

高速デジタル信号測定時の機器選定

1. はじめに

人工知能 (AI) やハイパフォーマンスコンピューティングの普及により、トランスポンダやサーバ、ストレージ機器で扱うデータ量は飛躍的に増加しています。これらの機器内部では、データレートが数十Gbit/sもの高速デジタル信号がやり取りされています。こうした高速信号を適切に扱うためには、デジタル信号の特性だけでなく、アナログ信号の動作にも十分に配慮する必要があります。そのためには、信号を正確に評価するための測定器の選定が重要になります。

本書でははじめに、デジタル信号の性質やその測定方法の基礎について説明します。それから、サンプリングオシロスコープや周辺コンポーネントに着目し、これらの性能差や特性差が測定結果に及ぼす影響について明らかにします。

2. デジタル信号の性質

デューティ比が50%の矩形波は、デジタル信号の基本的な波形であり、基本周波数のほかに3倍、5倍、7倍といった奇数倍の高調波成分が重なり合って構成されています。これを数学的に表すと、矩形波はフーリエ級数展開によって、各奇数次高調波の重ね合わせで表現できることがわかります。なお、倍数が大きくなるにつれて各高調波の振幅は徐々に小さくなります。つまり、矩形波の鋭い形状は、高調波成分によって生み出されており、これらの成分を除去すると波形が丸みを帯びていきます。このように、矩形波の特性は高調波の存在とその減衰特性によって説明されます。

$$f(x) = \frac{\pi}{4} \left(\sin(x) + \frac{1}{3} \sin(3x) + \frac{1}{5} \sin(5x) + \frac{1}{7} \sin(7x) + \dots \right)$$

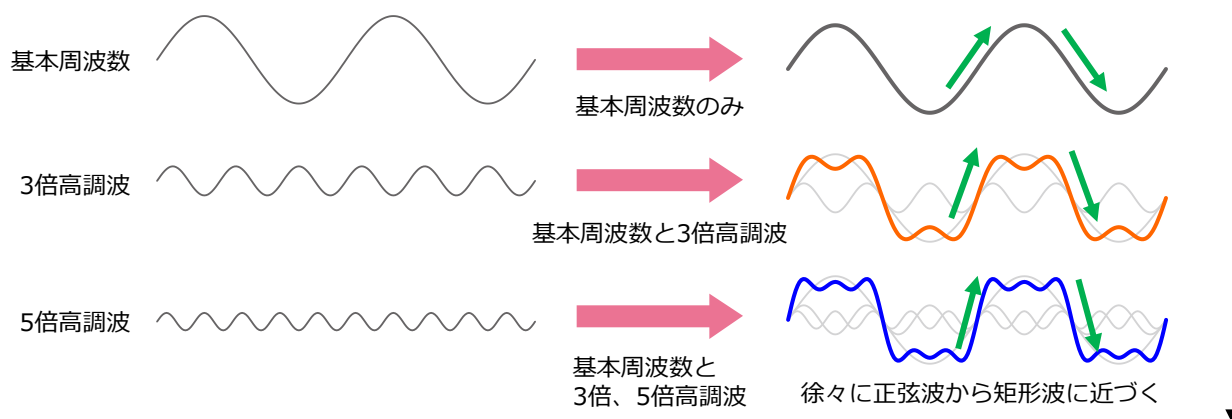


図1 矩形波の周波数成分

実際の信号は、さまざまな要因からデューティ比が50%ではない場合や、反射などの影響で波形に歪みが生じることがあります。このため、基本周波数の奇数倍高調波だけでなく、偶数倍の高調波も存在することがあります。しかし、ここではデューティ比が理想的な50%の矩形波の信号について説明します。

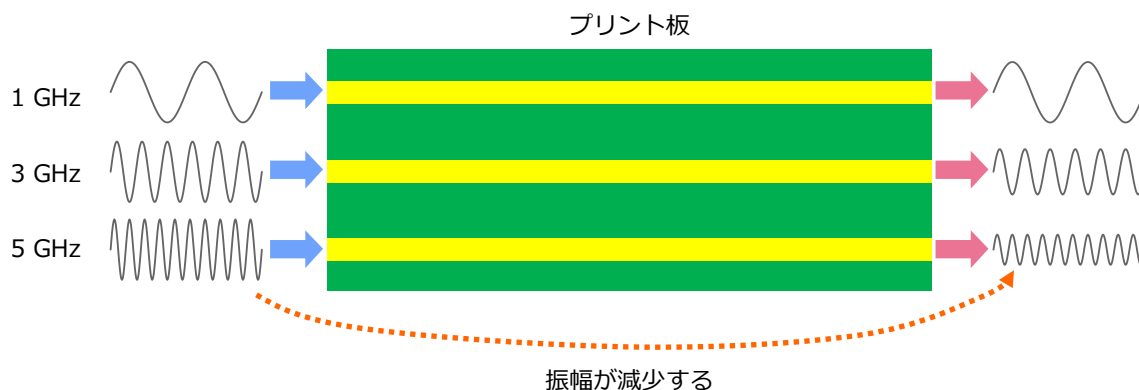


図2 周波数と伝送路の損失

デジタル信号は、通常プリント基板上で送信回路から次段の受信回路へと伝送されます。その際、伝送路上では、一般的に周波数の低い成分と比較して周波数の高い成分の損失が大きくなります。これにより、高周波成分が減衰し、信号の波形が歪むことがあります。伝送路の減衰量は、ネットワークアナライザを用いることで評価できます。ネットワークアナライザでは、Sパラメータを取得することができます。このうち、 S_{21} パラメータは、伝送路の入力から出力までの信号の減衰量を示すものであり、ネットワークアナライザでは減衰量の周波数特性を評価できます。

デジタル信号の周波数特性を踏まえた上で、次章以降では、測定系が測定結果に及ぼす影響について詳しく説明していきます。

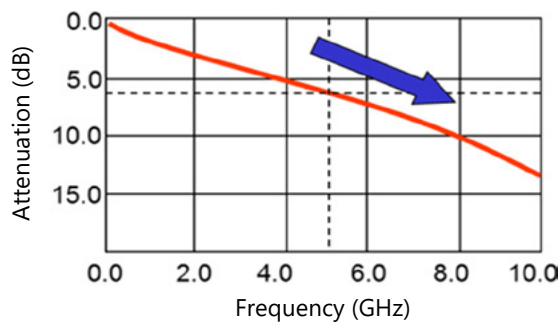


図3 伝送路の周波数特性

3. サンプリングオシロスコープの性能による波形の違い

3章では、デジタル信号の波形測定に使用するサンプリングオシロスコープの性能差が測定結果に及ぼす影響について説明します。

3.1 帯域による波形の違い

高速デジタル信号の測定には、一般的にサンプリングオシロスコープが用いられます。2章で説明したように、矩形波には多数の高調波成分が含まれており、これらを適切に観測するためには、測定対象の信号速度に応じた十分な帯域幅が必要です。

たとえば、NRZ (Non Return to Zero) 方式の10 Gbit/s電気信号を測定するケースを考えます。この場合、基本周波数は信号速度の半分、すなわち5 GHzとなります（これはナイキスト周波数とも呼ばれます）。しかし、デジタル信号の正確な立ち上がりや立ち下がり波形を観測するためには、基本周波数だけでなく、その3倍や5倍といった高調波成分も正確に取り込む必要があります。これは、矩形波形の急峻なエッジ部分が高調波成分によって構成されているためであり、十分な帯域幅がなければ波形がなまって見えてしまうためです。

5倍の高調波について、もう一度矩形波をフーリエ級数展開した場合の式を確認してみます。

$$f(x) = \frac{\pi}{4} \left(\sin(x) + \frac{1}{3} \sin(3x) + \frac{1}{5} \sin(5x) + \frac{1}{7} \sin(7x) + \dots \right)$$

この式から、高調波になるほど振幅が小さくなり、信号波形に与える影響が少なくなっていくことがわかります。

理想的な波形を正確に観測するためには、信号の高調波成分まで十分にカバーできる広帯域の測定器が必要です。たとえば、10 Gbit/sのNRZ信号の場合、理論的には7次高調波で35 GHz、9次高調波では45 GHzが必要となります。これは、信号の立ち上がりや立ち下がりの急峻さ（エッジ特性）を忠実に観測するために、高次の高調波成分まで測定できることが求められるためです。

一方、データレートが28 Gbit/sのNRZ信号の場合、7次高調波では98 GHz、9次高調波では126 GHzもの帯域幅が必要となります。しかし、これほど高帯域な測定器は種類が少なく、高額であることがほとんどです。そのため、すべての高調波成分を網羅するのではなく、実用的な帯域幅の範囲でどこまで投資するかを判断する必要があります。

これらを踏まえ、矩形波のようなデジタル信号の波形品質を評価する際には、少なくとも基本周波数の5倍程度の高調波までカバーできる帯域幅を持つサンプリングオシロスコープの使用が一般的です。たとえば、10 Gbit/s信号の場合、基本周波数は約5 GHzとなるため、5倍の25 GHz以上の帯域幅を持つ機器が推奨されます。さらに、実際の測定環境では、伝送路やコネクタによる損失・反射、外来ノイズなどの影響も受けるため、より広い帯域幅を選択することで、これらの影響を考慮しつつ、信号の本来の波形やエッジ特性をより忠実に再現・観測することが可能となります。同様に、100G物理レイヤ（PHY）で使用される 28 Gbit/sのデータ信号を測定する場合には、14 GHzの基本周波数と5倍の高調波を考慮し、70 GHzの帯域が必要ということになります。

なお、一般に光通信用デバイスを評価する場合には、ビットレートの75%程度のローパスフィルタ（10 Gbit/sでは7.5 GHzのLPF）を通過させて測定することが規定されていることが多いため、電気信号の測定とは必要となる帯域が異なります。

図4および図5には、28 Gbit/sの信号を50 GHz帯域および70 GHz帯域のサンプリングオシロスコープで観測した波形が示されています。70 GHz帯域で観測した場合、信号の立ち上がり時間および立ち下がり時間（10～90%）は約14.2 psでした。一方、50 GHz帯域での観測では、立ち上がり時間・立ち下がり時間はおよそ17～18 psとなり、70 GHz帯域と比べて1.2～1.3倍長くなっています。

この違いの主な要因は、オシロスコープの帯域幅の制限によって高調波成分が十分に観測できなくなることにあります。特に信号の急峻な立ち上がりや立ち下がりを再現するには、5次高調波以上の周波数成分が必要ですが、50 GHz帯域ではこれらの高調波の一部が帯域外となり観測できません。その結果、波形が丸みを帯び、立ち上がり時間や立ち下がり時間が実際よりも長く計測されてしまいます。

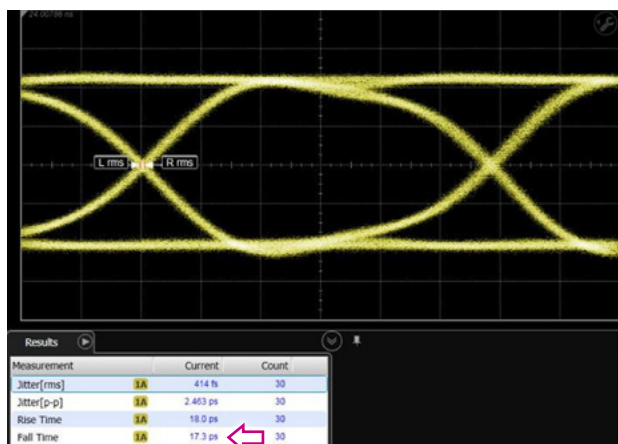


図4 50 GHz帯域オシロスコープの波形

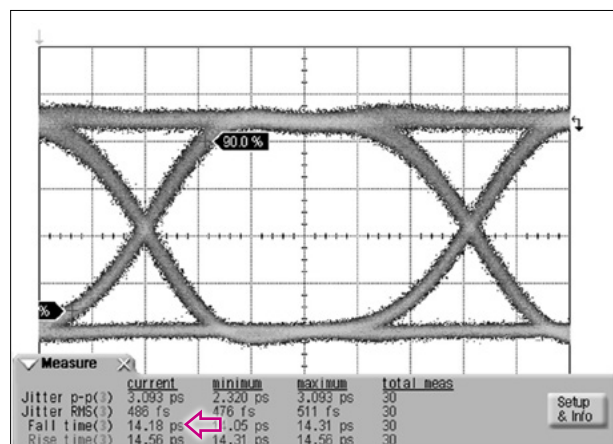


図5 70 GHz帯域オシロスコープの波形

3.2 トリガによる波形の違い

サンプリングオシロスコープを用いてGbit/sクラス的高速信号を観測する際、特に注意すべき点の一つがトリガ精度です。サンプリングオシロスコープでは、観測対象の信号と非同期なトリガ信号を基準とし、一定の時間間隔で入力信号をサンプリングして波形を再構成します。ここで、基準となるトリガ信号にジッタ(タイミングの揺らぎ)が多いと、描画された波形上のジッタは、実際の入力信号が持つジッタよりも大きくなってしまいます。信号速度が増すほど、1ビットあたりの時間幅が短くなるため、たとえば20 Gbit/sを超えるような超高速信号の測定では、測定系に起因するジッタの影響が無視できなくなります。このため、高精度なジッタ測定を行うには、測定機器自身が持つジッタ成分を抑える必要があります。

具体的な例として、28 Gbit/sの信号を帯域幅70 GHzのサンプリングオシロスコープで観測した場合を考えます。ここで「高精度トリガ」機能を使用した場合の観測波形を図6に、使用しなかった場合を図7に示します。高精度トリガを利用した際には、測定されたジッタ値は486 fs (RMS) ですが、通常トリガの場合は1.062 ps (RMS) へと増加していることが確認できます。これは、測定系に起因するジッタが観測結果に大きく影響することを示しています。

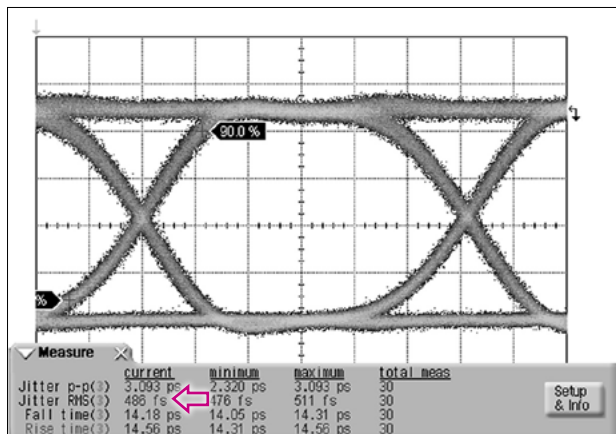


図6 高精度トリガ使用時

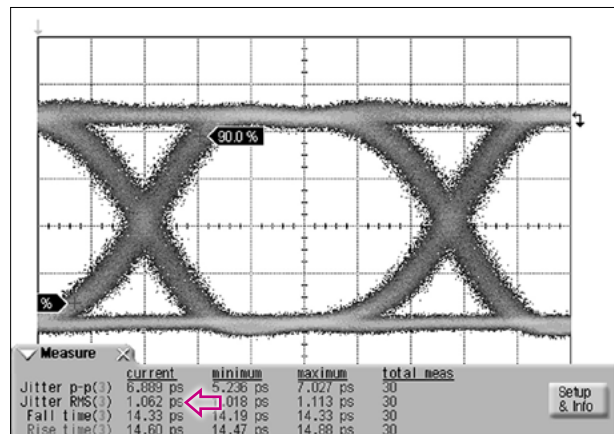


図7 高精度トリガ未使用時

このように、同一の波形を入力しても、サンプリングオシロスコープのトリガ精度や帯域幅の違いによって、観測される波形に差異が生じる場合があります。そのため、測定した波形が実際の信号を正確に反映しているとは限らず、トリガや帯域幅の制約によって誤った評価に至るリスクが存在します。正確な信号評価を行うためには、測定対象の信号特性や周波数帯域を十分に理解し、それに適した測定ツールやオシロスコープを選択することが重要です。

4. 周辺デバイスの特性

第4章では、波形観測時に使用するコネクタ、フィルタ、ケーブルなどの部品特性が、観測される波形へ及ぼす影響について解説します。

図8と図9には、波形品質に違いのある2種類の10 Gbit/s信号を観測した結果を示しています。どちらのケースも、50 GHz帯域のオシロスコープを使用し、高精度トリガによる観測を行い、80 cmのケーブルを介して、振幅2 Vp-pの信号を入力しました。この観測結果から、PPG-1の立ち上がり時間・立ち下がり時間は約28 psであることがわかります。一方、PPG-2の波形は、立ち上がり・立ち下がり時間が約12.5 psと、より高速です。

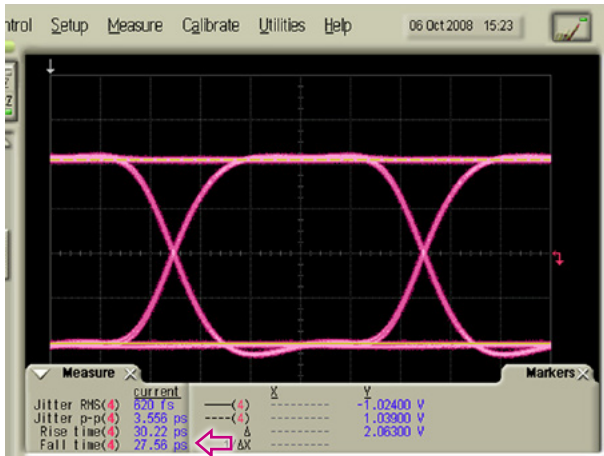


図8 PPG-1波形

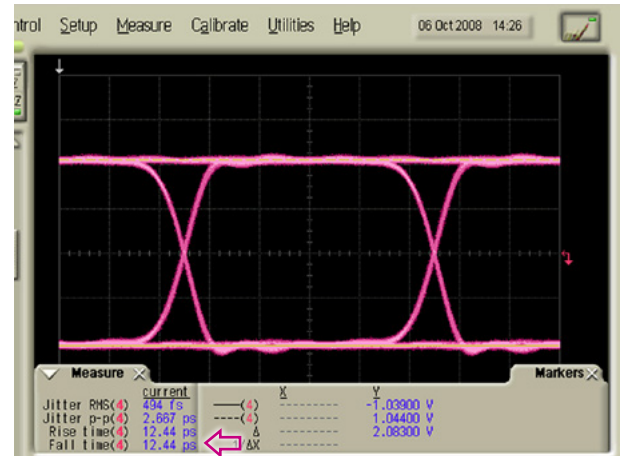


図9 PPG-2波形

次に、これら二つの信号のスペクトラムを示します。

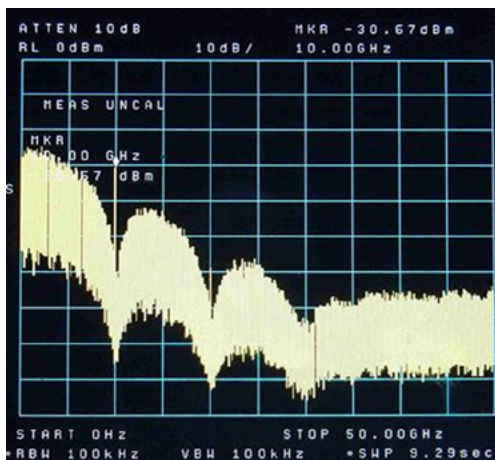


図10 PPG-1スペクトラム

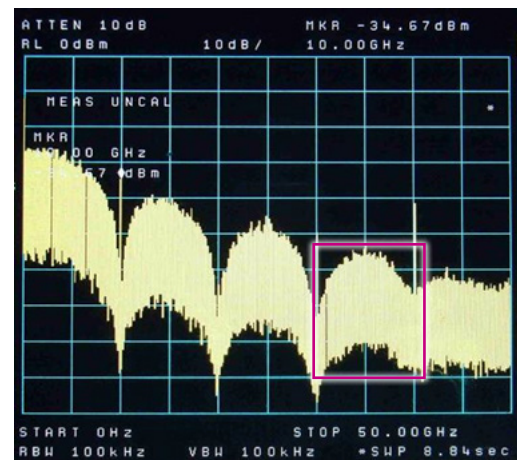


図11 PPG-2スペクトラム

30 GHz以下のスペクトルに関しては、両方ともほぼ同様の特性を示していますが、PPG-2のスペクトルは35 GHz付近でやや高いレベルを示しています。これは、PPG-2の波形が立ち上がり・立ち下がりがより急峻であり、理想的な矩形波に近い形状であることを示しています。その結果、スペクトル中には7次高調波成分が多く含まれていることがわかります。

このようなスペクトルの違いが波形測定に与える影響を理解するために、次にコネクタやフィルタなどの受動素子を通過させた場合に波形がどのように変化するかを説明します。具体的には、10 Gbit/s信号に十分な周波数特性を持つSMP-SMA Male/Femaleアダプタを経由させた際の波形を観察しました。このとき、アダプタの伝送特性を評価するため、ベクトルネットワークアナライザを用いてSパラメータを測定しました。その結果を図13に示します。S₂₁の周波数特性を見ると、多少のレベル変動はあるものの、50 GHz近辺まで帯域が十分に拡張されていることが確認できます。



図12 SMA-SMPアダプタ

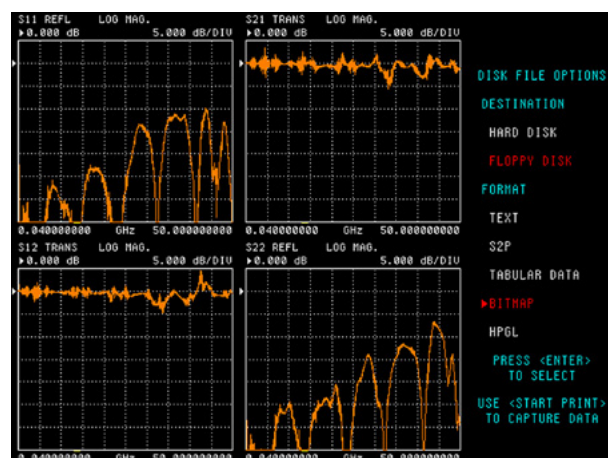


図13 SMA-SMPアダプタのSパラメータ

このようなデバイスを通させた場合、観測波形にはほぼ影響がありません。

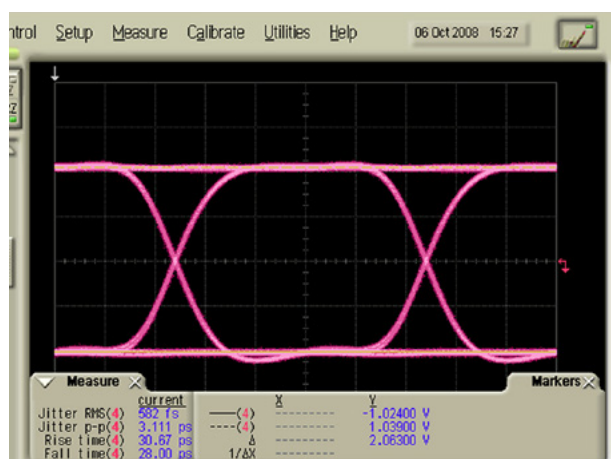


図14 SMPアダプタ通過後のPPG-1波形

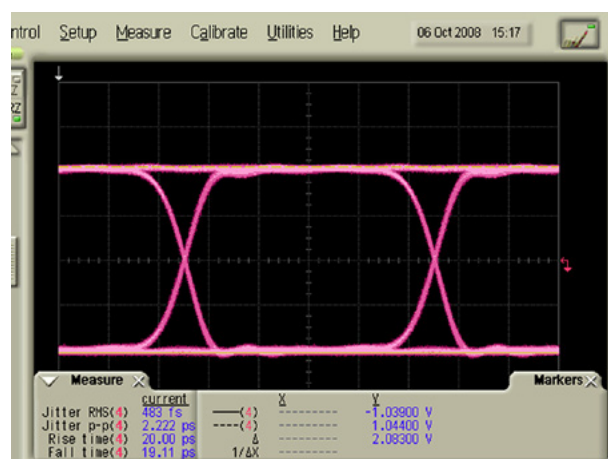


図15 SMPアダプタ通過後のPPG-2波形

次に、BNC-SMA Male/FemaleアダプタのSパラメータを図17に示します。周波数特性S₁₁は43 GHz付近ではほぼ0 dBであり、この周波数では信号が反射することがわかります。



図16 BNCアダプタ

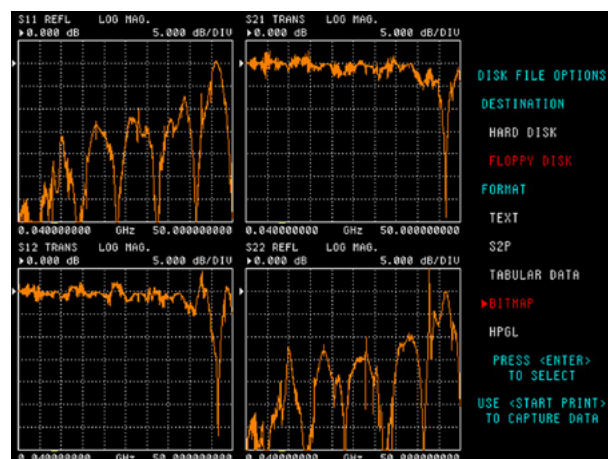


図17 BNCアダプタのSパラメータ

このBNCアダプタの特性が波形に及ぼす影響を図18と図19に示します。

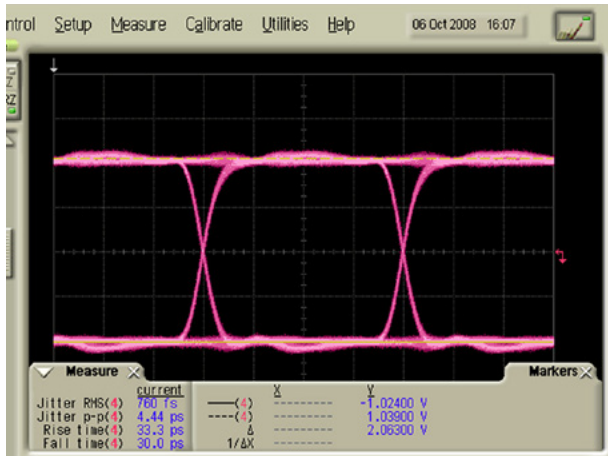


図18 BNCアダプタ通過後のPPG-1波形

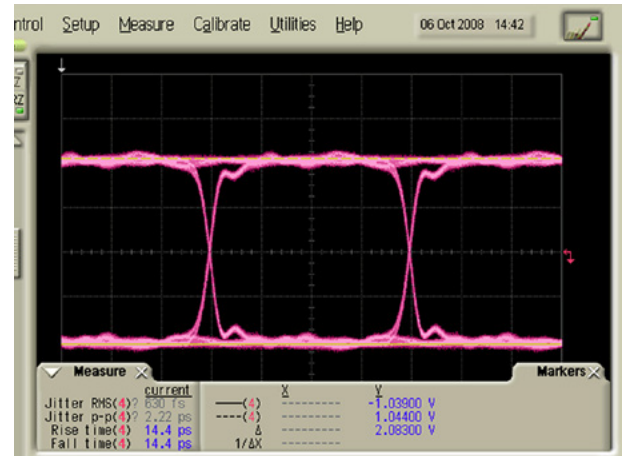


図19 BNCアダプタ通過後のPPG-2波形

どちらの波形にも、ベースラインに波形の歪みが観測されます。これは主に反射によるものと考えられますが、30 GHz以上の成分をより多く含むPPG-2の方がより顕著な影響を受けていることがわかります。伝送路の周波数特性が信号の周波数帯域に対して十分でない場合、このように、立ち上がり、立ち下りの速い信号を入力すると、むしろ波形を悪化させる結果を招くことがあります。このように、入力信号波形は、伝送路の特性に合わせる必要があることがわかります。

さらに次に、立ち上がり、立ち下りが速い信号を伝送路に合わせてLPFを通過させる場合の例を示します。ここでは、遮断周波数6.8 GHzのLPFを使用した例で説明します。このLPFでSパラメータを測定した結果を図20に示します。

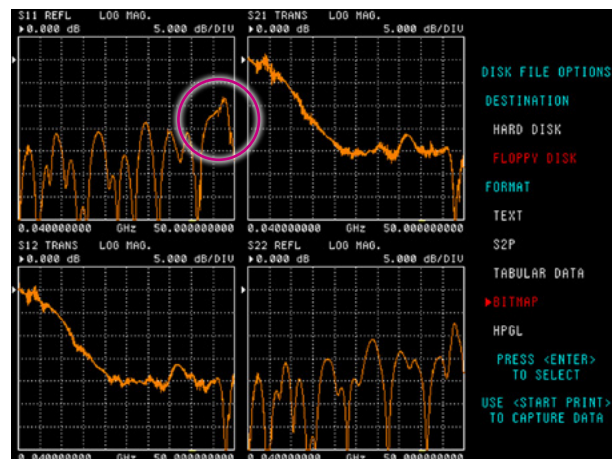


図20 遮断周波数6.8 GHz LPFのSパラメータ

S_{21} を見ると、6.8 GHzから20 GHz 付近までは、ほぼ10 dB/decadeで減衰していますが、20 GHz以降は、一定の減衰量となっています。また、 S_{11} から40 GHz以降で反射が増加していることがわかります。このLPFを通過させた波形を図21と図22に示します。

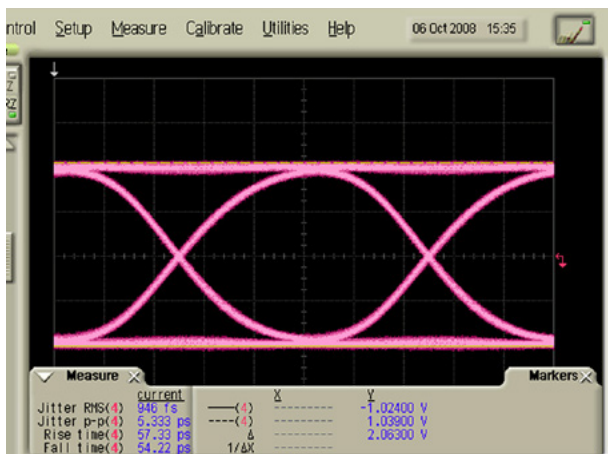


図21 LPF通過後のPPG-1波形

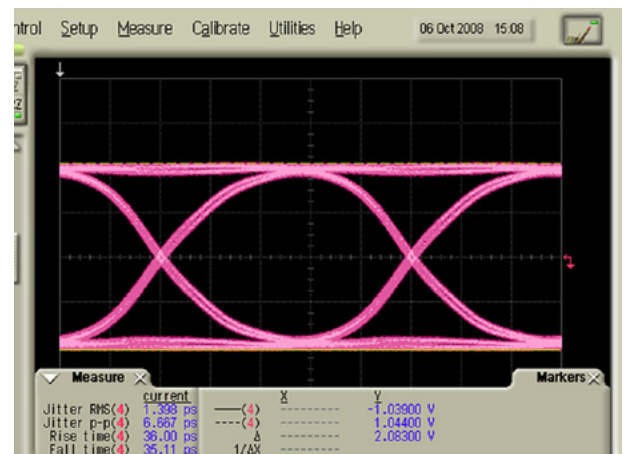


図22 LPF通過後のPPG-2波形

LPFによって信号の帯域が制限されているため、どちらの波形も符号間干渉 (ISI) の影響でジッタが増加しています。ただし、PPG-2 は立ち上がり・立ち下りが速いため、そのジッタ量がより大きくなっています。これは、PPG-2の波形に高調波成分が多く含まれていることが主な要因です。特に、40 GHz付近の反射成分がジッタ増加に寄与していると考えられます。さらに、このLPFは20 GHz以上の周波数帯域の成分を十分に減衰できていない可能性があります。

このように、周波数帯域や反射特性が不十分な測定系では、より多くの高調波成分を持つ信号——すなわち、立ち上がりや立ち下りが速い波形ほどISIや反射の影響を強く受けやすいことがわかります。これは、BNCアダプタを通過させた場合にも同様の傾向が観察されます。高速信号を高精度に測定するためには、測定系に用いるケーブルやアダプタ、フィルタなどの周波数特性や反射特性に十分注意を払い、信号の高調波成分が正しく伝送・測定できる環境を整えることが重要です。

最後に、32 Gbit/sの信号を27.5 GHz帯域の80 cm同軸ケーブルと40 GHz帯域の80 cm同軸ケーブルをそれぞれ使用して観測した波形を図23と図24に示します。27.5 GHz帯域の同軸ケーブルを使った観測結果では、波形の下部にアンダーシュートが観測できますが、これは入力信号に対して、同軸ケーブルの帯域が不足しているために発生した歪みと考えられます。

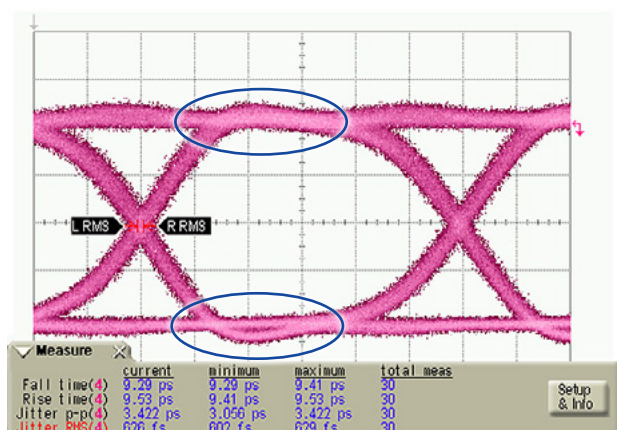


図23 27.5 GHz帯域のケーブル使用時

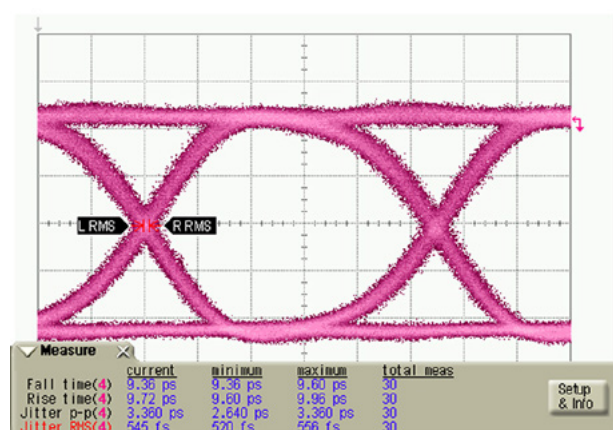


図24 40 GHz帯域のケーブル使用時

5. まとめ

本書では、サンプリングオシロスコープの帯域幅とトリガ精度が観測波形に与える影響、およびアダプタやフィルタなどの周辺デバイスの周波数特性が観測波形に及ぼす影響について説明しました。高周波信号を正確に測定するためには、信号源、ケーブル、アダプタ、観測用測定器のすべてが対象信号を正確に測定できる条件を満たしていることを十分に確認することが必要です。

アンリツは今後も、お客様の製品の品質と付加価値を高めるために、より良い測定方法を提案していきます。

関連製品

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-R MP1900Aシリーズは、8スロットモジュラー式の高性能BERTです。PPG、ED、ジッタ/ノイズ付加機能を測定アプリケーションに応じて拡張することができ、高速化が進むデバイスのシグナルインテグリティ解析に最適です。さらに、高速ネットワークインタフェースの物理層測定機能だけでなく、PCI Expressなどのバスインタフェースの測定を1台でサポートします。



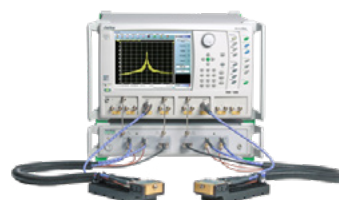
BERTWave MP2110A

MP2110Aは、10G~800Gの光モジュールの製造評価に適した測定器で、4チャンネル サンプリングオシロスコープ (アイパターン解析) とBERT (ビットエラーレート測定) とを1筐体に組み込むことができます。



広帯域ベクトルネットワークアナライザ ME7838シリーズ

VectorStar ME7838シリーズ 広帯域VNAは、2ポートで、広帯域70 kHz~110、125、145 GHzおよび、220 GHzをシングル掃引できます。最大でミリ波帯1.1 THzの測定に拡張可能です。



同軸ケーブル・コネクタ

40 GHzまで使用できるKコネクタを製造し、商標登録してきました。それらは高い評価をいただき、今日数多くの商業用コンポーネント、テストフィクスチャで利用されています。

Vコネクタは、65 GHzまでの周波数を同軸でカバーしており、国際電気標準会議 (IEC) が推奨する1.85 mmの外寸を採用し、市販の2.4 mmコネクタに適合します。



終端器・減衰器・コンポーネント

KコネクタやVコネクタの周波数帯域に対応した終端器、減衰器、バイアスTなどのコンポーネントを用意しています。

