア諸国/オーストラリア (65) 6356 3900  
南アフリカ +27 11 254 8360  
日本 81 (3) 6714-3010  
ノルウェー 800 16098  
バルカン半島/イスラエル/アフリカ南部諸国  
および ISE 諸国 +41 52 675 3777  
フィンランド +41 52 675 3777  
ブラジルおよび南米 (11) 4066-9400  
フランス +33 (0) 1 69 86 81 81  
ベルギー 07 81 60166  
ポーランド +41 52 675 3777  
ポルトガル 80 08 12370  
香港 (852) 2585-6688  
メキシコ、中米およびカリブ海諸国 52 (55) 5424700  
ルクセンブルグ +44 (0) 1344 392400  
ロシアおよび CIS 諸国 +7 (495) 7484900  
その他の地域からのお問い合わせ 1 (503) 627-7111  
Updated 15 September 2006

## 詳細情報

当社は、最先端テクノロジーに携わるエンジニアのために、アプリケーション・ノート、テクニカル・ブリーフなどをご用意しています。当社ホームページ ([www.tektronix.co.jp](http://www.tektronix.co.jp)) または [www.tektronix.com](http://www.tektronix.com)) をご参照ください。



Copyright Tektronix. All rights reserved. Tektronix 製品は、米国およびその他の国の特許（出願中を含む）により保護されています。本文書は過去に公開されたすべての文書に優先します。仕様および価格は予告なしに変更することがあります。Tektronix、TEK は、Tektronix, Inc の登録商標です。その他の商標、製品名称などは、各社の商標または登録商標です。

06/03 MD/SFI

85Z-16643-0

8 [www.tektronix.co.jp/oscilloscopes](http://www.tektronix.co.jp/oscilloscopes)

**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・13:00~18:00 月曜~金曜 (祝日は除く)

当社ホームページをご覧ください。 [www.tektronix.co.jp](http://www.tektronix.co.jp)  
お客様コールセンター [ccc.jp@tektronix.com](mailto:ccc.jp@tektronix.com)