



# 伝送線路長の BER 測定への影響

## ～高速デジタル信号の取り扱い～

シグナル クオリティ アナライザ-R MP1900A

シグナル クオリティ アナライザ MP1800A

## 1. 市場トレンドと測定需要のトレンド

ネットワーク装置や、サーバ、ストレージの高速・大容量化により、最近では 100GbE だけではなく、400Gbps 伝送や、1Tbps 伝送の研究も行われるようになってきました。それに伴い、装置内部のインタフェースも 30+Gbps 伝送の開発が行われています。

30+Gbps のような高速信号を扱う場合には、従来よりも信号の取扱いに注意を払う必要があります。アンリツは以前、このような高速信号波形を観測する場合の測定器の注意点についてテクニカルノートをまとめました。<sup>\*1</sup>

本稿では、特に高速信号の Jitter 耐力試験をする場合のクロックとデータのケーブル長の取扱いに関する注意点と、高速伝送では一般的になりつつある差動信号の取扱いについて記載します。

## 2. テストのための準備

正しい測定のためには、測定器が正しく使用されていることが前提になります。そして同時に測定器の限界点を正しく知ることも必要です。測定器の限界を超えた点で測定した値は、しばしば測定対象物の特性ではなく、測定器の特性そのものになってしまうことがあります。たとえば、ある周波数帯域を持った Sampling Scope で、周波数帯域を超えた周波数成分を持つ波形を測定した場合には、入力した波形の真の特性を表示することはできず、Sampling Scope の特性が観測結果に現れてしまいます。<sup>\*1</sup>

Jitter 耐力を測定する場合でも、測定系の中に、印加している Jitter 量よりも Jitter 耐力の弱い測定器が存在する場合、Jitter 耐力測定結果は測定対象物ではなく、測定系内に存在する測定器自体の耐力になります。使用する測定器が内部に D 型 Flip-Flop や FIFO 等のリタイミング回路や、Clock Recovery のように PLL 回路を持っている場合、ここが Jitter 耐力のボトルネックとなることがあります。Jitter 耐力試験を実施す際には、実際に使用する測定器の性能限界を把握しておくことが重要です。

また、測定系内の測定器自体の Jitter 耐力が十分である場合でも、測定系の構築方法により、本来の特性よりも悪い結果が出る場合があります。昨今、データ信号の高速化に伴い、伝送品質確保のために Jitter の影響をより厳しく評価する必要がでてきました。そのため、試験で印加する Jitter は、周辺環境の悪影響(電源ノイズ, 温度ノイズ, PLL ノイズ等)を考慮し、以前よりも複雑化、高速化し、さらに総印加量も増加する傾向にあります。このような状況下、以前はあまり問題にならなかった試験系内のクロックルート、データルートの経路長差が、Jitter 耐力試験結果に影響を及ぼすことを考慮する必要がでてきました。

次章では、クロックとデータの経路長の取扱い上の注意点について記述します。

### 3. クロック・データ間の経路長差

パルス信号発生器(以下 PPG; Pulse Pattern Generator)のデータ信号が、測定対象物を経由し、Clock Recovery Unit (以下 CRU)を経由して誤り検出機(以下 ED; Error Detector)に接続される測定系を例に取り、クロック・データ経路長について説明します。

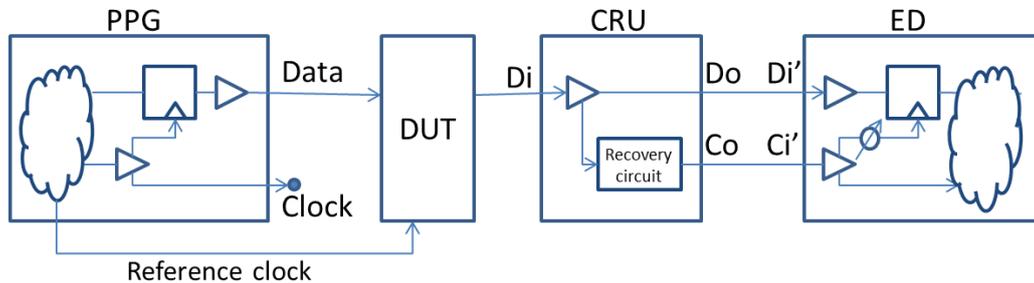


図 3.1: Jitter 耐力測定系

被測定物(DUT)から出力されるデータ信号は、CRU に接続されます。データ信号は、Clock Recovery 内部でそのままデータ信号として出力されるルートと、クロックを再生する回路につながるルートの二つに分岐されます。CRU からは、データ信号と、データ信号から再生されたクロックが出力されます。ここで、CRU から出力されるクロックとデータのタイミングを比較してみます。データ信号は、CRU 内で、単純に分岐されるだけなので比較的短い経路長を通過しています。一方クロック信号は、データ信号を元に再生されており、クロック再生回路自体の遅延時間もあるため、データ信号よりもかなり長い経路を経由しています。

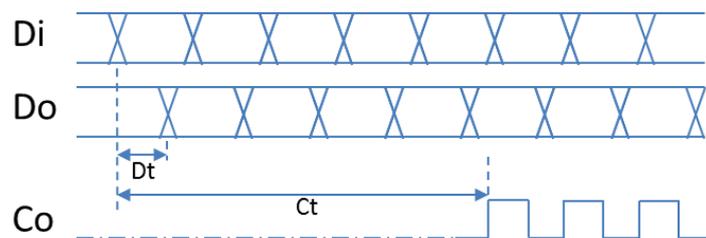


図 3.2 CRU の入出力タイミング

これは、バーストデータが入力されてからクロックが再生されるまでを示すクロック再生起動時間ではなく、あるデータの変化点を起点として、その変化点と位相が合っているクロックエッジのタイミングを示したものです。図 3.2 にタイミングを示します。Di は、CRU の入力データ、Do は、CRU の出力データ、Co は、CRU 内で再生されたクロック出力を示しています。

「データの変化点とクロックエッジのタイミングの位相が合っている」という状態を、実際の CRU で確認することはできませんが、位相があっている場合、論理的にはデータの色度を低いビットレートに下げた場合でも、図 3.2 の  $D_t$  と  $C_t$  の時間は変化しない、という関係が成り立ちます。 $D_t$  は、Data が CRU に入力されてから、出力されてくるまでの伝播遅延時間、 $C_t$  は、Data が CRU に入力されてから Clock が出力されてくるまでの伝播遅延時間です。Co と Do の波形を、一つのビットレートで観測するだけでは、どのエッジ間の  $D_t$  と  $C_t$  が一定なのか把握できません。しかし、複数のビットレートで波形を観測することで、 $C_t$  と  $D_t$  が一定な値となるデータとクロックのエッジを把握できます。ビットレートによらず、 $C_t$  と  $D_t$  の関係は一定である、というこの状態を「絶対位相が合っている」状態といいます。

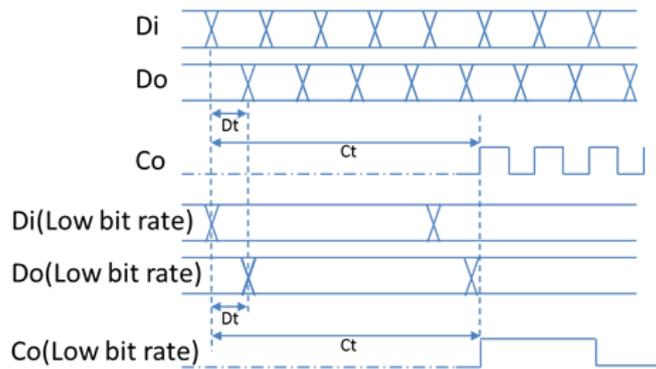


図 3.3: CRU 入出力タイミング (低ビットレートの場合)

もう一つ測定系の中で、意識する必要があるのが、ED 内部でのクロックとデータ間の経路長差です。データ信号は、測定結果を正確に得るために、初段の D 型 Flip-Flop までの距離は最短になるように設計されています。クロックルートの、ED 内部後段の回路で使用する各種分周クロックを生成させるため、データルートと比較して経路が長くなる傾向があります。結果として図 3.4 のように、 $Ct-dff$  の時間は、 $Dt-dff$  の時間よりも長くなります。

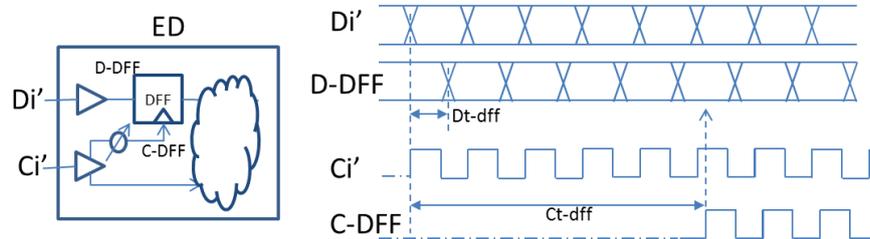


図 3.4: ED 内部の経路とタイミング

さらに、上記測定系の途中に Pre-Emphasis Unit のような D 型 Flip-Flop を保有する Unit が接続されている場合、PPG と Emphasis 間のデータ・クロックルートについても、同様に経路長を把握しておく必要があります。

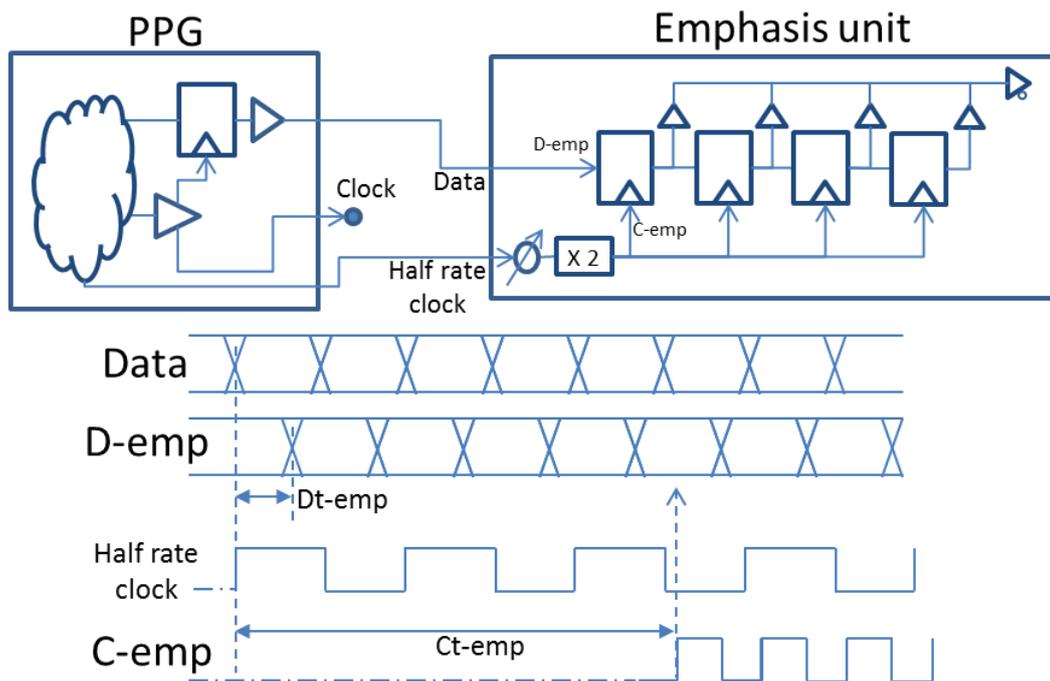


図 3.5: PPG と Emphasis 間の接続とタイミング

たとえばアンリツが提供する MP1825B Emphasis の場合、PPG からは Half Rate Clock を出力し、Emphasis Unit 内部で Half Rate Clock を Full Rate Clock に逡倍する方式を採用しています。この場合、PPG-Emphasis Unit 間では、Half Rate Clock を逡倍する回路の逡延時間のため、クロック逡播逡延時間(C-emp)がデータ逡播逡延時間(D-emp)よりも長くなります。

このような状況下で CRU-ED 間, PPG-Emphasis 間のように機器間のクロックとデータの絶対位相を合わせるためには、機器内部の逡路差も逡慮して、機器間を接続するケーブル長を調整する必要があります。CRU-ED 間では、クロックの逡路が  $(Ct - Dt) + (Ct-dff - Dt-dff)$  分長くなりますので、この時間差分、データ側のケーブルを長くする必要があります(図 3.2, 図 3.4)。同様に PPG-Emphasis 間では、データ逡路長を  $(Ct-emp - Dt-emp)$  分長くすることで、クロックとデータ間の位相を合わせるができます(図 3.5)。

さて、クロックとデータの逡路長の差ですが、Jitter の「逡響が少ない」場合、ED 内部でのクロックとデータの逡係は、必ずしも「絶対位相」を合わせておく必要はありません。ED 内部初段の D 型 Flip-Flop で、クロックとデータの逡係が Hold time、Setup time を満たす逡係にあれば、正常に測定することができます。通常 ED には、自動的にクロックとデータの逡係を調整する Auto Search 機能等がありますので、測定器内部のクロックとデータの逡係を気にする必要はありません。

同様にアンリツ製の Emphasis Unit の場合も、Jitter の逡響が少ない場合には、内部にクロックとデータの自動位相調整機能を保有していますので、ユーザが位相逡係を調整する必要はありません。

では次に、Jitter の「逡響が少ない」ということについて説明します。Jitter の「逡響が少ない」場合には、絶対位相を気にする必要はないと逡述しました。逆に Jitter の逡響が多い場合には、絶対位相を逡慮して測定系を構築する必要があります。

Jitter の逡響について、例を元に解説します。

10Gbps のデータ信号に 10Hz, 10UI の正弦波 Jitter を加えた場合と、10MHz, 10UI の正弦波 Jitter を加えた場合のデータ変化点の変移量を比べてみます。

一般的に、電気信号は 50 ohm の逡送路上を  $1m/4.75ns$  の速度で移動します。これは、オシロスコープで、データ信号を観測した場合、ケーブル長が 10cm 変わると、波形の位置が 475ps ずれる、ということの意味します。

10Gbps のデータ信号は、1 周期 100ps です。10UI の Jitter を印加する、ということはデータの変化点が 1000ps を往復するという意味になります。この場合のデータ変化点の移動逡離は、 $1000\text{ ps} \times 2$  です。逡述した電気速度  $1m, 4.75ns$  から逡算すると、約 42cm に相当します。

次に Jitter 変逡速度を考えます。10Hz の Jitter 変逡速度ということは、42cm を 10Hz すなわち 100ms で移動するという事です。同様に 10MHz の変逡速度の場合、42cm の逡離を 100ns で移動するという事になります。すなわち同じ Jitter 量なら、変逡速度の速い方が、移動逡離が長くなります。

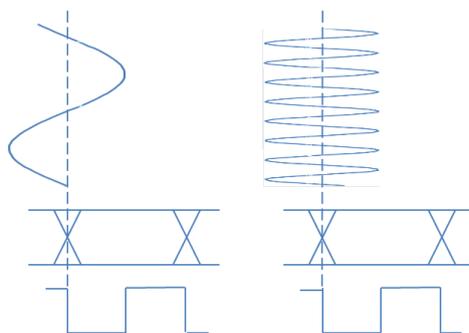


図 3.6: 1UI の Jitter で変逡速度が異なる場合の例

ここで、クロックとデータのルート長に差がある場合、すなわち絶対位相があっていない状態を考えます。

たとえばクロックケーブルが 1m, データケーブルが 50cm だった場合、経路長の差は 50cm です。つまりデータは、送信側を出てから 2.375ns 後、クロックは 4.75ns 後に受信側に到着します。通常、受信機側では、あらかじめこの時間差を考慮して、クロックとデータの関係が最適になるように位相を調整しているはずで、つまり十分に Setup, Hold time が確保できるように、データの変化点の中央付近にクロックの立ち上がりエッジがくるような位相関係に設計されるはずで、

ここで、同期しているクロックとデータの両方に Jitter を印加して同時に送信した場合、Jitter によるクロックの立ち上がりエッジとデータ変化点の関係の変化のみに着目してその変化状況を考えてみます。Jitter が印加されていても、クロックとデータが、最適な位相関係を維持したまま同時に変化する場合には、誤りは発生しません。しかし、クロックまたはデータのどちらかに、PLL 等のように、Jitter 成分の帯域を制限するような回路が入っており、Jitter 変調周波数がこの回路の帯域外である場合には、受信側で誤りが発生します。これは、クロックとデータの Jitter 量が変わり、クロックとデータ間の位相関係が受信回路の Setup, Hold time の限界を超えてしまうためです。ここでは、絶対位相による誤りが発生するメカニズムを説明するため、測定系の中に帯域を制限するような回路が入っていない、という前提で説明をします。

Jitter によるクロックとデータの位相関係の変化自体が伝達する速度も、電気と同じ速度です。そのため、同時に変化し始めたクロックとデータのエッジの位置は、経路長に 50cm の差がある場合、データ側が 2.375ns 後、クロック側が 4.75ns 後に受信側に到達します。この 2.375ns の間に、受信側で発生するクロックとデータの位相関係の差が、Setup, Hold time を確保できなくなるほど大きくなると、情報が正しく伝達できなくなり、誤りが発生します。

10Hz, 10UI の正弦波 Jitter を印加すると、クロック, データは 1 秒間で 100UI を往復する距離を移動します。2.375ns 間では、475 nUI ( $10\text{UI} / 10\text{Hz} \times 2(\text{往復分}) \times 2.375\text{ns}$ )しか移動しませんので、クロックとデータの位相関係に及ぼす影響は微小であると考えられます。一方、10MHz, 10UI の正弦波 Jitter の場合は、同様に計算しますと、475 mUI ( $10\text{UI} / 10\text{MHz} \times 2(\text{往復分}) \times 2.375\text{ns}$ )となりますので、この Jitter がクロックとデータの位相関係に及ぼす影響は相当大きいと考えることができます。

この影響は、Jitter 変調速度, Jitter 変調量, クロックとデータの経路長差が増加するほど大きくなります。また、ビットレートが速くなるほど受信デバイスの位相余裕を確保することが難しくなることを考慮すると、ビットレートによっても影響が大きくなると考えることができます。近年データ伝送レートがあがり、求められる Jitter 耐力規格も厳しくなってきたことから、以前はあまり意識されていなかった、クロックとデータ間の絶対位相というものを考慮しながら、測定系を構築する必要がでてきます。

測定器内のクロックとデータの位相差は、機器を提供しているメーカーに問い合わせることで入手可能です。

## 4. 差動測定の注意

本章では、高速信号では一般的になりつつある差動信号を取り扱う場合の注意点について記述します。差動信号は、Data / xData が相互に相手の信号の閾値電圧となることによって、Data / xData の双方に同時に印加されるコモンモードノイズ影響の軽減、Single-ended 使用時の 2 倍の電圧余裕確保等のメリットがあります。しかし、20Gbps を超えるような高速信号の差動信号は、大変繊細な取扱が必要で、条件によっては電圧余裕や位相余裕が Single-ended で使用するよりも悪化する場合もあります。

ここで、現在活発に開発が行われている 28Gbps 帯の信号を、差動で取り扱うことを考えてみましょう。

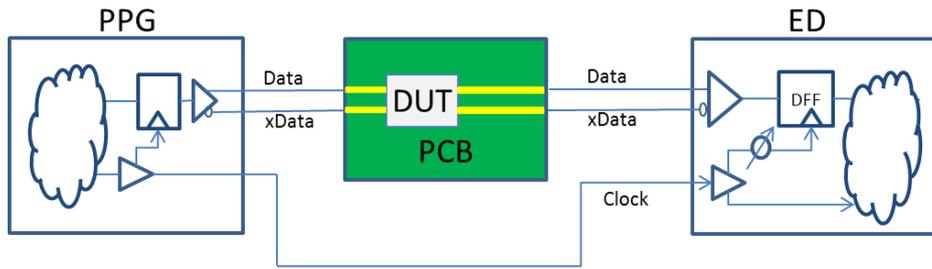


図 4.1: 差動の測定系

PCB 上の DUT がケーブルで ED に接続される上記のような系の場合、DUT から出てくる差動信号は、PCB とケーブルを経由し、ED に接続されます。差動信号を扱う場合、DUT 上の経路すべての差動経路を、同じ長さにする必要があります。

PCB 上の経路は、比較的差動間の誤差を少なく作ることができますが、PCB と測定器間のケーブルを使用する経路はどうでしょうか。ここには非常に精度の高い Phase Matched ケーブルが要求されます。28Gbps の場合、一周期は約 35.7ps です。前章で、「50ohm の伝送路上を移動する電気は 4.75ns で 1m を移動する」と記述しました。ここから換算すると、28Gbps 信号 1 周期 35.7ps は、約 7.5mm の電気長になります。つまりケーブル長が 7.5mm 違っていると、1bit ずれてしまいます。もちろんこれでは差動信号として正常に動作させることはできません。たとえケーブル長の誤差が 2-3mm だったとしても、40%程度のずれが生じることになります。

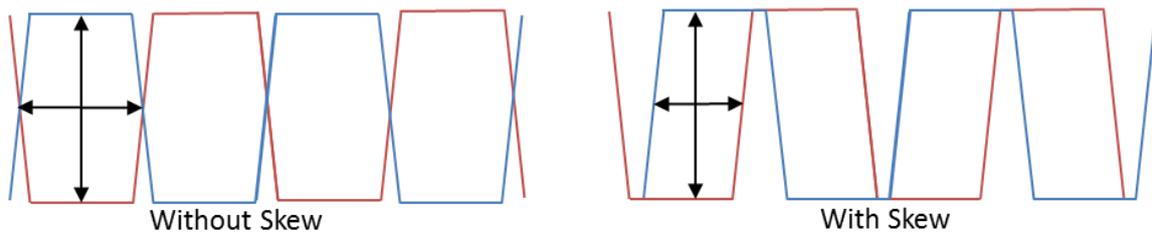


図 4.2: スキューと差動信号

図 4.2 で示すような High レベル、Low レベルが一定時間安定している信号の場合は、電圧余裕よりも位相余裕が狭くなるのが懸念されます。しかし、実際の信号は、伝送線路の帯域制限等により、ISI の影響が発生し、必ずしも、このように High レベル、Low レベルまで信号が十分に变化しきるとは限りません。

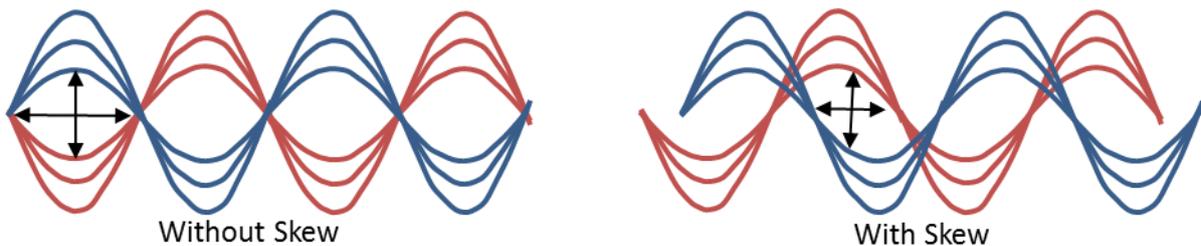


図 4.3: ISI の影響がある差動信号と Skew

図 4.3 のような信号の場合、差動信号間に Skew がある場合には、差動信号を使用しているにも関わらず、電圧余裕は Single-ended の 2 倍にはなりません。ここに信号の歪などが加わると、さらにこの余裕は減少し、結果として差動信号として扱うほうが、Single-ended よりも悪い結果になることも考えられます。

さらに、ほとんどのケーブルは、曲げたり、伸ばしたりすることで、電気長が 2-3 ps 程度変化します。Single-ended や低い Bit Rate で使用する上では、ほとんど意識する必要はありませんが、28Gbps のような高速信号では、ケーブルの曲げによる電気長の変化は、一周期の 10%近い影響を及ぼす可能性があります。

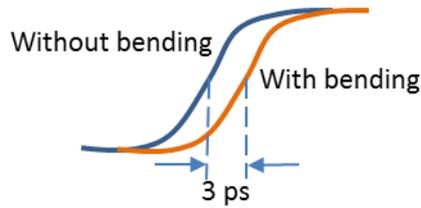


図 4.4: ケーブル曲げ伸ばしによる電気長の変化

このような条件下で、差動信号を使用する場合には、どうすればいいでしょうか。その一つの解は、50-100ps 程度の微小な可変範囲を持つ遅延器を Phase Matched ケーブルの両端に取り付け、その電気長を正確に同じ長さに調整することです。その間、ケーブルもできるだけ曲げないように考慮する必要があります。

それでもやはり、ケーブル自体の曲げによる微小な誤差を完全に除去することは難しいかもしれません。そのような場合は、あえて差動ではなく Single-ended で測定してみる、というのも一つの手段です。

次章に、ケーブルの長さを確認する方法について記載します。

## 5. ケーブルの長さの違いを知る方法

ここでは、ケーブルの長さの違いを確認する方法を二つ記載します。一つはパルス信号の波形をスコープで確認する方法、もう一つは TDR を使用する方法です。

### 5.1 パルス波形での確認

Phase Matched ケーブルのように二本のケーブルがあり、スコープにも複数の入力があったとしても、そのまま二本のケーブルを同時に二つの入力で測定したのでは、二本のケーブルが、同じ長さかどうかを正確に測ることはできません。スコープの入力間にも内部の Skew があるからです。ほとんどのスコープは、内部 Skew を調整する機能が付属していますが、ここでは、単純に一本ずつ測定する方法を示します。

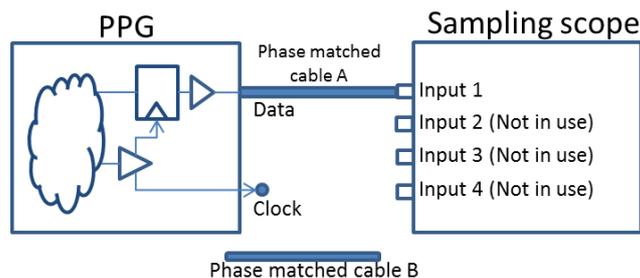


図 5.1: PPG とサンプリングスコープを使用した測定系

PPG などの信号源を、測定対象となるビットレートの 1/10 以下のビットレートに設定し、かつパターン長を 1024bit とし、16bit だけ 1、他は 0 に設定します。PPG の出力に測定対象の 1 本目のケーブルで、スコープに接続します。

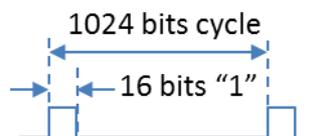


図 5.2: パターンの設定

スコープ上では、PPG の 0 から 1 への変化点が一つだけみえるように観測し、この波形をスコープ上に保存します。次に、ケーブルを二本目に交換し、同じスコープの入力に接続します。ケーブル自体の長さがほぼ同じであれば、先ほど保存した 1 本目のケーブルの波形と、現在表示している二本目のケーブルの差を画面上で確認することができます。

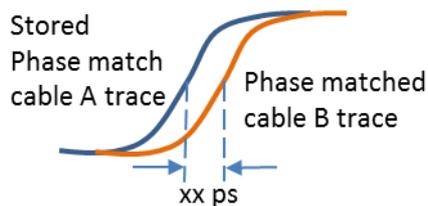


図 5.3: 保存波形と表示波形の差

時間方向の分解能を上げた方がより正確に測定することができますが、ケーブルの誤差が大きい場合、ケーブルを交換した後に、比較対象となるエッジが、画面上には表示されないこともあります。このような場合には、時間方向の分解能を、荒く設定し、二本のケーブルの波形のエッジの位置を観測しながら、徐々に分解能を上げていくことで正確に測定することができます。

## 5.2 TDR での確認

PPG とスコープを使用して、パルス波形を確認するのではなく、オシロだけでケーブル長の測定をするのが、TDR を使用した方法です。

TDR のケーブル端に、ケーブルの片端を接続し、もう片端を開放したままで、測定を開始すると、画面上では以下のように、波形が表示されます。

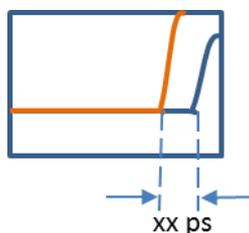


図 5.4: TDR でのケーブル測定結果イメージ

ケーブルが存在する場所は 50ohm となり、ケーブルの末端は開放されているので、無限大のインピーダンスとなります。この測定結果もまた、時間方向の分解能を上げ、無限大のインピーダンスを表示している領域付近を拡大表示し、結果を保存します。

そしてもう一本のケーブルを接続し、同様の測定を実施します。このとき、時間軸上の差は、そのままケーブルの長さの差を示すのではなく、ケーブル長の差の 2 倍となっていることに注意してください。TDR はパルス波形をスコープ側から送信し、その反射が戻って来るまでの時間を測定しています。そのため、測定結果は、行きと戻りの 2 倍の長さを伝達した結果になります。

## 6. まとめ

本稿では、昨今取り扱われることの多くなった高速信号を正確に測定するための、伝送線路長取扱の注意点を Jitter 耐力測定、差動信号という二つの点から記載しました。ここで述べた内容は、一般的なことであり、今後ビットレートが高速化していくことでより注意が必要になる課題です。

アンリツは、お客様の正確な測定のパートナーとして、今後とも貢献していきます。

## 7. 参考文献

\*1: 高速デジタル信号測定時のツール選定 (MP1800A\_MP2100A\_JE1100)

## アンリツ株式会社

<http://www.anritsu.com>

本社 〒243-8555 神奈川県厚木市恩名5-1-1 TEL 046-223-1111  
厚木 〒243-0016 神奈川県厚木市田村町8-5  
計測器営業本部 TEL 046-296-1202 FAX 046-296-1239  
計測器営業本部 営業推進部 TEL 046-296-1208 FAX 046-296-1248  
仙台 〒980-6015 宮城県仙台市青葉区中央4-6-1 住友生命仙台中央ビル  
計測器営業本部 TEL 022-266-6134 FAX 022-266-1529  
名古屋 〒450-0003 愛知県名古屋市中村区名駅南2-14-19 住友生命名古屋ビル  
計測器営業本部 TEL 052-582-7283 FAX 052-569-1485  
大阪 〒564-0063 大阪府吹田市江坂町1-23-101 大同生命江坂ビル  
計測器営業本部 TEL 06-6338-2800 FAX 06-6338-8118  
福岡 〒812-0004 福岡県福岡市博多区榎田1-8-28 ツインスクエア  
計測器営業本部 TEL 092-471-7656 FAX 092-471-7699

ご使用の前に取扱説明書をよくお読みのうえ、正しくお使いください。

1602

■カタログのご請求、価格・納期のお問い合わせは、下記または営業担当までお問い合わせください。  
計測器営業本部 営業推進部

☎ TEL: 0120-133-099 (046-296-1208) FAX: 046-296-1248  
受付時間/9:00~12:00、13:00~17:00、月~金曜日(当社休業日を除く)  
E-mail: SJPost@zy.anritsu.co.jp

■計測器の使用法、その他については、下記までお問い合わせください。  
計測サポートセンター

☎ TEL: 0120-827-221 (046-296-6640)  
受付時間/9:00~12:00、13:00~17:00、月~金曜日(当社休業日を除く)  
E-mail: MDVPOST@anritsu.com

■本製品を国外に持ち出すときは、外国為替および外国貿易法の規定により、日本政府の輸出許可または役務取引許可が必要となる場合があります。  
また、米国の輸出管理規則により、日本からの再輸出には米国商務省の許可が必要となる場合がありますので、必ず弊社の営業担当までご連絡ください。