

差動プローブを使用した シングルエンド測定



概要

近年の高速差動信号の導入により、デジタル通信分野では技術革新が起きました。差動信号は、以前は外部インタフェース関連の用途で主に利用されていたニッチ分野でしたが、現在ではほとんどの主要コンピュータ・インタフェースで採用されています。

シリアルATAは高速データ・ストレージ・インタフェースで、FB-DIMMは次世代の高速メモリ・インタフェース、PCI Expressはコンピュータ・プロセッサ・ボード

上の高速入出力インタフェースです。これらの新しいコンピュータ・インタフェース規格は、物理レイヤにおいて、ポイント・ツー・ポイントの数ギガビット単位のシリアル・データ通信を使用し、差動信号を採用しています。差動信号への移行により、高速信号を測定するためのプローブ技術も、シングルエンド・アクティブ・プローブから差動アクティブ・プローブへと移行しました。差動プローブは、一般的に差動信号の測定が簡単であることに加えて、大幅な測定性能向上も実現しています。そのため、新たに導入される最高レベルのプローブは、シングルエンド設計ではなく、差動設計になっています。

差動プローブを使用したシングルエンド測定

▶ アプリケーション・ノート

差動信号がますます一般的になっていますが、シングルエンド測定が必要な場合も依然として多くあります。差動信号は、実際には2つの相補的（コンプリメンタリ）なシングルエンド信号で構成されています。そのため、差動信号の場合でも、シングルエンド測定が必要となります。差動信号でのシングルエンド測定は、信号ペアの共通・モードの測定や対称性のチェックに必要であり、これが過度の場合、差動出力に問題を引き起こす原因となることがあります。

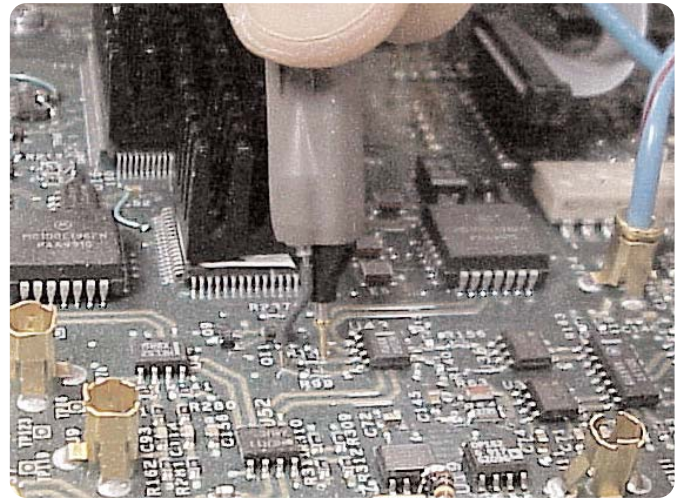
差動プローブは、シングルエンド測定にも使用できます。実際、差動プローブは、シングルエンド測定において、多くの点でシングルエンド・プローブよりも優れています。このアプリケーション・ノートでは、差動信号において差動プローブを使ってシングルエンド測定を行う方法と、このような測定で起こる問題について説明します。

オシロスコープのプローブ設計

オシロスコープのプローブは、オシロスコープの測定性能を、オシロスコープの入力コネクタから被測定回路まで拡張するためのツールです。高性能オシロスコープのプローブには、オシロスコープとの接続メカニズムの一部として、以下のような、測定の忠実性を維持するための機能があります。

- オシロスコープへ、高い周波数帯域、リニアな応答で信号を伝送します。
- プローブ・チップで信号をバッファすることで、回路負荷を低減します。
- プローブ伝送ラインをシールドすることにより、外部ノイズの混入を低減します。
- 柔軟性のある信号接続により、使いやすく、また被測定回路へ信頼性の高い接続が可能になります。

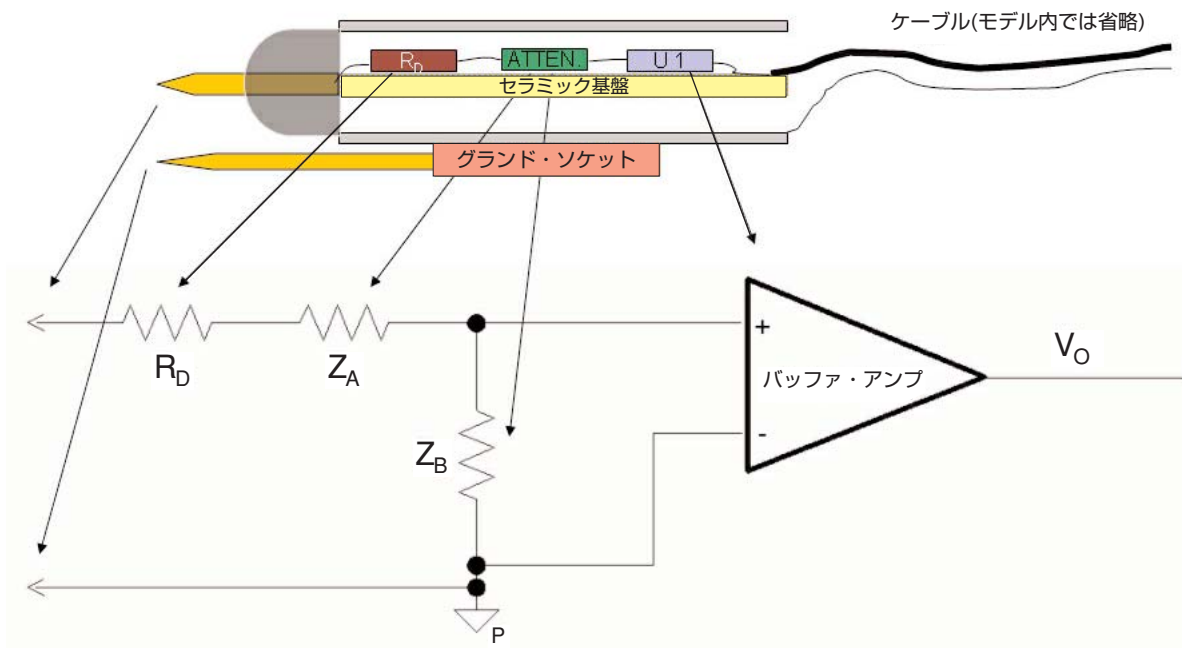
プローブでは、高い周波数帯域と低ノイズ性能が要求されるため、すべてのオシロスコープ用プローブは、信号伝送に同軸ケーブルを使用するように設計されています。同軸ケーブルは、一様な伝送線路構造により、単純なワイヤ接続よりもはるかに高い周波数応答を可能にしてい



▶ 図1. Zグラウンド・リード（196-3488-00）を使った、P7240型FETプローブによる測定例

ます。また、同軸ケーブルは電気的なシールド性能が高く、外部からのノイズ混入を低減できます。プローブでの例としては、回路接続用プローブ、信号伝送用同軸伝送線、オシロスコープのフロント・パネル・コネクタへの接続用プローブ制御インターフェースなどに使われています。

オシロスコープのプローブ設計は、測定性能に対する要求の増大に対応するため、年月と共に進化してきました。初期のプローブ設計では、高インピーダンスのオシロスコープ入力とのインターフェースに、主に受動回路を使用していました。高インピーダンスの受動プローブの周波数帯域は約500MHzが上限であり、低インピーダンスの受動プローブでは許容範囲を超えるDC信号負荷が生ずることがあるため、受動プローブを現在の高速アプリケーションで使用することには多くの制限が伴います。このため、このアプリケーション・ノートでは、受動プローブについては説明しません。受動プローブの詳細については、当社の「プローブ入門」を参照してください。このアプリケーション・ノートでは、アクティブ・プローブの設計および測定を中心に、特にシングルエンド・プローブから差動プローブへの移行について説明します。



▶ 図2. シングルエンド・アクティブ・プローブの簡易モデル

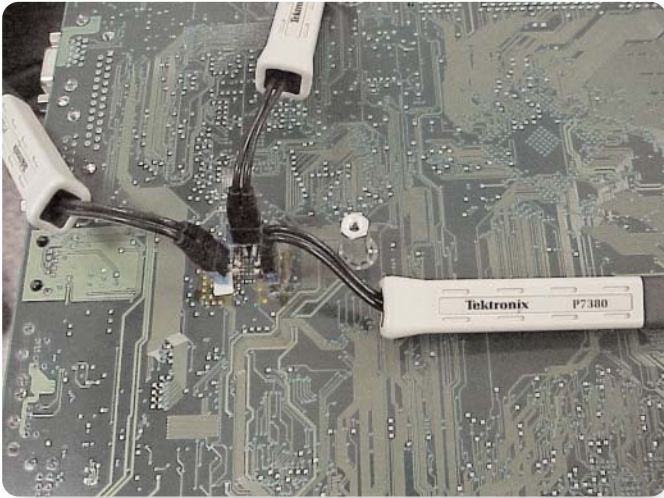
アクティブ・プローブは、プローブ・チップにバッファ・アンプがあり、プローブ負荷を緩和し、50Ωプローブ同軸ケーブルを駆動しています。プローブ同軸ケーブルは、オシロスコープのフロント・パネルのコネクタ背面にある、垂直軸チャンネルのプリアンプにおいて50Ωで終端されています。シングルエンド・アクティブ・プローブは、グランド基準の信号を測定するように設計されており、プローブ・チップに信号入力とグランド・コンタクトの2つの入力があります。図1には、当社P7240型4GHzシングルエンド・アクティブ・プローブを示します。この図では、自由度があり、間隔が可変できるグランド・リードを使用して、回路基板にプロービングしています。P7240型プローブには、信号ピンとグランド用のソケットがあります。これにより、信号ピンが摩耗した場合でも簡単に交換でき、グランド・コンタクトも柔軟に選択できます。従来のソケット構造では寄生成分がありますので、高い周波数帯域でのプロービングでは、ソケットの使用は限定されます。シングルエンド・プローブで使用されるグランド・コンタクトは、後で詳しく説明するように、信号忠実性を左右する重要な要素となります。

従来のシングルエンド・アクティブ・プローブの簡易モデルを図2に示します。この図では、一般的なシングルエンド・アクティブ・プローブの主要要素を示しています。

- 入力信号ピン：被測定回路との接続用ピン
- グランド・コンタクト：内部でプローブ・アッテネータ、バッファ・アンプ、ケーブル・シールドと接続されている
- プローブ入力ダンピング抵抗：高い周波数でのプローブ入力インピーダンスを大きくし、プローブ共振回路による問題を回避する
- 補正アッテネータ：高DC入力抵抗、広帯域、オフセット電圧コントロールにより、ダイナミック・レンジを拡張する
- プローブ・バッファ・アンプ：低入力キャパシタンス、広帯域、大電流出力により、プローブ・ケーブルをドライブする
- プローブ同軸ケーブル：信号アクセスを簡単にし、オシロスコープへの信号伝送性能を向上するため、通常は長さ1m以上

差動プローブを使用したシングルエンド測定

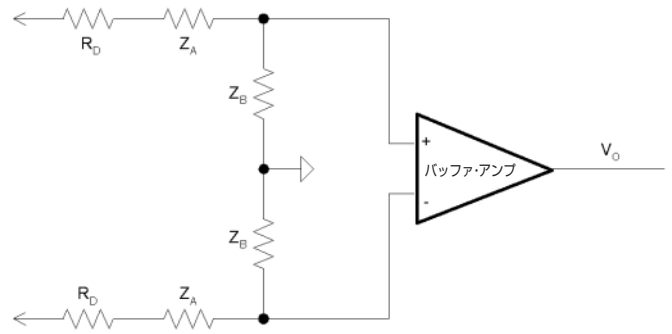
▶ アプリケーション・ノート



▶ 図3. Tip-Clip™ アセンブリによってプロービングしている3本のP7380型差動プローブ

簡易モデルでは示されていませんが、プローブ・ケーブルにも、プローブ・バッファ・アンプへの電源供給と、場合によってはオフセット電圧などの制御信号のためのワイヤも含まれています（プローブ・モデルについては、当社ウェブ・サイト（www.tektronix.co.jp）から、アプリケーション・ノート「TekConnectプローブ： シグナル・フィデリティとモデリング（60Z-15661-0）」をご参照ください。

差動アクティブ・プローブには、バッファ・アンプも含まれています。ただし、シングルエンド・アクティブ・プローブとは異なり、入力アッテネータおよびアンプ入力が平衡差動構造になっています。差動プローブのバッファ・アンプは基本的に、入力信号を差動からシングルエンドへ変換します。差動信号を使用する高速シリアル・データ信号では、この変換により、1つのオシロスコープ垂直チャンネル上で差動信号ペアを測定できます。差動プ



▶ 図4. 差動アクティブ・プローブの簡易モデル

ローブは理論上の差動信号レシーバとして効果的に機能し、差動レシーバ入力で受信した信号を表示します。図3には、8GHzの差動プローブである当社P7380型を示します。この図では、プローブを差動データ信号ペアに接続するため、はんだ付けしたTip-Clip™アダプタを使用しています。はんだ付けまたは可変間隔の手持ちおよび固定用途向けにも、P7380型プローブ用の各種Tip-Clipアダプタが用意されています。

差動アクティブ・プローブの簡易モデルを図4に示します。差動測定の性能、特に寄生要素が応答に大きく影響する高周波では、差動プローブの平衡差動入力構造の一致が重要です。差動プローブ測定の利点の1つに、コモン・モード・ノイズ除去があります。特に高周波では、入力信号パスの一致と、差動プローブでのバッファ・アンプ入力が、CMRR（Common Mode Rejection Ratio、同相除去比）性能の向上にとって重要な設計タスクとなります。シングルエンド・プローブおよび差動プローブのいずれのモデルも、図面上のアンプ記号は似ていますが、差動プローブ・バッファ・アンプはCMRRを向上するように最適化されています。

シングルエンド・モデル（図2）と差動プローブ・モデル（図4）を比較すると、シングルエンド・プローブは基本的に非対称構造であることがわかります。シングルエンド・プローブの入力インピーダンスは、DCでは非常に高く、プローブの入力アッテネータの容量成分のため周波数と共に低下します。一方、シングルエンド・プローブのグラウンドは、回路ボードの電源をプローブのグラウンド・リードでショートしたことがあればわかるように、DCでは非常に低く、高周波ではプローブのグラウンド・リードのインダクタンス特性のため大幅に低下します。これに比べ、差動プローブの入力インピーダンスは対称であり、各入力は前述のシングルエンド・プローブと同様に機能します。差動プローブのグラウンド接続は、通常は必要ありません、または適切ではありません。差動プローブでグラウンドを使用しないことは、後述のように、忠実性の高い測定を行う上で有利になります。

シングルエンド・プローブ、差動プローブのいずれでも、被測定回路とは2点の接続が必要です。接続点間隔が定まらない、異なった回路にも柔軟に接続できるよう、プローブには接続点の間隔を変えられることが必要です。接続点の間隔を柔軟に設定できる機能は便利ですが、全帯域で性能を維持するため、現在の高性能プローブでは間隔の可変範囲が数ミリ程度に制限されます。これよりも広い接続点間隔も可能ですが、プローブ性能が低下します。シングルエンド・プローブでの信号入力は、プローブ負荷と測定性能を最適化するため、通常は短い固定ピンです。シングルエンド・プローブでのプローブ接続点の間隔は、通常はフレキシブル・グラウンド・リードまたは長さの異なるグラウンド・リードによって変更します。平衡信号入力が必要な差動プローブでは、接続点の間隔は接続方法によって異なります。はんだ付け接続の場合は、ダンピング抵抗のリードまたはチップ・クリップ入力

ワイヤ・リードの間隔を調整するだけで、間隔が変更できません。手で支える場合、固定接続の場合は、一定の範囲内で、手動で間隔を調整できる可変間隔アダプタを使用します。

プローブ測定の信号忠実性は、被測定回路とのプロービング方法によっても影響を受けます。はんだ付け接続の場合は、はんだ付けの不良がなければ良好です。手持ちまたは固定接続の場合は、両方のプローブ接続ピンを回路のノードに確実に接続することが重要です。2つの接続ピンのいずれかのみみ接続しても有効な信号に見えますが、実際には測定の忠実性は低下、多くの場合、著しく低下します。最高のプロービング設計であれば、プローブの入力ピンの機械的な適合性が提供され、2つの入力ピンにかかる力のバランスが保たれ、両方のピンが回路に確実に接続しやすくなります。シングルエンド・プローブの場合、機械的な適合性は、ばね付きまたは弾力性のあるグラウンド・リードで実現されます。差動プローブの場合、一部の新しいプローブ設計では、機械的な適合性は、手持ちまたは固定アダプタでエラストマ・パッドを使用して実現されています。

シングルエンドのオシロスコープ・プローブには、プローブ・チップにグラウンド接続用のコネクタがあり、被測定回路のグラウンド基準点に接続するように設計されています。シングルエンド・プローブで測定される電圧は、信号とグラウンド基準点間の電圧差です。前述のように、これは本質的に非対称の測定構成であるため、信号測定の忠実性において問題となることがあります。グラウンド基準接続は、多くの測定問題の原因となる可能性があるため、電子回路用途で使用するグラウンドの性質を理解することが重要です。

差動プローブを使用したシングルエンド測定

▶ アプリケーション・ノート

信号およびプローブのグランド接続

歴史的に見ると、グランド接続は、言葉が示す通り、大地面への導電接続を意味していました。初めて実用化された電気通信システムである電報の開発者は、電報に使用される2値信号のリターン電流パスとして、大地に十分な導電性があることを発見しました。地面をグランドのリターン・パスとして使用することは、後に登場する電話システムのアナログ音声通信ではノイズが多すぎることがわかりましたが、地面への直接グランド接続は、現在でも配電システムで利用されています。配電システムにおける地面へのグランド接続は、不具合状態での電流を大地に流すことで、人体や機器を過度の電圧レベルから保護するために使用されています。

電子機器では、グランドの概念は、すべての内部信号の共通基準電圧として使用されています。この内部信号グランドは、一般的には、低インピーダンス・パスを経由して、機器のシャーシと電源システムの保護用グランドに接続されています。理想的な信号グランドとは、信号のリターン電流を吸い込むまたは吐き出しても、電圧レベルが変化しないゼロポルト基準点です。このようなゼロ抵抗かつゼロ・インダクタンスのグランドは、回路図では表記されていますが、現実には存在しません。理想的なグランドは概念的なモデルであり、特に現在の高速回路設計では大きな制限があります。理想的でない、言い換えると、現実的なグランド・インピーダンスによる影響、特に誘導成分を十分に理解しないと、重大な設計問題が発生し、信号測定エラーが起こりやすくなります。

グランドは、回路図では単に共通の回路記号として表記されていますが、電子回路設計におけるグランド構造の物理的なレイアウトは、回路内のノイズ制御と回路外のノイズ抑制の両方にとって非常に重要です。現在の高速回路設計では、多くの信号接続を伝送線で実装する必要があり、信号間のクロストークが設計上の大きな制約となっているため、これが特に重要になります。

高速回路で最も一般的なグランド構造は、低抵抗と、おそらくより重要と考えられる低インダクタンスのグランド

基準接続を持った完全な回路基板グランド・プレーンです。

ほとんどの回路図には記載されていませんが、信号グランドの重要な役割として、リターン電流のパスを提供することが挙げられます。高速回路でグランド・プレーンが使用される主な理由は、制御された信号リターン電流のパスがあることであり、これによりそれぞれの信号を隔離することが可能になります。回路基板の表面の信号トレース用にマイクロストリップ伝送線構造を構築するには、内部レイヤのグランド・プレーンが一般的に使用されます。信号トレースとグランド・プレーン間の相互インダクタンスが高いため、信号リターン電流は、主に信号トレース対象の低インピーダンス・チャンネルに流れます。このマイクロストリップ伝送線のプレーン・レイヤの物理トポロジは、緊密に結合されたリターン電流パスの構築の主要素となります。これは、電源プレーン・レイヤがグランド・プレーンと同一の低インダクタンスのリターン電流パスを提供できるためです。

この場合の電源プレーンは、ACグランド構造のように機能します。また、リターン電流が電源プレーンとグランド・プレーンのレイヤ間で必要に応じて流れることができるようにするため、通常は優れたバイパス・キャパシタ・アレイが必要になります。

完全なグランドおよび電源プレーンを持つ多層回路基板を使用し、バイパス・キャパシタをうまく分散することで、低インピーダンス電源用の高速回路での要求にも対応します。低インピーダンス電源がない場合には、グランド・プレーン層を流れるスイッチング電流の影響により、グランド・プレーンで大幅なグランド電位差が生じることがあります。回路基板全体にバイパス・キャパシタを分散すると、スイッチング電流の影響が局所的になる傾向があり、このような過渡電圧のサイズを削減できません。電源分散での非ゼロ・インピーダンスは、電源とグランドの両方のプレーンで電位差が生じることに加えて、シャーシ・グランドに関するコモン・モード・ノイズ電圧が生じ、グランド・プレーンに接続されたワイヤまたはケーブルからの放射ノイズが発生する場合があります。

グランド・プレーン層を使用することで、信号リターン電流のパスの制御だけでなく、電磁界結合効果によるノイズ混入を防ぐこともできます。最高速の信号のインピーダンス・レベルが相対的に低いため、高速回路のノイズ結合効果は主に容量性ではなく誘導性になります。1つの信号ループ内での高速信号電流の変化により生成された電磁界は、相互誘導結合による他の近傍の信号ループにも影響することがあります。現在の高性能回路設計では信号密度が高く、信号間でのクロストーク問題が悪化する傾向があります。誘導結合の程度は露出ループ面積によって異なるため、信号トレースに近いグランド・プレーンを使用することでループ面積が減少し、その結果ノイズ結合の程度が減少します。

オシロスコープ・プローブの電圧測定は、常に2つの回路ノード間で行います。シングルエンド電圧プローブの場合は、信号入力およびグランド接続があり、2つの回路ノードのいずれかが常にグランドになります。プローブの内部グランド接続があるため、プローブ信号入力だけを被測定回路に接続するだけで、シングルエンド・プローブ測定を実行できるように見えます。実際には、特に低入力容量アクティブ・プローブの場合に、信号入力だけのプローブ接続で信号波形が表示されます。信号入力だけのプローブ接続で形成されるグランド・ループは非常に大きく、プローブ・ケーブル・グランドからオシロスコープに戻るパス、オシロスコープのシャーシからオシロスコープ電源の保護用グランドまでのパス、AC配電ネットワークから被測定回路の電源までのパス、最後にローカルの回路のグランドまでのパスを含みます。この大きなループ面積により、プローブ測定の際に、測定対象の信号に大きなノイズが混入することがあります。ノイズ混入の可能性があるため、この信号入力だけのプローブ接続は、プローブの位置および移動に非常に左右されることに留意する必要があります。また、信号の高周波成分が、プローブ・チップのグランド・シールドと回路のグランドの間の寄生容量結合経路で、ローカルのリタ

ーン電流パスを流れます。低インダクタンスのプローブ・グランド・リードがない場合、信号入力だけのプローブ接続は、プローブ・チップのキャパシタンスおよび長いプローブ・ケーブルのシールドとグランド・パスの相対的に大きな寄生インダクタンスのため、プローブ入力共振にも影響を受けます。

プローブのグランド・リードが被測定回路に接続されているときでも、測定の忠実性に関していくつか考慮すべき問題があります。

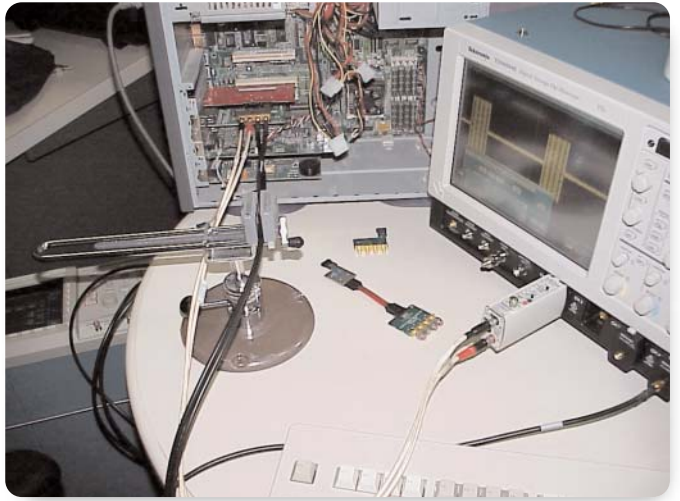
- プローブ接続の負荷が原因で、被測定回路の信号が乱れることがあります。
- プローブのグランド・リードによるコモン・モード電流と、被測定回路および接続したオシロスコープのグランド電位差からのシールドが原因で、プローブのグランド接続により、測定対象のプローブ信号にノイズが混入することがあります。
- プローブのグランド・ループにおいて、測定点に近い他の信号ループから結合された誘導ノイズがピックアップされることがあります。
- プローブ・グランド・リードをローカル回路のグランドに接続した場合は、短いプローブ・グランド・リードのプローブ・グランド・パスのインダクタンスが低いため、プローブ入力共振は存在しますが、信号入力だけのプローブ接続よりも大幅に高い周波数になります。理論的には、このプローブ入力共振周波数がプローブ帯域よりも高くなると、測定の忠実性への影響が最小になります。

プローブ・リードを可能な限り短くすることで、上記のプローブの問題のほぼすべてを緩和できます。プローブのグランド接続は同軸接続が理想ですが、通常の用途ではこれは現実的ではありません。

差動プローブを使用したシングルエンド測定

▶ アプリケーション・ノート

前述の問題を考慮すると、シングルエンド・プローブでも、高速回路において信号忠実度が高い測定が可能であることは意外に思われるかもしれません。たとえば、回路基板上で離れた2点間の信号を、2本のシングルエンド・プローブを使用してどのように測定、比較するのでしょうか。大きく離れた2点間のグラウンド電位は、大きく異なっている可能性が高いため、信号忠実度を高めるためには、2本のプローブのグラウンド・リードをどこに接続すればよいのでしょうか。これには、各プローブのグラウンド・リードを、可能な限り短いプローブ・グラウンド・リードを使用し、測定対象の個々の回路ノードに近いグラウンド・ノードに接続します。各プローブは、プローブのグラウンド・リード間に大幅な電位差がある場合でも、ローカル信号のグラウンド基準を使用できます。これは、プローブ・チップおよびプローブ・ケーブル・アセンブリのノイズ混入があるからです。プローブ・ケーブルには、同軸ケーブルが使用されています。同軸ケーブルには、容量結合ノイズ信号に対してシールド効果があります。さらに重要な点として、可聴周波数範囲を超える伝導性と誘導性結合の両方のコモン・モード信号を除去します。同軸ケーブルでは、信号は芯線を伝搬し、リターン電流はケーブル・シールドの内部表面を伝搬して戻ります。芯線とシールドの内部表面の結合が緊密なため、同軸ケーブルはコモン・モード・トランスフォーマのように機能します（Henry Ott著「Noise Reduction Techniques in Electronic Equipment」*1を参照）。コモン・モード・トランスフォーマは、DC結合されていて、ノーマル・モードの信号は減衰なしで通過させますが、シールドによるカットオフ周波数（ほとんどの同軸ケーブルでは可聴帯域内）を超えるコモン・モード信号は除去します。プローブ・チップもシールド構造で、プローブ・ケーブルの同軸パスの延長として機能します。プローブによるこのようなコモン・モード信号フィルタリングにより、比較的ノイズの多い環境でも優れた信号忠実度で測定できます。このコモン・モード・フィルタリングの弱点は、プローブのグラウンド・リードです。プローブのグラウンド・リードは、プローブの同軸構造の延長ではない



▶ 図5. P7380SMA型 SMA入力タイプの差動プローブでコンプライアンス・テストを実行する

め、プローブのグラウンド・リードを流れるコモン・モード・ノイズ電流は、コモン・モード・トランスフォーマの動作では除去されず、測定対象の信号に結合されたノイズとして現れます。グラウンド・リードのインダクタンス・ノイズ結合を最小限に抑えるため、プローブのグラウンド・リードはできる限り短くする必要があります。

差動アクティブ・プローブは、一般に平衡高インピーダンス入力を持ち、グラウンド接続がありません。一部の差動プローブには、グラウンド基準が必要なバッテリー駆動の測定アプリケーションで使用するためのグラウンド接続ソケットがあります。しかし、一般的には、高性能差動プローブにはグラウンド接続がありません。差動プローブ入力アッテネータは、ホストのオシロスコープをグラウンド基準としますが、通常は内部プローブ・グラウンドを測定対象回路のグラウンドに接続する必要はありません。実際には、このような接続を行うと、シングルエンド・プローブで見られるようなグラウンド関連の問題が発生することがあります。

*1 Ott, Henry W.著「Noise Reduction Techniques in Electronic Systems」第2版 Wiley出版 1988年

差動アクティブ・プローブにはグランド接点がなく、平衡信号入力であるため、シングルエンド・プローブと比較すると次のような利点があります。

- プローブのグランド接続による、測定対象回路のグランド基準の変動がない
- プローブのグランド・ループによるノイズ信号が、測定信号パスに混入することがない
- 平衡プローブ入力構造とプローブの高CMRRにより、コモン・モード・ノイズが減少する
- 間違ったグランド接続による、信号または電源のショートの問題がない

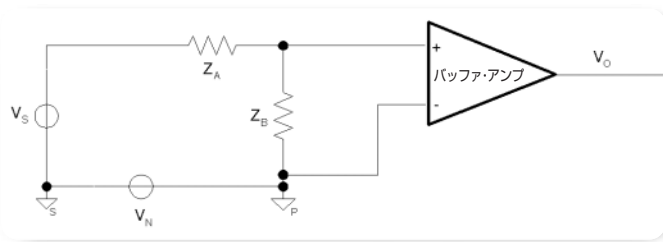
最新の差動アクティブ・プローブは、SMA入力です。図5では、8GHzのSMA入力プローブである、テクトロニクスP7380SMA型を、SMAコネクタ・インタフェースを装備した高速シリアル・データ信号ボードに接続しています。SMA入力プローブは、プローブで信号の終端と測定の間方を行う、高速シリアル・データの信号パスのコンプライアンス・テスト用に設計されています（シリアル・データのコンプライアンス・テストの詳細については、当社ウェブ・サイトから、アプリケーション・ノート「シリアル・データ適合性と検証測定の基本（55Z-16736-0）」をご参照ください）。新しいシリアル・データ規格の信号にクリーンな信号終端を提供するため、SMA入力プローブのいずれの入力も、高い入力インピーダンスではなく、50Ω入力インピーダンスになっています。また、P7380SMA型プローブは、DCバイアス負荷

の問題をAC結合なしで緩和するため、調整可能な終端電圧が入力終端レジスタに接続されています。被測定回路への差動信号接続は、損失補正された遅延が一致しているケーブル・アセンブリを使用して行われています。このケーブル・アセンブリは、SMAコネクタ・グランド経由で被測定回路とのグランド接続しますが、同軸プローブではSMAコネクタ・グランド完全シールド同軸であるため、通常のシングルエンド・プローブのグランドで説明したグランド・ノイズの問題は発生しません。

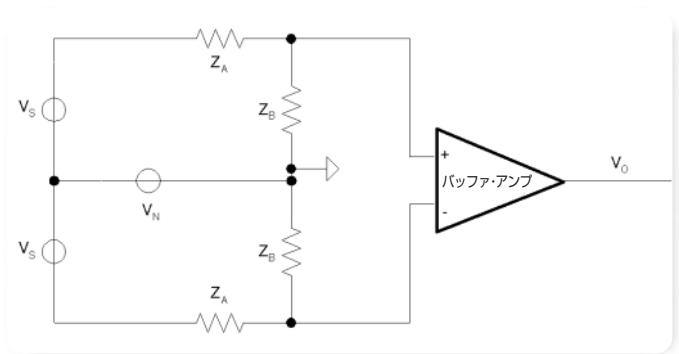
差動プローブは差動測定に最適なツールですが、他の測定でも利用されてきました。たとえば、2本のシングルエンド・プローブを使用して、高性能オシロスコープに搭載されている波形演算機能により差動測定を実行できます。ただし、この擬似差動測定は、差動プローブによる測定と比較すると、信号の忠実度に問題があります。これは、シングルエンド・プローブのグランド問題と、別々の2本のプローブと2つのオシロスコープ・チャンネル間で高周波を一致させることが困難であるためのCMRR低下の間方が原因となって発生します。測定された信号の遅延は、プローブやスコープ・チャンネルでは十分に一致しないため、擬似差動測定で正確に測定するには、オシロスコープのデスクューも必要になります。差動プローブでは、シングルエンド測定での実質的な欠点はありません。後述するように、差動プローブは、シングルエンド測定の場合にも非常に優れた測定ツールとなります。

差動プローブを使用したシングルエンド測定

▶ アプリケーション・ノート



▶ 図6. シングルエンド・アクティブ・プローブの簡易モデル



▶ 図7. 差動能動プローブの簡易モデル

差動プローブによるシングルエンド測定の性能

差動プローブの負極入力をグランド基準点として使用すると、差動プローブでシングルエンド測定を実行できます。差動プローブはシングルエンド・プローブとしても使用できますが、以下では、差動プローブをシングルエンド測定に使用した場合の性能を詳しく説明します。前述のシングルエンド・プローブと差動プローブのグランドの比較では、差動プローブを使用してシングルエンド測定を行うノイズ性能面の利点をいくつか説明しました。ここでは、差動プローブでのノイズ除去性能の利点に関する詳細な説明と、差動プローブを使用してシングルエンド測定を行う際の性能について考慮すべき点を説明します。

差動プローブによるシングルエンド測定の性能で最初に問題になるのは、プローブ応答がどの程度正確かという点です。優れた設計の差動プローブであれば、シングルエンド応答と差動応答の性能は一致します。優れた設計の差動プローブでは、良好な差動応答を保証するため、両極の入力のゲインと周波数応答が厳密に一致する必要があります。シングルエンド周波数応答の確認測定が大幅に簡単になるため、差動プローブ性能は多くの場合、両極の信号入力のシングルエンド測定を行うことで確認されます。プローブ入力が一一致する設計では、シングルエンド信号応答の確認により、正確な差動信号性能が保証されます。

差動プローブでシングルエンド測定を行うと、プローブ・グランドのセクションで説明したような、いくつかの利点があります。ここでは、差動プローブ入力構造によるグランド・ノイズ除去について説明します。シングルエンド・アクティブ・プローブの簡易モデルを図6に示します。このモデルは、ソース・インピーダンスの効果やプローブ入力の減衰抵抗などの要素を無視して、プローブと回路グランド間のノイズ電圧の効果だけを考慮しています。また、バッファ・アンプにユニティ電圧ゲインがあることを想定しています。

プローブと回路グランド間のノイズ電圧が、回路のソース電圧と直列になっているため、バッファ・アンプからの出力電圧は以下のようになります。

$$V_O = (V_S + V_N) \times [Z_B / (Z_A + Z_B)]$$

$$V_O = V_S \times [Z_B / (Z_A + Z_B)] + V_N \times [Z_B / (Z_A + Z_B)]$$

このプローブ・バッファ・アンプの出力電圧式の第2項は、グランド・ノイズ項を示します。この項は、この簡易モデルでは実効ゲインがソース電圧と同一になっています。プローブ・バッファ・アンプのグランドと測定対象回路のグランド間のノイズ電圧は、プローブによる測定対象の信号出力でピックアップされます。

比較用に、差動アクティブ・プローブの簡易モデルを図7に示します。この差動プローブ・モデルは、前述のシングルエンド・プローブ・モデルと同様に単純化していますが、平衡ソース駆動および平衡プローブ入力構造の両方が含まれています。ソースのコモン・モード電圧は、この簡易モデルではゼロボルトと見なしています。

プローブと回路グランド間のノイズ電圧は、両方のプローブ入力パスと直列になっているため、その効果は以下に示すように、プローブ入力構造の差動動作により、プローブ出力においてキャンセルされます。

$$V_P = (V_{DP} + V_N) \times [Z_{BP} / (Z_{AP} + Z_{BP})]$$

$$V_N = (V_{DN} + V_N) \times [Z_{BN} / (Z_{AN} + Z_{BN})]$$

その結果、コモン・モード電圧の差動バッファ・アンプからの差動モード出力電圧は次のようになります。

$$V_O = V_P - V_N = [(V_{DP} + V_N) - (V_{DN} + V_N)] \times [Z_B / (Z_A + Z_B)]$$

グランド・ノイズの項がキャンセルされ、次のように表されます。

$$V_O = (V_{DP} - V_{DN}) \times [Z_B / (Z_A + Z_B)]$$

この簡易モデルのグランド・ノイズの項は、理論上、一致しているプローブ入力アッテネータのCMRRが無限であるため、完全にキャンセルされます。現実のプローブ入力構造では、プローブ入力アッテネータは完全には一致せず、簡易モデルには示されていない寄生要素のため、一般的には周波数が高くなるにつれて悪化します。DCでの差動プローブ入力のアッテネータ間で0.1%のインピーダンス不一致があると、約60dBのCMRRになります。1GHzでは、プローブ入力アッテネータとプローブ・バッファ・アンプの両方の寄生効果により、優れた設計の差動プローブでは、CMRRは40dB程度まで減少します。これは、約1%の信号パスの不一致を示します。プローブ全帯域では、CMRRは20dB以下程度まで低下することが予測されます。

グランド・ノイズのキャンセルの程度は、差動プローブ構造によるCMRRによって異なるため、信号ソースのインピーダンスの不一致により、CMRRが悪化し、そのためにグランド・ノイズのキャンセルの程度も低下する場

合があります。これは特に、グランド接続のためにソース・インピーダンスが非対称であるシングルエンドの信号測定の場合に当てはまります。高速信号の場合は、伝送線の信号環境をサポートするため一般的にソース・インピーダンスが低く、DCでのソース・インピーダンスの不一致による影響がシングルエンド測定では小さくなります。シングルエンド信号測定で50Ωのソース・インピーダンスが不一致の場合、プローブ入力インピーダンスが50kΩのプローブのDCでのCMRRに対する影響はごくわずかです。ただし、信号周波数が高くなると、プローブ入力インピーダンスが減少し始め、最終的には、シングルエンド測定での50Ωのソース・インピーダンスの不一致による影響が非常に大きくなります。差動測定では相対的に高いCMRRによって大部分を除去できる高周波のAC同相過渡電圧は、シングルエンド測定では、CMRRの悪化により、その影響が顕著になる場合があります。

アクティブ・プローブのバッファ・アンプは、プローブ・チップで測定した信号を、プローブ・ケーブルからオシロスコープのチャンネル入力に転送することで、入力時の信号を正確に再現するように設計されています。正確な信号再現には、プローブのバッファ・アンプが線形で、パルス応答が制御されていることが必要です。良好なパルス応答は、ゲインが周波数帯域全体で比較的一定であり、帯域幅限界での減衰が穏やかで、プローブ・ケーブル損失などの寄生効果が補正できるようなプローブ設計により実現されます。ただし、プローブのバッファ・アンプでは、線形応答は限られた範囲でのみ実現されます。アクティブ・プローブのバッファ・アンプの線形動作範囲は、オシロスコープが提供するプローブ電源とアンプのアーキテクチャの両方によって制限されます。

アクティブ・プローブの入力電圧範囲では、通常は複数の電圧範囲を設定しています。最も広い範囲が、非破壊入力電圧、つまりプローブを物理的に損傷することなくプローブ・チップに入力できる絶対最大電圧です。非破壊入力電圧は、通常は温度による損傷または故障する電圧の限界です。また、許容電圧が適用可能な時間限界を含むことがあります。

差動プローブを使用したシングルエンド測定

▶ アプリケーション・ノート

常に発生するわけではありませんが、静電気放電インパルスなどの短期間の高電圧によっても、プローブ入力部が損傷を受けることがあります。入力部のコンポーネントが物理的に小さな高周波プローブの場合、特にこれが当てはまります。高性能アクティブ・プローブを使用する場合は、静電気防止用リスト・ストラップを着用し、オシロスコープのシャーシ・グランド端子に接続することをお勧めします。

プローブが動作可能な最大電圧範囲を、入力コモン電圧または最大動作電圧と呼びます。この範囲では、シングルエンド測定では電圧オフセットを使用し、差動測定ではプローブのCMRRによって、直線的なダイナミック・レンジでプローブを使用できます。アクティブ差動プローブは自動的にコモン・モード入力電圧を抑制するため、コモン・モード電圧限界は、シングルエンド電圧測定によって検証する必要があります。この電圧限界を超えて測定しようとする、非線形な応答となって歪みが生ずることになります。

アクティブ・プローブが直線的に動作する電圧範囲を、プローブの「ダイナミック・レンジ」と呼んでいます。高速なリニア（直線的）応答が必要であるため、アクティブ・プローブのダイナミック・レンジは通常はプローブの電源範囲の一部であり、プローブの構造設計とプローブ入力アッテネータの減衰率によって影響を受けます。プローブの入力アッテネータは、一般的に、プローブ・アンプ単体のダイナミック・レンジを拡大するために使用されます。一部のプローブでは、減衰率を切り替えられるものもあり、プローブのダイナミック・レンジとノイズ・フロアの優先度に応じて使い分けることができます。

信号の立上り時間および帯域幅の条件を満たしながら、プローブ・アンプの消費電力を抑えるため、高性能プローブ・アンプのリニア動作範囲は設計によって制限され

ています。内部プローブ・アンプの回路ノード電圧は、非常に高速なレートで充電と放電を繰り返す必要があるため、電圧振幅を制限することで高周波性能が向上しますが、リニア動作範囲は狭くなります。同様に、内部プローブ・アンプの回路ノードの充放電電流を制限することで消費電力を抑えることができますが、プローブの周波数応答も低下します。全体のプローブ性能要件を満たすためには、数多くの設計トレードオフが、最終的なプローブのダイナミック・レンジは、すべてのアプリケーションを満足するものにはなっていません。高性能プローブは、通常は汎用用途ではなく、高性能用途向けに設計されています。

大きなDC電圧成分があるシングルエンド測定では、プローブの電圧オフセット機能により、プローブのダイナミック・レンジを拡大できます。多くの高速シリアル・データ信号には、単一電源での動作を可能にするためDCバイアスがかかりますが、一般的には、高速スイッチング機能のため、デジタル信号振幅が小さくなっています。たとえば、コンピュータとビデオ・ディスプレイ間の高速入出力用に使用されるDVI/HDMI差動信号は、コンプリメンタリCMLロジック・ドライバを使用して、50Ω伝送線をドライブしています。CMLロジック・ドライバは、50Ω抵抗でCMLレシーバのVcc電源で終端されています。Vccが+3.3Vの場合は、通常のシングルエンドCML信号の振幅は+3.3~+2.7Vの範囲になります。DCバランス信号の場合は、+3.0Vコモン・モード電圧と600mVppのスイッチング信号となります。P7380型差動プローブなどの5:1、25:1の減衰率が切り替えられるプローブでは、いずれの減衰率設定でも600mVppの測定にはダイナミック・レンジは十分ですが、一般的には、ノイズ・フロアが低い5:1の設定の方が適しています。いずれの減衰率設定でも、シングルエンド測定を実行する場合はオフセット電圧機能により+3.0VのDCバイアスを無効にし、デジタル信号の振幅をプローブのダイナミック・レンジに移動する必要があります。

差動プローブを使用して差動信号の非対称性を測定する

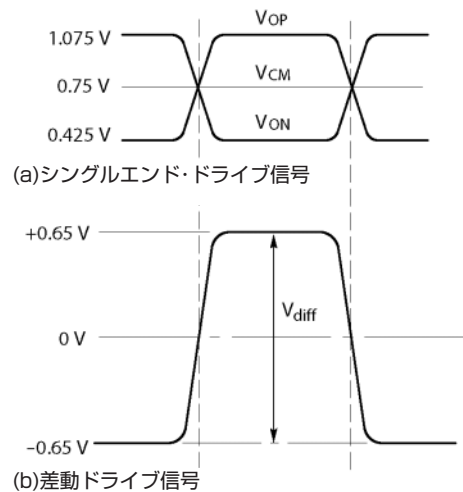
差動信号は、2つのグランド基準のコンプリメンタリ信号で構成されます。2つのコンプリメンタリ信号は、理論的には一致しますが、極性反転します。単一の電源電圧で差動信号を生成するため、差動信号ペアは一般的にコモン・モード・バイアスが使用されます。このバイアス電圧により、コンプリメンタリ信号の振幅レベルは、差動レシーバの動作電圧範囲内でシフトします。差動レシーバまたは測定プローブは、高いDC CMRRにより、この伝送コモン・モード・バイアスを効率的に除去します。コモン・モード・バイアスのある伝送差動信号ペアと、その結果差動レシーバまたはプローブで見られる異相信号の例を図8に示します（差動信号の詳細については、当社ウェブ・サイトから、アプリケーション・ノート「高速差動データ信号伝送と測定（55Z-16761-0）」をご参照ください。

差動信号の完全な評価には、以下の3ヶ所プローブ測定が必要です。

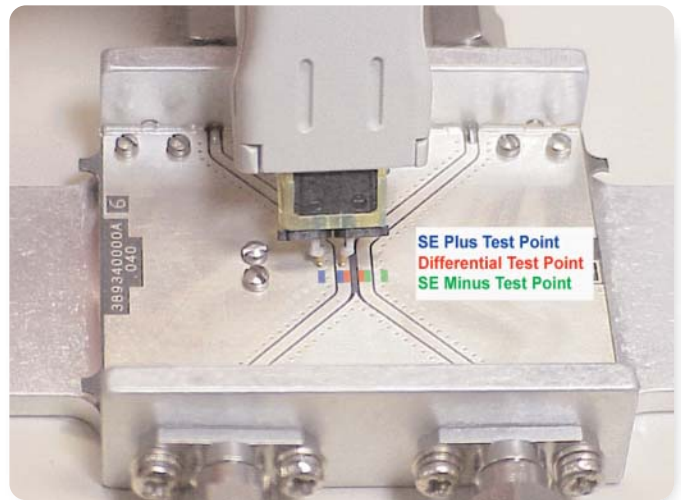
- 2つのコンプリメンタリ信号間の差動測定(DIFF)
- 正極性信号とグランド間のシングルエンド測定(SE+)
- 負極性信号とグランド間のシングルエンド測定(SE-)

3種類の測定は、以下で述べるように順次別々に測定されます。振幅とタイミングの関係がわかるように共通のトリガによって表示された測定波形は、オシロスコープに保存されます。

以下の例で使用している、差動プローブ用テスト・フィクスチャのプローブ・ピン配置を図9に示します。テスト・フィクスチャには、差動コプレナ伝送路があります。3つの異なるチップ・クリップをはんだ付けすることで、上記3項目の測定ができますが、特に高速信号では、接続されていないチップ・クリップの負荷効果が信号測定に若干影響します。間隔可変のチップ・クリップを使用し、チップ・クリップ・ピンを3つの測定ポイントで順番に移動しながらプロービングすることで、最高の測定忠実度が得られます。



▶ 図8. コンプリメンタリ・シングルエンド信号により差動信号を形成する



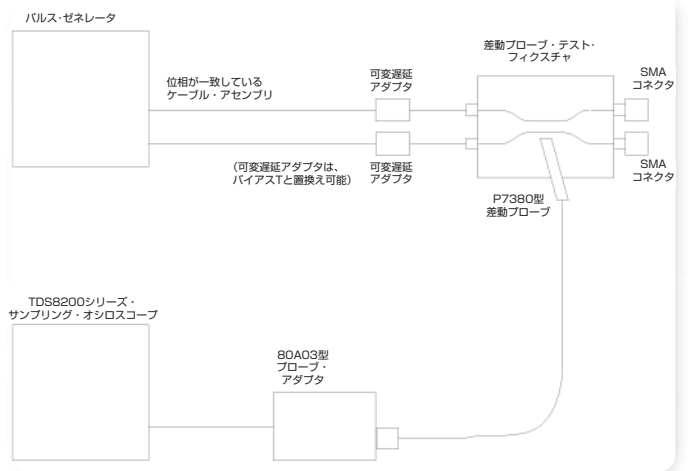
▶ 図9. テスト・フィクスチャのDIFF、SE+、SE-のプロービング・ポイント

差動プローブを使用したシングルエンド測定

▶ アプリケーション・ノート

差動信号をシングルエンド測定する主な理由は、差動信号の品質問題の原因となる信号仕様違反や信号の非対称性を特定することです。高速シリアル・データの信号品質を特定する一般的なツールが、アイ・パターン表示です。アイ・パターン表示は、一つのクロック周期内における信号遷移を累積表示したものです。アイ・パターン表示により、許容信号テンプレート（アイ・パターン・マスクと呼ぶことがあります）に対する振幅とタイミングの両方の問題を調べることができます。差動測定のアイ・パターンで振幅とタイミングのいずれかに問題が示された場合、シングルエンド測定を行うことにより、問題の原因が特定の極にあるのか、両方の極に共通の問題なのかを特定することができます。アイ・パターン表示は、信号ソースによって提供されるクロック・トリガを使用した、後述のような例で利用されます。

シリアル・データ信号の仕様違反は、通常はシングルエンド測定で特定できますが、仮定の上では一致する差動信号ペアの非対称性は、特定が困難になることがあります。差動信号を構成する信号ペアの非対称性は、一部の差動信号エネルギーをコモン・モードのエネルギーに効果的に変換できます。同様に、通常は差動信号の一部とは見なされない一部のコモン・モードのエネルギーを差動モード・ノイズに変換できます。これらの混合変換要素と、結果としての差動信号に与える影響については、数値化が簡単ではありません。これは特に、信号のコモン・モード成分は、レシーバのCMRRによって除去されるためです（周波数によって大きく異なります）。差動プローブ応答は、高品質の差動レシーバをモデル化するように設計されていますが、回路内のレシーバの入力を正確に表し



▶ 図10. 非対称性の一般的な機器構成例

てはしません。一般的に、差動ペアによるシングルエンド測定の場合、このような非対称性の問題を最小限に抑えるため、可能な限り対称的になるように設計することが重要です。

以下では、差動信号ペアの非対称性の例を紹介し、差動信号応答に対するさまざまな非対称性の影響を説明します。ここで紹介する非対称性の例は、優れた設計のシリアル・データ・レイアウトや通信チャンネルで想定されるものに比べ極端な例ですが、差動信号問題の解決でシングルエンド測定がどの程度重要であるかを理解するのに役立ちます。また、差動プローブが差動およびシングルエンド測定の優れたツールであることもわかります。

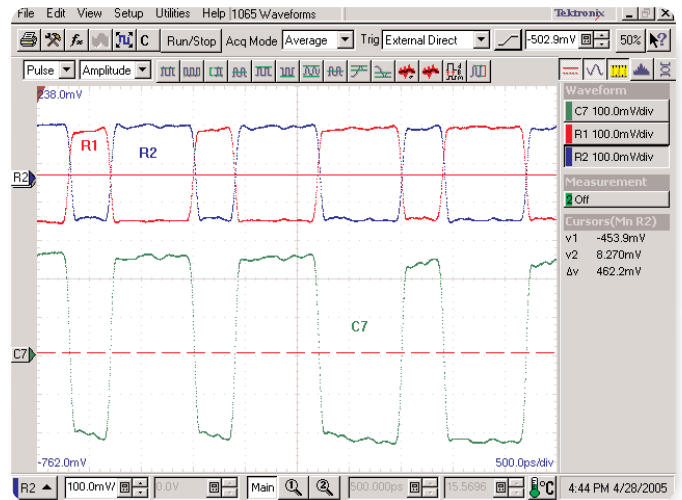
非対称信号の測定では、以下の信号ソースおよび共通の測定ツールが含まれています。

- アドバンテスト D3186 パルス・パターン・ゼネレータ (振幅、タイミング調整機能付きの差動信号ゼネレータ)
- SMA可変遅延アダプタ、1組 (テクトロニクス部品番号015-0708-00)
- バイアスT、1組 (PSPL部品番号5545-107)
- 低損失、位相一致ケーブル・アセンブリ (テクトロニクス部品番号174-4944-00)
- 差動プローブ・テスト・フィクスチャ
- P7380型 8GHz差動アクティブ・プローブとバリアブル・スペーシング・チップ・クリップ (P7380HHA型ハンドヘルド・アダプタ)
- TDS8200型 サンプリング・オシロスコープ、80A03型 TekConnect プローブ・アダプタおよび80E02型 12GHzサンプリング・モジュール

一般的な機器構成を図10に示します。以下の非対称性の例では、著しい非対称性はないものとしています。図11に測定例を示しますが、特定の非対称性は混入していません。

- 波形R1 (赤色) は、負極性のシングルエンド信号です (SE-)
- 波形R2 (青色) は、正極性のシングルエンド信号です (SE+)
- 波形C7 (緑色) は、差動信号です (DIFF)

図11の波形は、2つのシングルエンド信号のコンプリメンタリであり、振幅と時間の両方でよく一致していることがわかります。図11に示される差動波形からは、歪みが非常に少なく、想定通りシングルエンド信号のピーク値の2倍に近い振幅であることがわかります。



▶ 図11. 非対称性が混入していない波形のオシロスコープ画面

差動ペアを構成する信号間で、振幅とタイミングの両方に非対称性があると、差動信号の品質に影響を及ぼすことがあります。差動信号ペアに存在する非対称性には、以下のようなものがあります。

振幅：

- ピーク・ピーク電圧
- コモン・モード電圧バイアス
- 反射
- クロストーク
- ノイズ

タイミング：

- 立上り時間
- スキュー
- ジッタ

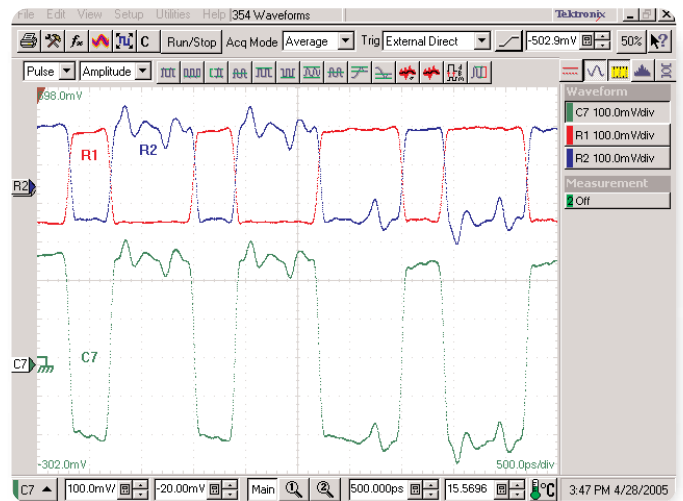
差動プローブを使用したシングルエンド測定

▶ アプリケーション・ノート

図12の最初の例では、一方の信号パスに反射があり、もう一方の信号パスには反射がない場合に生ずる差動ペア信号間の非対称性が表示されています。信号反射による非対称性は、一般に、差動信号ペアのルーティングのレイアウトの違いが原因です。差動信号トレースのルーティング・パスと終端を一致させるように注意しても、特に高密度のICピン配置やコネクタ・インタフェースでは、違いが生じることは珍しくありません。信号リターン電流パスの違いも、ビアが集中している領域のグラウンド・プレーンの非連続性などによる反射問題の原因となることがあります。次の例では、プローブ・テスト・フィクチャの一端を終端し、もう一方をSMA Tアダプタで終端することで、反射の非対称性をシミュレートしています。SMA Tにより、未終端のスタブの非連続性が生じ、立上り時間が50psの顕著な反射が生じます。

図12で示す、反射による非対称性の例では、R2(SE+)波形に顕著な反射があり、R1(SE-)波形にはほとんど反射がないことがわかります。この2つのシングルエンド波形の違いにより、C7(DIFF)波形に反射が現れます。差動測定だけを実行した場合、問題があることは分かりますが、2つのシングルエンド信号のどちらに反射の問題があるのか、あるいは両方が問題の原因となっているのかは特定できません。シングルエンド測定を行うことで、反射の問題の原因を特定しやすくなります。

差動プローブを使用して反射の問題を確認した後に、シングルエンド・プローブでシングルエンド信号の応答を測定することはできますが、同じ差動プローブを使用して、シングルエンド測定を行う方が便利であり、また正確に測定できます。



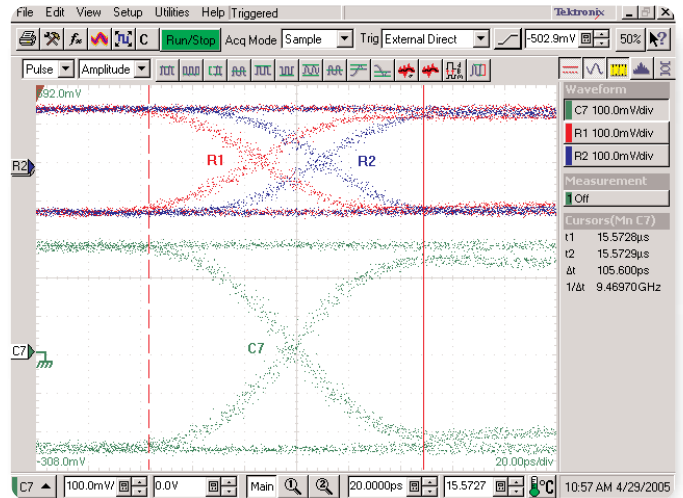
▶ 図12. 反射による非対称性がある波形のオシロスコープ画面

差動プローブでシングルエンド信号の応答を測定することで、前述のシングルエンド・プローブのグラウンド問題が回避できます。同一のプローブを使用して差動とシングルエンド両方の信号応答を測定すると、2つの異なるプローブを使用して測定を行った場合には回避できない、プローブ負荷とプローブ周波数応答の違いも回避できます。

差動測定とシングルエンド測定間のソース・インピーダンスの違いが原因で、プローブ応答に若干の違いは生じますが、シングルエンド・プローブを使用して両方の測定を行うことで、全体的な違いは最小限になります。差動信号をシングルエンド測定する場合の最も困難な問題は、目的の信号近くで良いグラウンド基準点を特定することです。重要な差動信号の測定ポイント近くには、グラウンド・ビアを設けることが重要です。測定対象の信号とグラウンド接続点が遠い場合、シングルエンド測定の結果が大幅に悪化することがあります。

2番目の差動信号ペア間の非対称性の例では、信号パスのスキューの影響を示しています。信号スキューは、差動トランスミッタやレシーバ間の差動ペア接続パスにおいて、信号トレースのルーティングの長さが一致しないことが原因となります。また、差動ペアのトレースが共通の伝送媒体で一緒にルーティングされていない場合にも、スキューが発生します。例としては、外部回路基板レイヤ上のトレースをマイクロストリップとし、内層上のトレースをストリップ・ラインとしたルーティング例などがあります。信号伝搬速度は伝送媒体によって異なるため、トレースの長さが一致していても、伝搬遅延まで一致するとは限りません。この伝搬遅延の非対称性の例では、アジャスタブルSMA遅延アダプタによって、意図的にスキューが作り出されています。可変遅延アダプタは、スライド同軸接続により、SMAコネクタ間の信号遅延を機械的に調整することができます。図13で示すように、シングルエンドのR1信号とR2信号の間の遅延差は約20psです。20psはそれほど大きなスキューではないように見えますが、60psの信号立上り時間の1/3であり、結果の差動信号遅延に影響を及ぼします。

図13に示す波形は、2.5Gbpsの信号のアイ・パターンを、信号遷移を中心として、時間を拡大して表したものです。アイ・パターンは、安定した同期データ・レート・クロックによりトリガされた連続するデータ・パターン（この例ではPRBS-7信号パターン）からの信号遷移の蓄積された結果です。



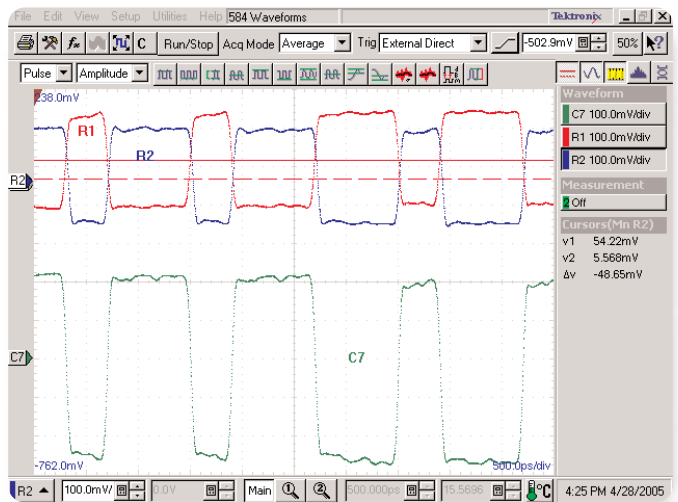
▶ 図13. スキューの非対称性がある波形のオシロスコープ画面

図13に示すアイ・パターン表示から、信号にジッタがあることがわかります。この信号遷移におけるアイ・パターン表示は、信号の立上り時間と立下り時間を明確に示しています。この例では非常に似ているように見えます。図13では、差動信号の立上りは、差動ペアの不一致を示す応答の低下の兆候がなく、良く制御されているように見えますが、シングルエンド測定ではタイミングの不一致が明確に示されています。スキューがシングルエンド測定の立上り時間を超えるような極端な場合にだけ、差動応答の立上り時間が応答の立上り時間途中のペDESTラルのように明らかに異常な動作を示します。

差動プローブを使用したシングルエンド測定

▶ アプリケーション・ノート

また、図13を詳しく調べると、2つのシングルエンド信号間のスキューにより、差動信号の立上り時間が増加していることもわかります。R1とR2の2つのシングルエンド信号間のスキューが原因で、差動信号応答での信号遷移が、スキューなしの場合よりも長くなっています。図13のR1波形(SE-)の信号遷移は、R2波形(SE+)に比べて約20ps前に開始しているため、その結果のC7波形(DIFF)の応答の信号遷移は、R1遷移の開始時に開始しています。ただし、この最初の差動応答遷移は、スキューなしの場合の半分の遷移レート（R1とR2の両方の波形がコンプリメンタリに一緒に遷移します）で発生します。R1遷移の最初から20psのスキュー期間後に、R1とR2の両方の波形が逆の極性で一緒に遷移します。これにより、差動信号応答の遷移レートがスキューなしの想定レートよりも増加します。最後に、R1信号の遷移時間の最後に、R2信号の遷移が20psのスキュー時間の間続きます。これも差動応答の期間を延長しますが、この場合も通常の半分の遷移レートになります。図13では、差動応答遷移の中央が、2つのシングルエンド信号間のスキュー期間の中央に一致しています。このため、2つのシングルエンド信号間のスキューにより、差動応答遷移期間が長くなります。2つのシングルエンド信号の立上り時間は信号間のスキューによって遅延しませんが、スキューにより差動信号の立上り時間は遅延します。このスキューの非対称性の例では、シングルエンド信号間の20psのスキューにより、差動信号の立上り時間が約10ps増加します。



▶ 図14. バイアス電圧の非対称性がある波形のオシロスコープ画面

最後の非対称性の例は、差動ペアのシングルエンド信号間の共通モード・バイアスの違いによる影響を示しています。これは一般的な問題ではありませんが、シングルエンド信号の電圧レベル差が差動応答に影響することがわかります。図14の例では、2つのシングルエンド信号間にやや極端なバイアス電圧差がありますが、影響を明確にするため意図的に大きくしています。現実的には、電圧バイアスまたは振幅の非対称性は、多くの場合はドライバまたは終端の不一致の結果です。このシミュレーション例では、シングルエンド信号のバイアス・レベルは、SMAバイアスTアダプタのペアとDC電源を使用して人工的に制御しています。

図14の波形例では、R1(SE-)とR2(SE+)の波形の異なるコモン・モード電圧が、実線と破線の水平カーソルと共に表示されています。R1とR2の振幅は250mVppで同一であるため、信号間の50mVのバイアス電圧差は20%の非対称性を示します。画面では、これが明確に現れています。C7(DIFF)波形のDCバイアス電圧の非対称性の影響により、差動信号応答でDCレベルがシフトします。レベルがシフトした信号で駆動される差動レシーバにおいて、決定点がゼロボルトに設定されている場合は、その結果のレシーバ出力のデューティ・サイクルで大幅なシフトが現れます。これは、アイ・パターン表示ではジッタの増加として現れます。

結論

従来、シングルエンド・プローブはシングルエンド測定だけに、差動プローブは差動測定だけに使用されてきました。高性能差動プローブの普及に伴い、このような従来のパラダイムが変化しつつあります。差動プローブをシングルエンド測定に使用することには、特に高速信号測定で多くの利点があります。差動信号の品質を完全に評価するには、差動信号ペアの差動測定とシングルエンド測定の両方が必要であるため、両方の測定を実行するには差動プローブの使用が適しています。

参考：

Ott, Henry W., Noise Reduction Techniques in Electronic Systems, 2nd ed, Wiley, 1988

TekConnect®

優れた信号忠実性と柔軟性をご提供します。



TekConnectインタフェースは、高電圧、大電流、大電力、あるいはマイクロボルト・レベルの信号など、測定対象を問わず、新しいレベルのプローブ・インテリジェンスを提供します。TekConnectインタフェースでは、オシロスコープ入力で最大18GHzの有効周波数帯域による優れた信号忠実性を保証し、同時に優れた柔軟性も実現します。TekConnectインタフェースを使用することで、最大限のシグナル・インテグリティを確保し、現在および将来の周波数帯域要求にも対応できます。

Z-Active™ 差動プローブ・ファミリ -P7313型、P7380型

革新的なプローブ・アーキテクチャにより高速アプリケーションをサポートします。



テクトロニクスは、信号忠実性の業界標準となる革新的なプローブ・アーキテクチャ、Z-Activeを開発しました。テクトロニクスのアクティブ・プローブ・アーキテクチャは、高帯域を維持しながら、接続性の向上と低負荷を実現します。Z-Activeアーキテクチャは、アクティブ・プローブ・アンプへの電源供給を行う分散アッテネータ・トポロジで構成されたハイブリッド手法です。

CSA/TDS8200型



CSA8200型 コミュニケーション・シグナル・アナライザ、TDS8200型 デジタル・サンプリング・オシロスコープは、テクトロニクスの超高性能サンプリング・オシロスコープ・シリーズです。業界最高レベルの水平タイムベースの安定性、信号感度、ノイズ性能により、最高精度の信号アキュイジションを保証します。CSA/TDS8200型は、最大70GHz以上の帯域、40Gbps以上の光および電気信号を解析できます。広範な内蔵測定ライブラリにより、高速なコンポーネント、トランシーバ、伝送システムの評価およびコンプライアンス・テストに最適なツールとなっています。

Tektronix お問い合わせ先

東南アジア諸国/オーストラリア/パキスタン (65) 6356 3900
オーストリア +41 52 675 3777
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
ベルギー 07 81 60166
ブラジルおよび南米 55 (11) 3741-8360
カナダ 1 (800) 661-5625
中東ヨーロッパ/ウクライナおよびバルト海諸国 +41 52 675 3777
中央ヨーロッパおよびギリシャ +41 52 675 3777
デンマーク +45 80 88 1401
フィンランド +41 52 675 3777
フランスおよび北アフリカ +33 (0) 1 69 86 81 81
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
ルクセンブルグ +44 (0) 1344 392400
メキシコ、中米およびカリブ海諸国 52 (55) 56666-333
中東アジア/北アフリカ +41 52 675 3777
オランダ 090 02 021797
ノルウェー 800 16098
中華人民共和国 86 (10) 6235 1230
ポーランド +41 52 675 3777
ポルトガル 80 08 12370
大韓民国 82 (2) 528-5299
ロシアおよびCIS 諸国 7 095 775 1064
南アフリカ +27 11 254 8360
スペイン (+34) 901 988 054
スウェーデン 020 08 80371
スイス +41 52 675 3777
台湾 886 (2) 2722-9622
イギリスおよびアイルランド +44 (0) 1344 392400
アメリカ 1 (800) 426-2200
その他の地域からのお問い合わせ 1 (503) 627-7111
2005年6月15日更新

詳細情報

Tektronix は、総合的に継続してアプリケーション・ノート、テクニカル・ブリーフおよびその他のリソースのコレクションを保守整備し、技術者が最先端で仕事ができるように手助けをします。

www.tektronix.comまたはwww.tektronix.co.jpを参照してください。



Copyright © 2005, Tektronix, Inc. 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 および TEK は Tektronix, Inc. の登録商標です。参照されているその他のすべての商品名は、該当する各会社が保有するサービス・マーク、商標、または登録商標です。

6/05 FLG/WOW

60Z-18344-0

Tektronix

Enabling Innovation