



プローブの鉄則 【応用編】

標準プローブで対応出来ないケースに ～プローブの使い分けとノウハウ～

受動プローブでは計測できない場合のプローブの使い分けと、そのノウハウをご紹介します。
代表的な以下の例の他にも、多数例示してそのプローブ方法を解説します。

- 高電圧を測る
- グランドから浮いた電圧を、どう測る？
- シャント抵抗には注意が必要
- 高速シリアル・バスの波形品質の問題

■ プローブを使い分ける

標準プローブは、10:1の減衰比、入力インピーダンス $10\text{M}\Omega / 10\text{pF}$ 程度、耐圧 400V 前後と、比較的多数のアプリケーションに対応できます。しかし、より幅広いアプリケーションに対応するためにさまざまな種類のプローブが用意されています。

この入門書「プローブの鉄則」では、プローブの原理やよくある失敗例を元に、失敗しないプローブのノウハウを解説します。

■ 高電圧を測る

標準プローブの耐圧は 400V 程度ですから、それを超える電圧を測定する場合、100:1、または 1000:1 などの減衰比をもった高電圧プローブを使用します。高電圧回路は一般に内部インピーダンスが非常に高い場合が多く、そのためにプローブの入力インピーダンスの値を考慮する必要があります。直流的には入力抵抗に考慮します。高電圧プローブの入力容量は標準プローブより低くなるように設計されていますが、それでも交流的には入力容量が問題になる場合があります。場合によっては、プローブの位置によって波形が大きく変化することもあります。

また、電圧プローブの最大許容電圧は周波数が上がるにつれて減少します。高周波の高電圧測定の場合は、定格を確認する必要があります。



テクトロニクス P5100 型



P6015A 型

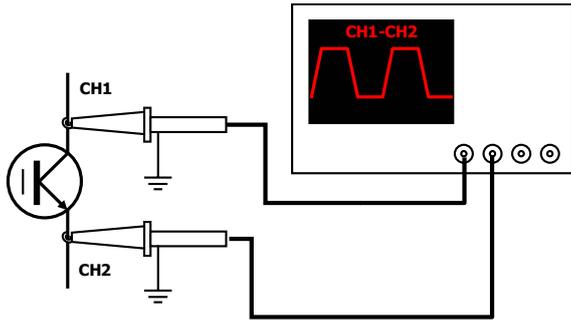
型名	最大入力電圧	減衰比	周波数帯域	入力インピーダンス
P5100 型	2.5kV	100:1	DC~250MHz	$10\text{M}\Omega / 2.75\text{pF}$
P6015A 型	20kV	1000:1	DC~75MHz	$100\text{M}\Omega / 3\text{pF}$

代表的な高電圧プローブと主要性能

■ グランドから浮いた電圧をどう測る？

電圧測定は、必ずしもグランドからの電位の測定だけではありません。グランドから浮いている 2 点間の電位差測定を行うことは珍しいことではありません。このような電圧測定を簡単に行うには、2 本のプローブを組み合わせた擬似差動測定があります。オシロスコプの波形演算機能を使って、2 点間の電位の差を求める方法です。対地電位がプローブの許容入力範囲であれば標準プローブでも行える手軽な差動電圧測定ですが、以下の点に注意すべきです。

- 被測定波形に多くの直流電圧がのっている場合、交流成分を取込むだけの十分な電圧分解能がとれない
- 2 本のプローブの減衰比、周波数特性が完全に一致しない
- 2 つのチャンネルが必要になる



2本のプローブによる擬似差動計測

アクティブ差動プローブは、波形歪み、確度、また安全性の点からお勧めできます。特に、インバータ回路の様に比較的電圧の高い回路の場合には、安全上の点からも高電圧差動プローブの使用は必須です。



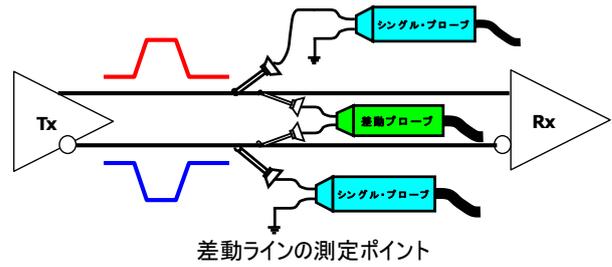
代表的な高電圧差動プローブ(P5205型)

■ 差動ラインを測る

最近では、CANバスに代表されるように差動の伝送ラインが増えています。差動ラインでは、差動電圧、それぞれのラインの電圧を測定します。差動電圧の測定には、差動プローブの使用をお勧めします。

差動プローブにもさまざまな仕様がありますが、入力容量が低いだけでなく、許容入力電圧の高い製品を選ぶことが大切です。差動プローブは、先端に差動アンプを内蔵したアクティブ・プローブですが、一般に高速信号用の差動プローブの許容入力電圧は高くありません。

そのため、予期せぬノイズの重畳、また耐ノイズ性試験のためにノイズを重畳すると、プローブを破損することがあります。

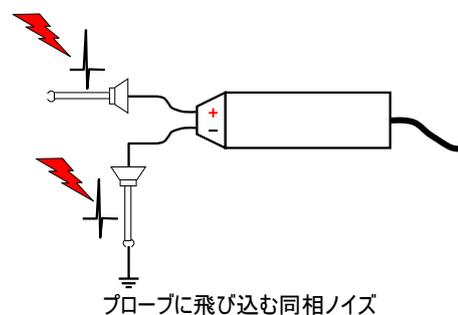


代表的な差動プローブ
TDP1000型/TDP0500型

■ ノイズに強い差動プローブ

差動プローブの本来の目的は、電位の異なる2点間の電圧測定です。プラスとマイナスの入力端子があり、(プラス端子)-(マイナス端子)の電圧が表示されます。

差動ラインはノイズに強いと言われますが、これは受信デバイスが引き算を行っているため、バスに飛び込んだ同相のノイズがキャンセルされるためです。同様に、プローブの入力ワイヤに飛び込んだノイズも、同相ノイズはキャンセルされます。これは差動プローブの大きなメリットであり、仮にマイナス入力をグランドに接続し、シングルエンドの信号を取り込んだ場合でも、同相ノイズ成分はキャンセルされることになります。



オシロスコープに表示されたノイズが、伝送ラインに含まれているものなのか、プローブへの誘導ノイズなのか、判別しにくい場合がありますが、差動プローブでシングルエンド測定を行えば、プローブに飛び込んできた同相ノイズは除去されるため、本来のノイズだけを取り込むことができます。

■ 高性能！でも取り扱いに注意が必要なアクティブ・プローブ

理想的な電圧プローブは被測定回路に影響を与えず、波形をそのまま取り込めるものです。

- 入力抵抗: 無限大
- 入力容量: ゼロ
- 周波数帯域: 無限大

しかし、現実の受動プローブは理想とは言えません。より高性能なプローブとして、プローブ先端にアンプを内蔵したアクティブ・プローブがあります。

高周波回路では入力容量をできるだけ少なくすることが求められますが、アクティブ・プローブでは 1pF 前後の性能が実現されています。また、周波数帯域も最高 16GHz というものまで製品化されていますので、理想に一步近づいたプローブと言えますが、使いこなすには注意が必要です。それは、過入力で破壊されることがあるということです。特に静電気には要注意で、被測定回路、オシロスコープ、そして測定者もリストバンドでアースを取ることが必要です。測定環境も、ベンチや床に導電マットを敷き、アースをとることをお勧めします。

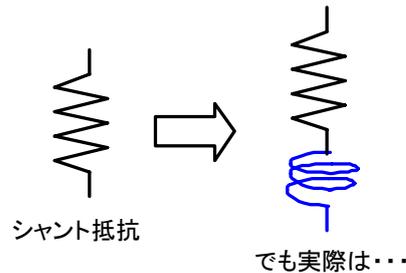
また、アンプを内蔵しているために、歪みなしに動作できる許容入力が決まっていますので注意が必要です。

電流波形をより正確に測定するには

■ シャント抵抗には注意が必要

カー・エレクトロニクスの分野では、電流波形を測定する場合があります。最も手軽な方法は回路に直列に抵抗(シャント抵抗)を挿入し、この抵抗における電圧降下を電圧プローブで測定する方法です。しかし、次の理由で大きな制限があります。

- 測定するデバイスのオン抵抗に比べて十分に小さな抵抗値のシャント抵抗でないと、回路の動作に影響を与える
- シャント抵抗が潜在的に持つインダクタンスにより、高域の周波数特性が良くない



インダクタンスと抵抗からなる時定数は L/R ですから、インダクタンスに比例し、抵抗に反比例します。つまり、回路に与える影響を小さくしようと抵抗を小さくすると時定数が増加し、周波数帯域が低下します。特に、スイッチング回路の電流測定ではスイッチング・デバイス自体の内部抵抗が極めて低いため、インダクタンス成分の影響を十分に考慮すべきです。シャント抵抗は内部インピーダンスが比較的高く、スイッチング周波数が低く、エッジ・スピードも遅い場合に限った方がよいでしょう。

■ クランプ式電流プローブ

クランプ式電流プローブには、AC 電流のみに対応した AC 電流プローブと、ホール素子を使用して DC から測れる DC/AC 電流プローブがあります。一般には、オシロスコープとクランプ式の DC/AC 電流プローブを組み合わせで電流波形を測定します。

電流プローブは、被測定点を切断することなく、電流プローブのセンサ部分を、測りたい電流の流れているケーブルにクランプするだけで電流波形を測定できる便利なプローブですが、使用法を誤ると大きな誤差を生じる恐れがあります。



電流プローブの例
TCPA300/400 電流プローブ・システムと A622 型、A621 型

電流プローブの選択には、周波数帯域と最大電流だけに着目しがちですが、実は次のような制限があり、注意が必要です。

■ 電流プローブの許容入力について

電流プローブは、先端に開閉できるようにスプリットされたコアを持っています。このコア・サイズにより、測定できる電流の大きさには制限があります。この制限を無視すると波形に歪みを生じることになりますので、注意が必要です。

測定限界は、電流波形によって大きく変わります。マニュアルのスペック表を見ると、たとえばある電流プローブは

- 最大直流電流: 30A
- 最大交流電流: 21A(周波数による)
- 最大パルス電流: 50A
- 最大電流時間積: $500A \cdot \mu s$

と記載されています。

■ 最大直流電流

いつでも流しうる直流電流です。ただし使用可能時間に制限があるプローブもあります。

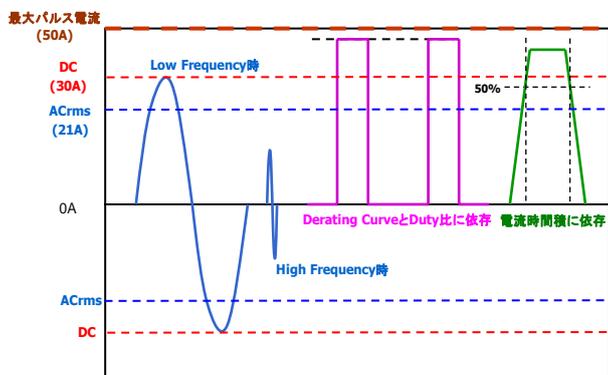
■ 最大交流電流(正弦波)

正弦波では、実効値は最大値の約 70%ですから、21A は理論通りです。しかし、周波数が高くなるとこの値は低下しますので性能表を確認する必要があります。

■ 最大パルス電流

いかなる場合でも超えてはならない最大電流です。繰返しのパルス電流の場合、パルスの基本周波数とデューティ比により決まります。その周波数での最大電流値をデューティ比のルート値で割ったものが最大電流値となります。

単発電流パルスの場合には最大電流時間積に制限されます。



電流プローブの許容入力

■ 電流プローブのクランプには要注意

電流プローブは、できる限り回路の配線をそのままクランプします。クランプするためのリード線の追加は、回路のインダクタンス成分が増えるため、測定結果に影響を与えます。

■ 電流プローブの調整

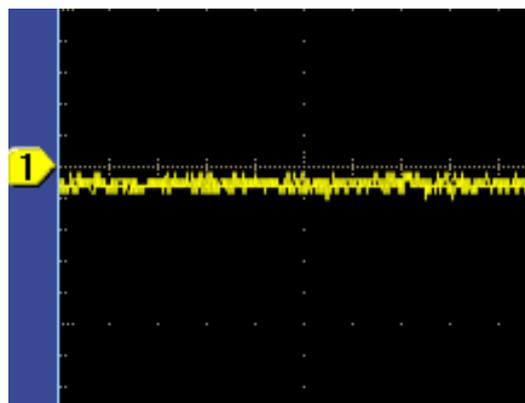
電流プローブは使用に伴い、ヘッドのコアが徐々に磁気を帯びます。そのため、適宜デ・ガウスを行います。あわせて電流ゼロにおいて、プローブ出力もゼロ電圧になるように DC バランスの調整を行う必要があります。

■ オシロスコープの校正

プローブを接続する前に、オシロスコープが正しく校正されているかどうか、も注意する必要があります。デジタル・オシロスコープといえども、入力信号が A/D 変換器に入力されるまでに減衰器や増幅器を経由します。そのため、温度変化や経時変化により校正ずれが生ずる恐れがあります。

デジタル・オシロスコープでは、グランド・レベル(ゼロ電位)が矢印等で画面左に表示されますが、オシロスコープはあくまでこのグランド・レベルがゼロ電位であるとして電圧の計算を行います。実際のゼロ電位との間にずれがあると、自動測定結果やカーソル測定結果に思わぬ誤差が含まれてしまいます。

このような場合には、「自己校正」機能で改善することができます。



DC オフセットがある場合

■ いろいろなプローブを組み合わせて使う場合

プローブにより伝播遅延時間は異なります。計測器メーカーから提供されているスキュー校正のためのアダプタを使用し、チャンネル間の遅延時間を調整する必要があります。写真の例は、電圧プローブと電流プローブのスキュー校正に用いられるものです。



スキュー校正用アダプタ

■ 高速シリアル・バスの波形品質の問題

カー・エレクトロニクスの世界に限らず、エレクトロニクスの世界では、デジタル・バスが従来のパラレル・バスからシリアル・バスへと移行しています。

比較的データ・レートの低いアプリケーションでは、例えば機器間のデータ伝送の場合、RC-232 などのシリアル通信が使われてきましたが、ボード間のデータ伝送などではデータ・レートが速いこともあり、デジタル・バスといえばビット幅分のバス幅、つまり「ビット幅＝デジタル・ライン数」であるパラレル・バスが一般的でした。

しかし、機器の性能向上に伴い、処理するデータの量が飛躍的に増え、バス幅が 32 ビット、64 ビットと広くなりました。そのため、ボードに占めるバスの物理的な幅(寸法)やボード間を接続するフラット・ケーブルの幅が、機器の小型化や冷却用の空調にまで影響を与えるようになりました。

例えば、DVD プレーヤーとデジタル・テレビのデジタル接続を考えてみましょう。

RGB 各色が 8 ビットであるとして、最低でも 8 ビット×3 色＋クロックの合計 25 チャンネル(ライン)の接続ケーブルが必要です。このような太いケーブルは実用的ではありません。このため、パラレル信号を時間的にずらして 1 チャンネル化するシリアル・バスが普及し始めています。

身近な例ですと、ハイビジョン・テレビに標準的に搭載されている HDMI が挙げられます。HDMI とは High Definition Multimedia Interface Bus の略で、映像信号をデジタル信号で伝送するイ

ンタフェースです。HDMI は RGB の 3 チャンネル＋クロックの合計 4 チャンネルでデータを伝送しますが、データ・レートは一般的な 1080i の HDTV 信号で 740Mbps、基本周波数でいうと半分の 370MHz にも達します。このような高速信号になってきた場合、信号経路におけるインピーダンスの管理をしっかりと行わないと、信号を伝送することができません。このため、HDMI のコンプライアンス・テストでは、レシーバ(テレビ等)の入ラインインピーダンスや接続ケーブルによる信号の劣化について規定しています。

カー・エレクトロニクスでは、動画、音声等を伝送する情報系バスとして、MOST や IDB1394 の普及が見込まれていますが、従来よりも遥かに高速のデータ伝送を行います。

このような高速バスが CAN、LIN 等の比較的低速なバスや他のケーブルと共にワイヤ・ハーネスの一部となるわけですが、実は多くの問題を抱えているといえます。

そのため、CAN バスや LIN バスの様に長いスタブがあってもネットワークへの悪影響はあまりありません。しかし、高速バスでは反射の影響は顕著に現れます。

■ そろそろ伝送線路という考え方が必要

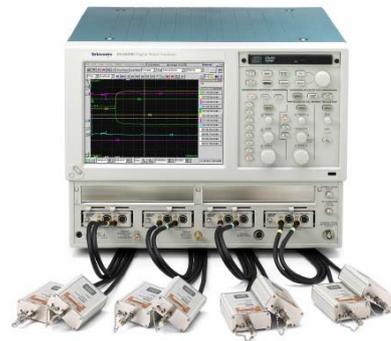
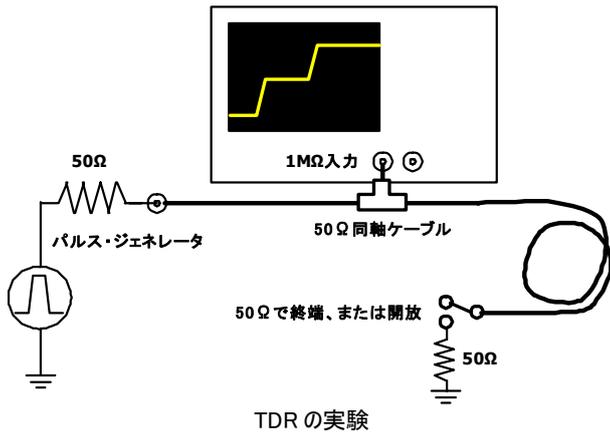
バスに関わる問題は、大きく分けて

- (1) 波形品質(シグナル・インテグリティ)
- (2) 漏れ込み(クロストーク)
- (3) ケーブルの損失

があります。

高速バスになるほど、波形品質の問題は顕著になります。低速バスでは、仮にインピーダンスにミスマッチによる反射があったとしても、バスの周波数帯域が低いため、反射の影響は波形の立上り部分のスロープに吸収されてしまい、ほとんど波形には影響がありません。

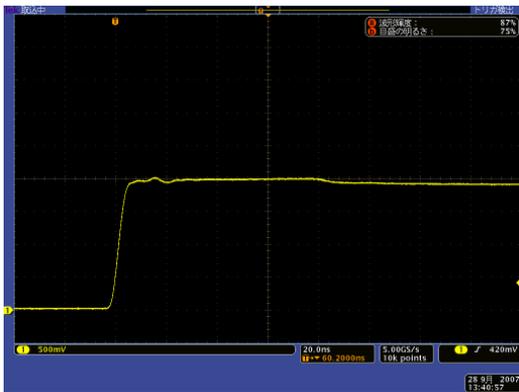
ここで簡単な実験をしてみます。



TDR 用計測器の例
DSA8200 型

上図において、パルス・ジェネレータからの信号は同軸ケーブルを伝わり、終端抵抗に向かいます。50Ωで終端されていればオシロスコープで観測される伝送路の波形は反射のない綺麗なパルスになります。

このようなインピーダンス不整合による反射は、HDMIのような高速伝送路での話でしょうか。



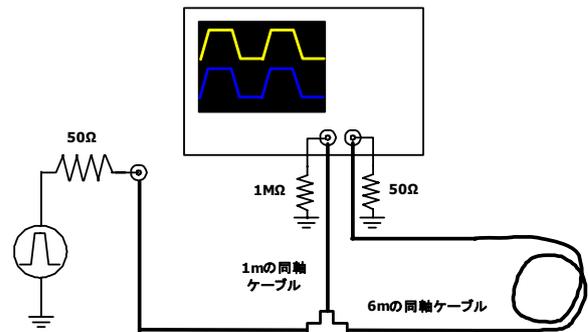
50Ωで終端した場合

自動車用バスとして使われている CAN バスは最高伝送レートが 1Mbps であるため、インピーダンスの管理はまだあまり厳しく行うことはなく、バスに長いスタブを通して多くの ECU が接続されています。

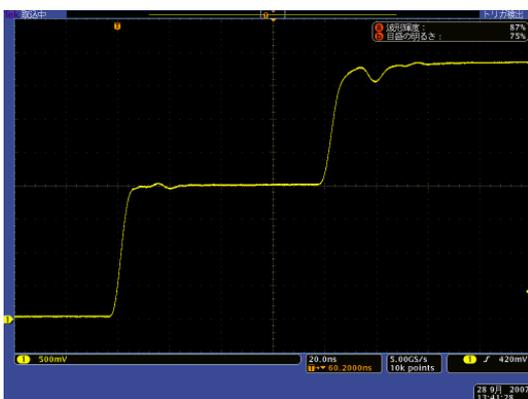
次のような実験をしました。

下図のように、6m の同軸ケーブルをバスに、1m の同軸ケーブルを ECU へのスタブと見立てました。

しかし、同軸ケーブルの終端が適切でない場合、パルスは反射し、入力波に重畳されます。



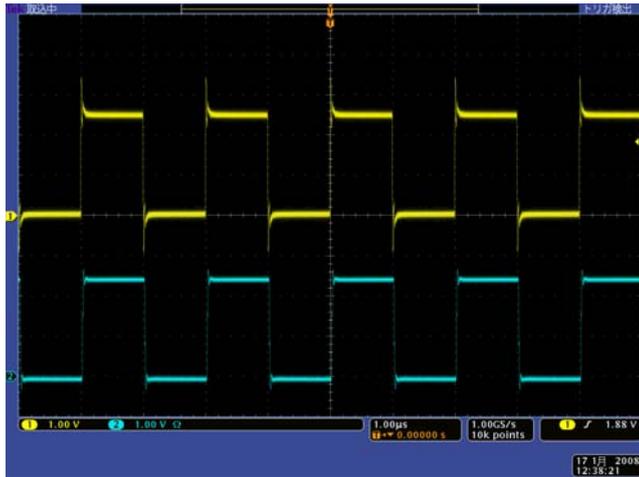
反射の実験



終端を開放した場合

6m 同軸ケーブル遠端で 50Ω 終端(オシロスコープの入カインピーダンスを 50Ω に設定)、1m 同軸ケーブルは終端無し(オシロスコープの入カインピーダンスを 1MΩ に設定)、パルスの周波数は 500kHz と 5MHz にて波形を観測しました。

この計測方法は TDR (Time Domain Reflectometry) と呼ばれ、専用の計測器が市販されています。



周波数 500kHz の場合
 CH1(黄): スタブの波形
 CH2(青): 6m 同軸ケーブル先端の波形

周波数が 500kHz の場合、オーバーシュートは認められますが、パルスの形は崩れてはいません。

しかし、周波数が 5MHz になると波形は大きく崩れてしまいます。



周波数 5MHz の場合

信号が遅い場合は、このようなバス型の伝送路でも動作しますが、次世代車載用バスである FlexRay では最高伝送レートが 10Mbps (NRZ で 5MHz) になります。車載バスはどうしても ECU へのスタブが存在するため、反射による波形の歪みには十分な配慮が求められます。

今回の実験は、実際のオートモーティブ用バスとはインピーダンスやケーブルのタイプが異なるため、そのままという訳ではありませんが、反射の影響を理解することはできると思います。

また、データ・レートが速くなると、バス・ケーブルの伝播遅延時間にも注意を払う必要があります。この実験でも、6m の同軸ケー

ブルにより 30ns の遅延が生じています。10Mbps の場合、100ns の遅延で 1 ビットのずれに相当します。100ns は約 20m のケーブルで発生しますので、伝播遅延に対する配慮が現実の世界になってきました。

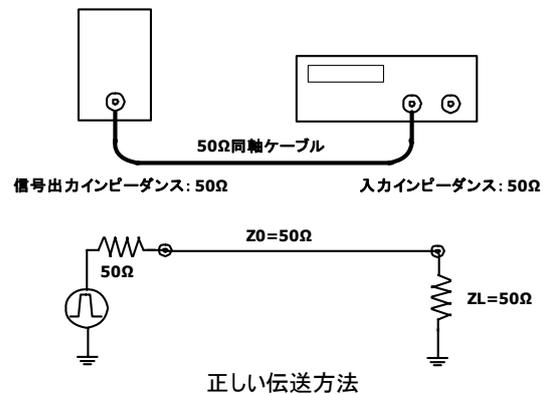
■ 機器間を接続する場合の考え方

オシロスコープには、入力された信号を他の計測器でも使えるように信号出力端子を持つものもあります。例えば、オシロスコープで測定している信号の周波数を正確に測定したい場合、信号出力を外部の周波数カウンタに入力すれば、オシロスコープで波形を観測しながら信号の周波数を正確に測定することができます。

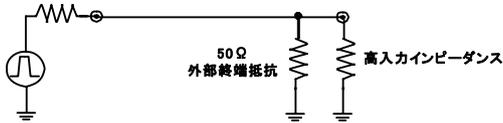
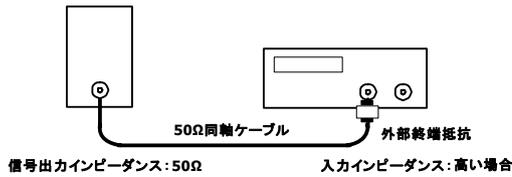
また、パルス・ジェネレータの信号を複数の機器で共有したい場合には、信号を分岐して使いたいものです。

このように機器同士を接続、または信号を共有する場合、特に信号が高速になる程インピーダンスの整合に注意を払う必要があります。安易な接続は波形歪みの原因になります。

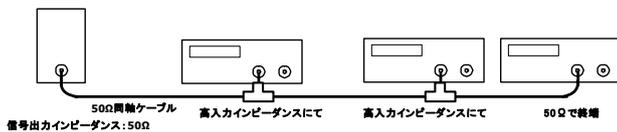
一般に、計測器の信号出力端子は出力インピーダンスが 50Ω で設計されています。このため、この信号を正しく伝えるためには 50Ω の特性インピーダンスの同軸ケーブルと同じく、50Ω の負荷 (受け取る機器の入力インピーダンス) で終端する必要があります。



このように接続すれば信号は歪むことなく、正しく伝送されます。もし受け取る機器の入力インピーダンスが高い場合は、外部終端抵抗 (ターミネータ) を併用すれば OK です。

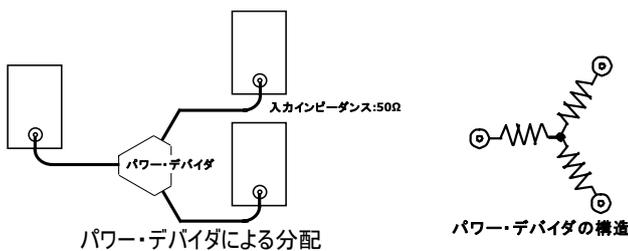


では、一つの信号を複数の機器に分配するにはどうすれば良いのでしょうか。信号の速度があまり速くない(数 MHz 程度)場合は、単なる「Tコネクタ」を用いて複数の機器を直列に接続します。Tコネクタをハイ入インピーダンス機器の BNC コネクタに直接取り付け、最後の機器で 50Ω 終端を行います。ただし、同軸ケーブルの長さ分の遅延時間(1m 当り約 5ns)が生じることは考える必要があります。



複数機器へのシリーズ(直列)分配

また、比較的高速なクロックを分配する場合、インピーダンスの整合をとらなければなりません。この場合には、パワー・デバイダの使用をお勧めします。



パワー・デバイダは、すべての端子に 50Ω の抵抗を接続した時、どの方向から見てもインピーダンスが 50Ω になるようにインピーダンスの整合をとりながら信号を分割します。パワー・デバイダを用いれば、正確に高速信号を分配することができます。しかし、電圧は低下することに注意する必要があります。

自動車の場合、多くがワイヤ・ハーネスの形になって共存しているため、問題はそのバスだけとは限りません。ケーブル間のクロストークが大きな問題を引き起こすこともあります。

最近の自動車には、多くのスイッチング回路が使われています。電気自動車やハイブリッド車では、モータ駆動用に大出力のインバータが使われていますが、一般の自動車でも電動パワー・ステアリングや HID、パワーシートなど、数多くのモータが使われているのはご存知の通りです。そして、程度の差はあっても、これらのモータからはノイズが輻射され、またサージの原因となっています。

このようなノイズがネットワークに乗った場合、時として長時間にわたりシリアル・データを壊してしまい、エラー修復ができず、通信障害になる場合があります。

対策はなかなか困難ですが、配線の取り回しに注意を払うだけでなく、適切なシールド、波形品質の管理などの対策が必要なのではないでしょうか。

最後に

自動車のエレクトロニクス化が進み、信号の速度も以前に比べて桁違いに速くなります。このため、プローブの接続については十分な配慮が求められます。場合によってはアクティブ・シングルエンド・プローブやアクティブ差動プローブを使用しないと、誤った測定結果になってしまうこともあり得ます。

アプリケーションに適したプローブを選択し、正しく使用することがより正確な測定への近道と言えるでしょう。

以上

日本テクトロニクス株式会社

www.tektronix.com/ja

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

お客様コールセンター TEL: 0120-441-046

電話受付時間 / 9:00~12:00・13:00~19:00 (土・日・祝・弊社休業日を除く)

■ 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。

2010年9月 49Z-25930-0