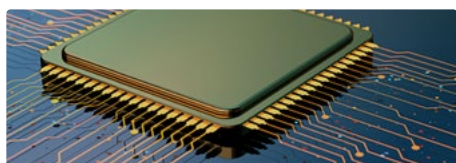


ベクトルネットワークアナライザ

高速デジタル回路の評価における適切な測定周波数帯域幅の選び方

PCI Express® (PCIe®) やUSBに代表される高速デジタル伝送技術は、AIコンピューティングや自動車技術、無線・光ネットワークなどの分野で通信速度やデータ処理能力を劇的に向上させ、リアルタイムなデータ解析や予測などに重要な役割を果たしています。高速デジタル伝送は、高周波プリント基板、AIチップやASICなどの半導体、電気/光配線、コネクタといった素子により支えられています。高速デジタル伝送では、信号の周波数が増加すると、伝送線路の材料の高周波損失特性などの影響によりデジタル信号が劣化しやすくなります。さらに、デジタル信号の時間軸方向（タイミング）の揺らぎを表すジッタ、隣接する信号線（バス線）から信号が漏洩するクロストーク、信号のアイパターンの劣化などにより、高速デジタルシステムの動作マージンを十分に確保できない可能性があります。そこで、高速デジタル回路の設計の際には、回路の損失特性に加えてインピーダンスやSパラメータなどの周波数特性も検証し、デジタル信号の品質劣化を防ぐ必要があります。これらの特性の評価には、ベクトルネットワークアナライザ（VNA）が最適です。

PCI Express®, PCIe®は、PCI-SIGの登録商標です。



デジタル信号に含まれる周波数成分

デジタル信号は一般に、方形波（矩形波）で表されます。理想的な方形波は、図1に示すように、基本波に加えて、3倍高調波、5倍高調波と無限に続く周波数成分を重ね合わせることで表現します。これらの高調波は、方形波の急激な変化に対応するために必要な成分です。このため、**デジタル信号の周波数特性を評価する際には、基本波の周波数だけでなく、さらに高い周波数をもつ高調波も考慮する必要があります。**

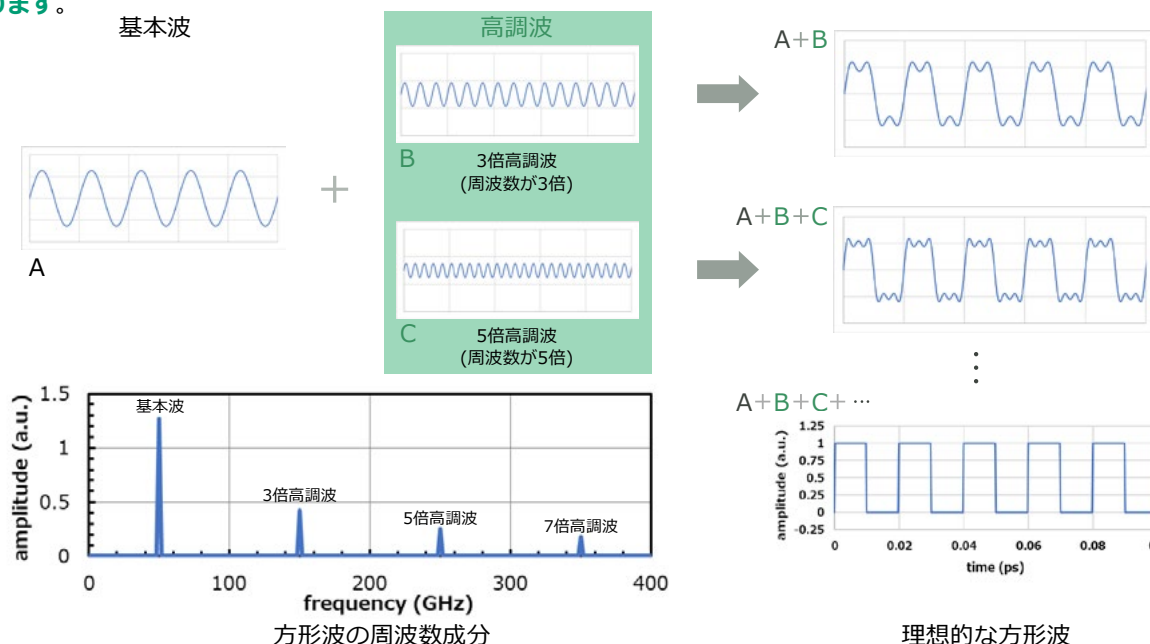


図1 デジタル信号に含まれる周波数成分

適切な測定周波数帯域幅の選び方

デジタル信号（方形波）の周波数成分である高調波は無限に続くため、無限の周波数範囲にわたって評価を行うことは現実的ではありません。また、有限の周波数範囲で評価するにしても、高速デジタル信号における7倍高調波や9倍高調波まで対応可能なVNAは限られています。したがって、現実的なデジタル信号の評価では、基本波から3倍～5倍程度までの高調波をカバーすることが一般的です。

変調方式NRZ（Non-Return-to-Zero）とPAM4（Pulse Amplitude Modulation 4-level）を例に、適切な測定帯域幅について取り上げます。表1で、測定帯域幅の決定に関する用語を紹介します。

表1 用語

用語	説明	単位
データレート/ビットレート	1秒の間に伝送されるビットの数を表します。	bps、b/s
シンボルレート/ボーレート	1秒の間に、たとえば0から1に、もしくは1から0に状態が変化する数を表します。	baud
ナイキスト周波数	シンボルレートの半分の値となります。これは、図1の基本波の周波数に相当します。	Hz

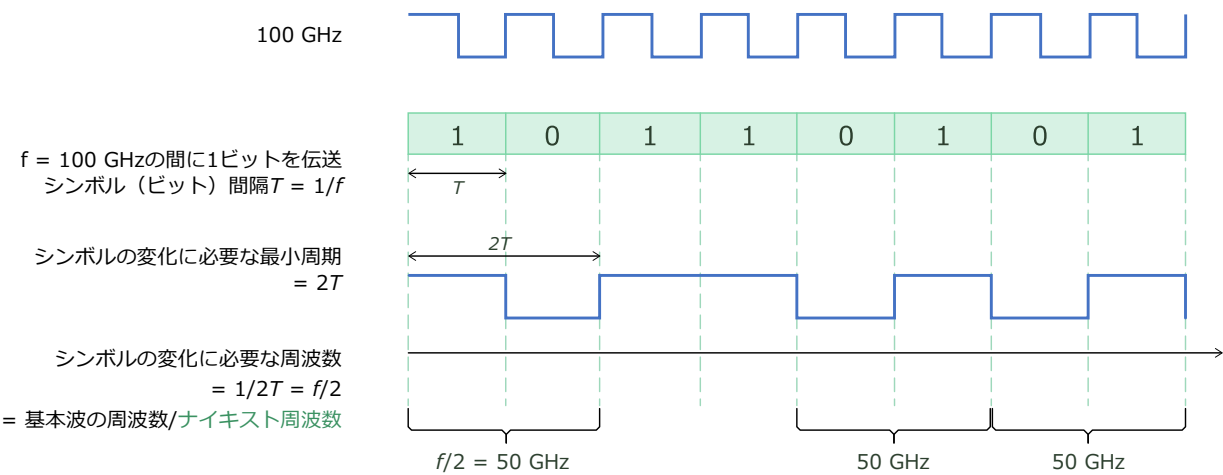


図2 シンボルレートとナイキスト周波数の関係（NRZ、100 Gbps/100 Gbaudの例）

デジタル信号のシンボルレートの半分がナイキスト周波数であることを説明します。図2で取り上げるNRZは、1または0の値を一定時間（ T ）保持する信号です。1シンボルが1ビットを表します。これにより、データレートとシンボルレートは同じ値になります。シンボルレートが 100 Gbaudの例では、周波数 $f = 100\text{ GHz}$ でシンボルが送信されます。ここでシンボルが送信される時間間隔 T は f の逆数 $T = 1/f$ です。シンボルが変化するには2シンボル分の時間が必要なため、その最小周期は $2T$ になります。この周期の逆数はシンボル変化に必要な周波数であり、 $1/2T = 50\text{ GHz}$ になります。この周波数50 GHzがNRZに含まれる最小の周波数成分であり、基本波の周波数もしくはナイキスト周波数です。つまり、シンボルレートの半分は、ナイキスト周波数になります。なお、ナイキスト周波数は、サンプリング定理において、元の信号を正確に復元可能な最大の周波数として定義されます。

表2 NRZとPAM4の比較

変調方式	NRZ	PAM4
信号波形		
データレート	100 Gbps	200 Gbps
シンボルレート	100 Gbaud	100 Gbaud
ナイキスト周波数	50 GHz	50 GHz

PAM4信号の場合、1シンボルあたり2ビットを表します。PAM4は、振幅レベルを0から2に、あるいは3から1など、4つの状態に変化して信号を伝送するため、同じ帯域幅内で伝送できるデータレートがNRZに比べて倍増します。このことからPAM4では、データレートの半分がシンボルレートになります。たとえば、PAM4のデータレートが200 Gbpsの場合、シンボルレートは100 Gbaudとなります。ナイキスト周波数は、前述したようにシンボルレートの半分であり、50 GHzです。

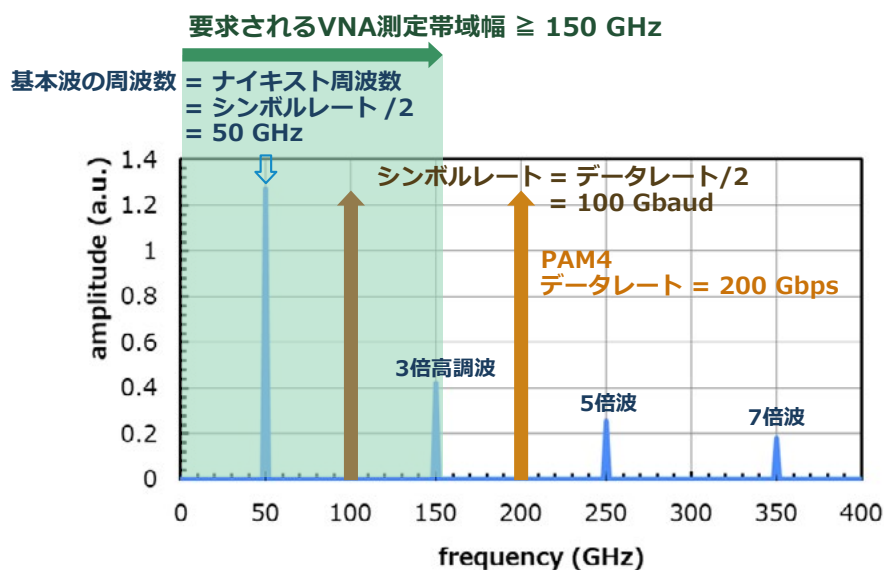


図3 3倍高調波までを含むVNA測定帯域幅 (PAM4、200 Gbps)

以上より、データレート100 GbpsのNRZや200 GbpsのPAM4の周波数特性を3倍高調波まで含めて評価するためには、ナイキスト周波数（基本波の周波数）の3倍、つまり、測定帯域幅150 GHz以上のベクトルネットワークアナライザが必要です。

このように、高速デジタル回路の周波数特性を評価する際には、信号のナイキスト周波数を基準にVNAの測定周波数帯域幅を適切に選択することが求められます。

広帯域特性の評価

超高速デジタルデバイスの研究開発では、100 GHzを超える周波数帯域の特性評価が求められます。しかし、従来の導波管ベースのミリ波エクステンション・モジュールを用いたVNAシステムでは、物理的なモジュールの交換やこれに伴う再校正作業、さらにバンド間でデータの不連続性（段差）が生じる課題がありました。

この課題に対して、アンリツのVNA VectorStar ME7838シリーズとMPI Corporationの技術を組み合わせたソリューションは、70 kHzから220 GHzにわたる広帯域を一括掃引できます。この組み合わせにより再校正作業などの煩雑な作業を解消し、連続性が保たれた正確なデバイスのSパラメータの評価が可能になります。アンリツとMPI Corporationの試験ソリューションは、研究開発のサイクル時間を大幅に短縮します。

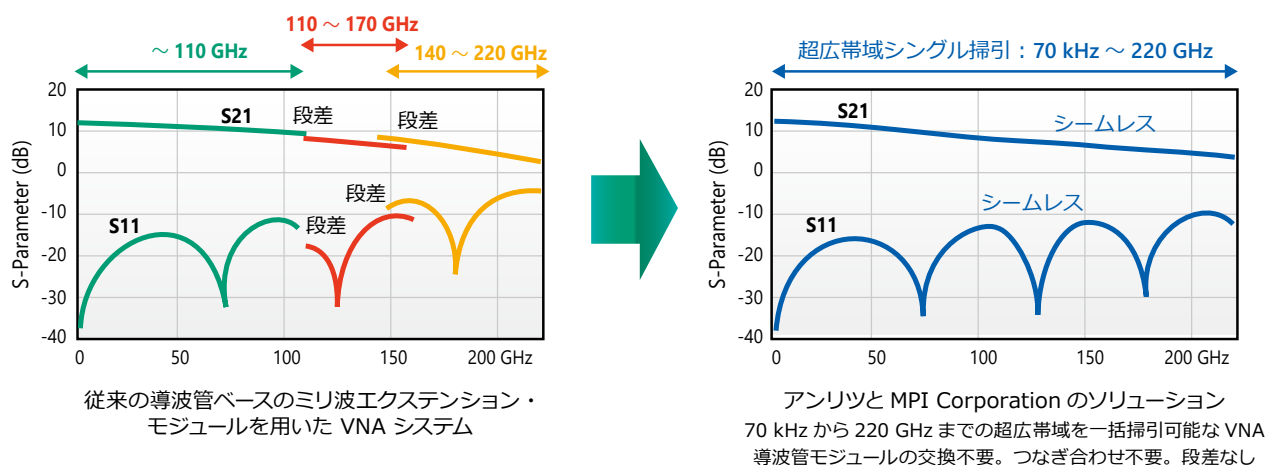


図4 広帯域の周波数特性の評価

超広帯域の周波数特性ソリューション

アンリツの広帯域VNA VectorStar ME7838シリーズは、70 kHzから220 GHzまでの周波数範囲をカバーします。220 GHzミリ波モジュール MA25400AとMPI社プローブチップを接続することで、広帯域の周波数特性を1回の掃引で評価できます。さらに、最大でミリ波帯1.1 THzの測定にも拡張可能です。



VectorStar ME7838シリーズ



ME7838シリーズの詳細はこちら



220 GHzミリ波モジュール MA25400AとMPI社プローブチップ



本ソリューションのVideoとWebinarの詳細はこちら（英語サイト）