

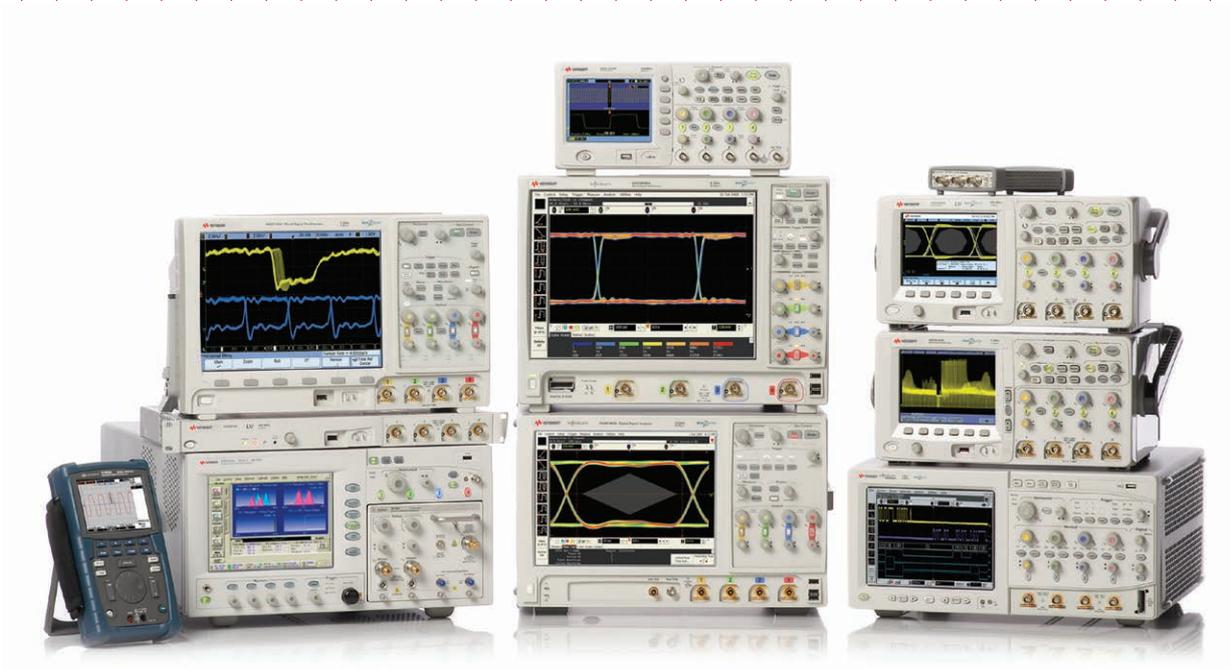
Keysight Technologies

第5高調波の捕捉：

サンプリング・オシロスコープと

リアルタイム・オシロスコープの比較

Application Note



## はじめに

アプリケーションに適したオシロスコープの選択は、重要な問題です。予算が厳しい場合は、必要な機能を適切に購入することがさらに重要になります。オシロスコープには主に、リアルタイム・オシロスコープと等価時間オシロスコープの2種類があります。オシロスコープの種類ごとに、検討が必要なさまざまな仕様が存在します。最も重要な仕様の1つが帯域幅です。オシロスコープにナイキスト基準を満たす十分な帯域幅がないと、信号に大きなエイリアジングが生じます。

どれだけのオシロスコープ帯域幅が必要になるかを予測する簡単な方法はありません。オシロスコープ・メーカーでは、「第5高調波」の経験則を勧めています。メーカーは、信号の第5高調波を捕捉できる十分な帯域幅を備えたオシロスコープの購入を提案しています。しかし、オシロスコープが、理論的には第5高調波を捕捉できる十分な帯域幅を備えていたとしても、第5高調波成分をまったく捕捉できない可能性もあります。「第5高調波」の経験則に基づいて、購入した高価なオシロスコープが第3高調波までしか捕捉できないことも考えられ、このような経験則で高価なオシロスコープを購入することは、賢明ではありません。同じ高調波成分を捕捉できる低帯域幅のオシロスコープを、より低価格で購入できるからです。本当に必要な帯域幅と必須の機能を正確に知る必要があるのは、このためです。

高価な広帯域オシロスコープは、必要以上に帯域幅が広いオシロスコープを購入することになるというマイナス面だけでなく、オシロスコープの帯域幅が広くなると、発生するノイズも大きくなり、大きな歪みの原因となります。ノイズの増加は、振幅測定、タイミング測定の確度に影響を与え、第5高調波の測定が可能な帯域幅を得るという当初の目的を達成できない場合もあります。最良の測定結果を得るには、過不足のない帯域幅のオシロスコープを使用して信号を正確に測定し、同時にオシロスコープから生じる余分なノイズを最小限に抑えることです。

最終的に、リアルタイム・オシロスコープ、等価時間オシロスコープなど、さまざまな種類のオシロスコープの長所と短所を理解することが重要です。これらの仕様（ノイズ・フロア、ダイナミック・レンジ、帯域幅など）すべてと仕様測定に与える影響を理解すると、ニーズに合った適切なオシロスコープを選択することができます。

## ノイズ・フロアが問題となる理由

データ・レートが高速化し続けているため、最新のテクノロジーでも、わずか数年で時代遅れになる可能性があります。現在、5 Gbpsのシリアル・データ・レートが一般的になりつつあります。このような新しいデータ・レートの結果として、2 V信号でのビット0から1への遷移時間がなくなっています。信号レートが高速になると、信号が通過するチャンネルにより、レシーバで信号が歪みます。この結果、アイ・ダイアグラムが部分的に、または完全に閉じる可能性があります。多くのシリアル・テクノロジーのp-p電圧は800 mV以下です。すべてのオシロスコープに、固有のノイズ・フロアがあり、これはV/divが大きくなると増加します。800 mV p-pの信号を調べる場合、信号全体を表示させて、オシロスコープが飽和するのを防ぐには、100 mV/div以上のV/div設定が必要です。

オシロスコープの固有ノイズが100 mV/divで50 mVの場合は、信号の8 %がオシロスコープのノイズになる可能性があります。ノイズ・フロアが100 mVの場合はさらに悪く、信号の13 %がオシロスコープのノイズになります。信号のアイが小さくなると仮定すると、13 %の追加ノイズにより、開いたアイが閉じているように見える可能性があります。同じ100 mVのノイズは、 $-23.3$  dBmまたは $-36.4$  dBVに変換されます。大きなノイズ・フロアにより、製品のデザインに必要な以上の余裕をみなければならなくなる可能性があります。通常、等価時間オシロスコープの方が、リアルタイム・オシロスコープよりノイズ・フロアが小さくなります。しかし適切に調査すると、上記で説明した信号の5 %未満のノイズ・フロアを持つリアルタイム・オシロスコープを見つけることができます。Keysight Infiniium 90000Aシリーズ・リアルタイム・オシロスコープは、この基準を満たし、業界で最も小さなノイズ・フロアを実現します。例えば、12 GHzモデルは、5 mV/divで $435 \mu\text{Vrms}$ の低ノイズ・フロアを実現しています。

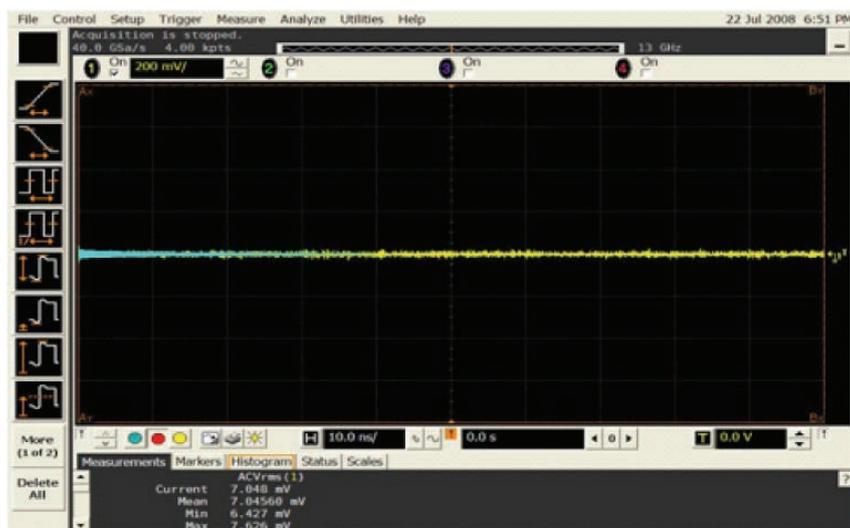


図1：200 mV/divでのノイズ・フロアの測定

## 周波数成分の捕捉

フーリエ変換の理論から、複雑な信号はすべて、異なる周波数と位相の正弦波を加算することにより構築できます。周波数対振幅をプロットすることにより、これらの周波数を周波数ドメインで表示できます。捕捉された正弦波の数は、信号の周波数成分と呼ばれます。図2に、100 MHz方形波の周波数成分を示します。複数のスプリアス(高調波)があり、それぞれが明確に定義されています。各高調波は、異なるパワー・レベルを持っています。第1高調波が最大で、後続の高調波は徐々に小さくなります)。これらの高調波を再び加算することにより、元の方角波を再構築できます。すなわち、オシロスコープが捕捉できる高調波(高調波成分)が多いほど、タイム・ドメインで再構築されたときにより正確に信号を表示できます。

高調波は、ビット・レートの0.5倍の間隔で発生します。例えば、4 Gbps信号には、無限大に向かって2、4、6、8、10 GHzに大きな高調波があります。完全な方形波と、無限大のダイナミック・レンジを備えたノイズ・フロアのないオシロスコープがあると仮定すると、測定器が第5高調波を捕捉するためには、10 GHz以上の帯域幅が必要です。ただし現実には(特に現在の高速デジタル信号では)、完全な方形波は存在しません。多くの要因により、高調波が弱まり、高調波成分が広がります。最も重要な要因は、信号の立ち上がり時間です。

理想的な方形波の立ち上がり時間は、0 psです。これは、実環境のアプリケーションではこのようなことはありません。最高のデザインでも、レシーバでの立ち上がり時間が30 ps以下になることはほとんどありません。立ち上がり時間が遅くなる要因として、PCB材料、コネクタ、トレース、距離があります。FR-4は、PCBで最も一般的に使用される材料の1つです。FR-4は、低価格であるためよく使用されます。FR-4の絶対最大立ち上がり時間は、45 psです。しかし、通常表示される最大立ち上がり時間は、50 ~ 60 ps(80/20%)です。

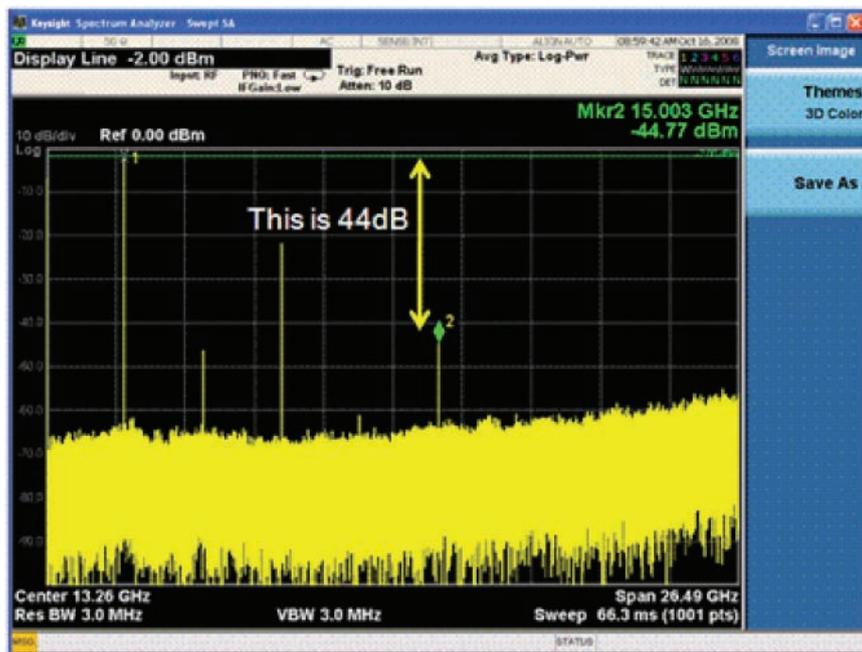


図2：SATA 6Gのスペクトラム解析

図2に示された、SATA 6G HFTP信号のスペクトラム解析について考えましょう。立ち上がり時間は45 ps、ビット・レートは6 Gbpsです(15 GHzに第5高調波)。ただし、第5高調波のパワーは、第1高調波より45 dBm小さくなります。オシロスコープがこの成分をタイム・ドメインで表示するには、ノイズ・フロアが-58 dBV未満となる必要があります。前述の例から、100 mVのp-pノイズは-32 dBVと等価で、-58 dBVの信号は、オシロスコープのノイズ・フロアに隠れて見えません。第5高調波がリアルタイム・オシロスコープの測定に大きな影響を与える場合(搬送波周波数より約35 dBm下)は、立ち上がり時間は、30 psより高速でなければなりません。これほど高速な立ち上がり時間は、実際の信号では頻繁に発生しません。一方、等価時間オシロスコープは、ノイズ・フロアがより小さいので、SATA 6G信号の第5高調波全体を捕捉することができます。第3高調波まで捕捉できるリアルタイム・オシロスコープを使用するか、帯域幅と等価の高調波成分を捕捉できる等価時間オシロスコープを使用するかを判断する必要があります。

もう一つの例：PCI Express® Gen II信号は、5 Gbpsのデータ・レートを持っています。このデータ・レートで第5高調波を捕捉するには、帯域幅12.5 GHz以上のオシロスコープが必要です。しかし通常、信号は、レシーバで50 ~ 70 psの範囲の立ち上がり時間を持っています。この結果、第5高調波は、ゼロ交差から-48 dBm下になります。すなわち、12.5 GHzのリアルタイム・オシロスコープ(35 ~ 45 dBVのダイナミック・レンジ)は、第5高調波成分を捕捉できません。8 GHzおよび12.5 GHzのリアルタイム・オシロスコープは、帯域幅は異なりますが、PCI Express Gen II信号の同じ高調波成分を捕捉できます。この信号の第5高調波成分を捕捉するには、ノイズ・フロアの小さい等価時間オシロスコープを使用する必要があります。これは、図3と4に示す2個のリアルタイム・アイから明らかです。帯域幅が異なるにもかかわらず、リアルタイム・アイは、60 psの立ち上がり時間で同じに見えます。

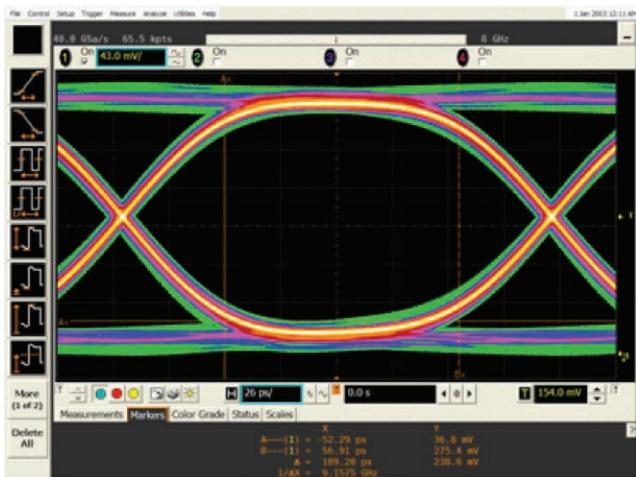


図3：8 GHzで捕捉されたPCI Express® Gen II信号、立ち上がり時間は60 ps

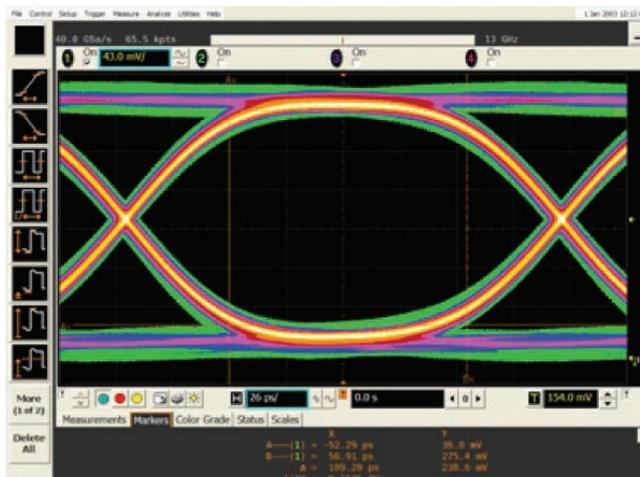


図4：60 psの立ち上がり時間を持つ、13 GHzで捕捉されたPCIe™ Gen II信号

## 必要な帯域幅を計算するための別の方法

必要な周波数成分を捕捉するための帯域幅を決定するもう一つの方法は、全信号パワーを一定の割合(99.9%)に達するまでスペクトル成分を積分する方法です。この方法では、振幅が大きく、信号に重大な影響を与えるスペクトル成分を確実に含めることができます。

図5と6で、クロック信号と $2^7-1$  PRBSパターンの信号パワーの99.9%を含む帯域幅(GHz単位)を比べます。シミュレート・データもライブ信号の測定値も、ビット・レートとエッジ速度のさまざまな組み合わせに対して比べることができます。シミュレーションでのエッジ速度は、リニア位相の正弦波フィルタの和を使用して作成しました。ライブ信号は、Keysight N4903A J-BERTで出力し、Picosecond Pulse Labs社の遷移時間コンバータに接続して、26.5 GHz E4440A高性能スペクトラム・アナライザで測定しました。

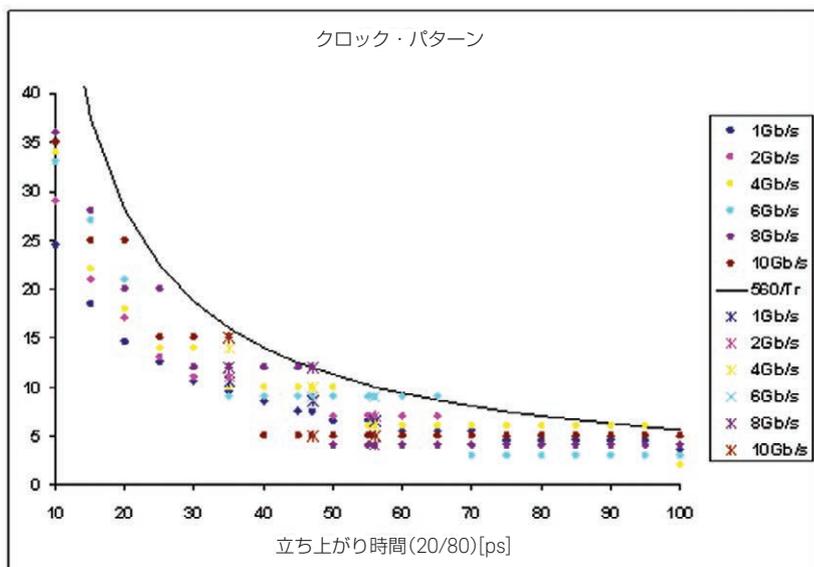


図5：クロック信号(0.56/エッジ速度)の信号パワーの99.9%を含めるのに必要な帯域幅(GHz単位)

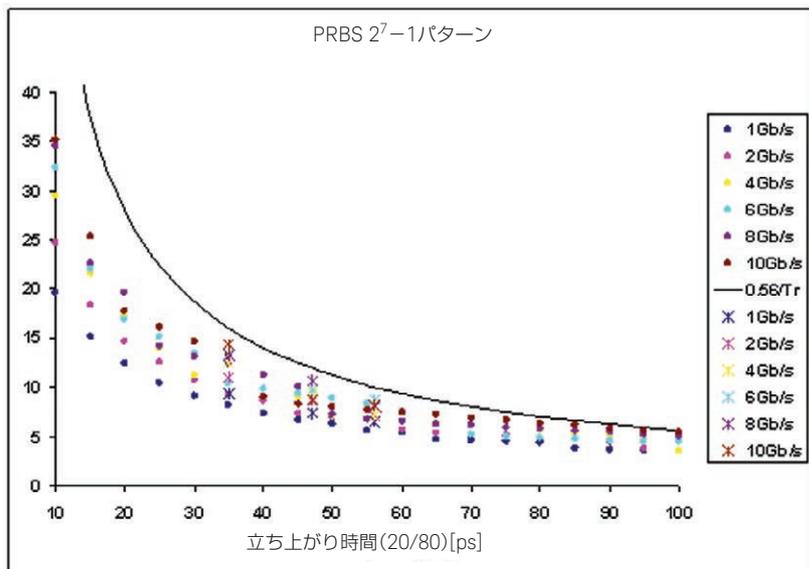


図6： $2^7-1$  PRBSパターンの信号パワーの99.9%を含めるのに必要な帯域幅(GHz単位)

これらの結果から、立ち上がり時間は明らかに、信号に必要な帯域幅を決定するための支配的な要因です。ビット・レートが低くても、立ち上がり時間が早い場合には、より高い帯域幅が必要となります。データを詳細に解析すると、多くの場合、クロック信号が最も広い帯域幅が必要なことがわかります。このことは、クロックはデータ・パターンよりも頻繁に状態が変化する(すなわち、高周波のエネルギーがより多く含まれている)ことを考えると、直観的に理解できます。

使用するオシロスコープを決定する前に、広帯域スペクトラム・アナライザで各信号を測定することは現実的ではありません。与えられたデータ・パターンに必要な帯域幅を正確に予測する簡単な方法はありませんが、信号のパワーの99.9%を捕捉するために必要な帯域幅がおおよそ $0.56/\text{立ち上がり時間}$ (20 ~ 80%)であるという従来からの近似方法で目安をつけることができます。

## リアルタイム・オシロスコープと等価時間オシロスコープとの比較

6 Gbps以上の信号においても、第3高調波の捕捉で十分な高調波成分が表示される場合は、リアルタイム・オシロスコープを使用できます。最も重要な違いは、リアルタイム・オシロスコープは、等価時間オシロスコープよりもはるかに高いサンプリング・レートとメモリ長が得られることです。リアルタイム・オシロスコープは、トリガ機能も内蔵しているため、外部トリガを使用する必要がありません。等価時間オシロスコープには外部トリガが必要で、データを表示するために複数回のデータ収集が必要です。

また、リアルタイム・オシロスコープのコンプライアンス・ソフトウェアの方がより自動化されていて、高速に処理でき、測定に便利な機能も数多くあります。キーサイトでは、PCI Express Gen II用に、リアルタイム・オシロスコープで多くの仕様を測定するための自動化ソフトウェアをオプションで提供しています。PCI Expressソフトウェアを使用すると、日々のデバッグに使用するオシロスコープと同じものを使用して、PCI-SIG<sup>®</sup>仕様に基づいて自動テストとマージン解析が行えます。Keysight N5393B PCI Express電気テスト・ソフトウェアは、オシロスコープを各テスト用に自動的に設定し、デバイスが各テストにどれだけのマージンで合格／不合格になったかを示すマージン解析を含む、柔軟なレポート形式で結果を表示します。

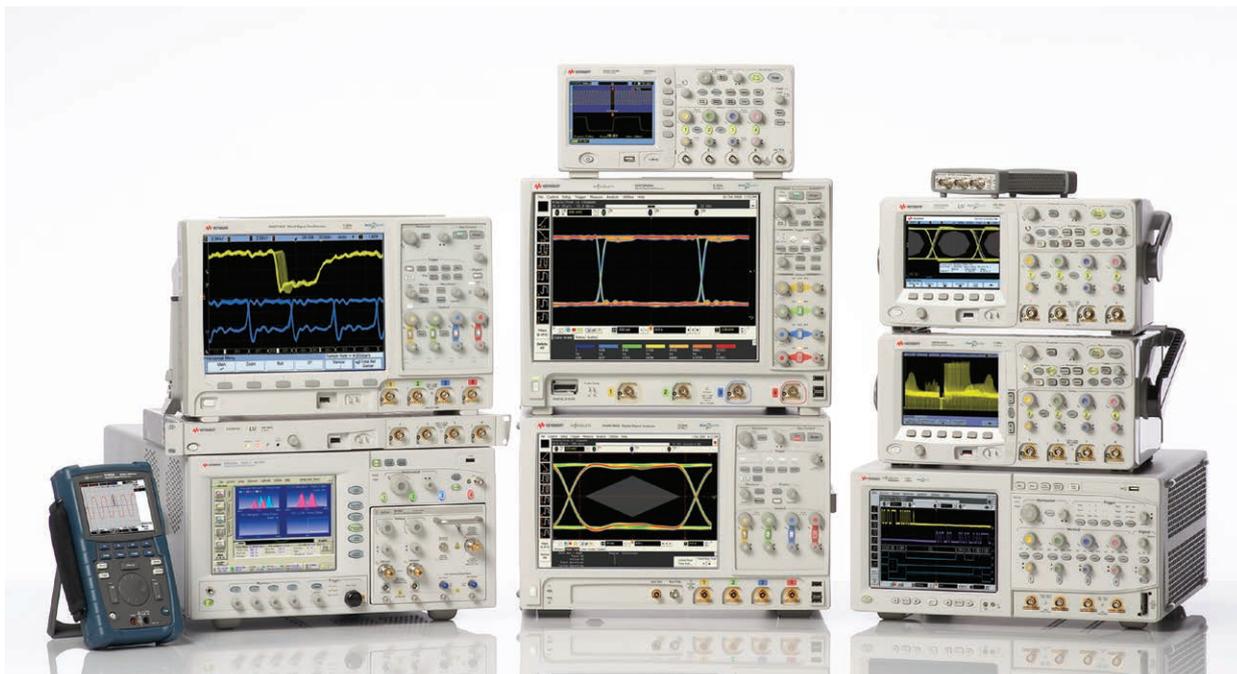
一方、等価時間オシロスコープでは、より広い帯域幅とより小さなノイズが得られます。また、等価時間オシロスコープには通常、TDR測定が可能なモジュールが付属しています。

## まとめ

アプリケーションに適したツールを選択することは非常に重要です。不要な機能やあまり利点のない機能に予算を使用することは賢明な選択とは言えません。多くのエンジニアが、どれだけの帯域幅を購入するかを指標として第5高調波を使用しています。しかし、30 psより遅い立ち上がり時間の場合は、リアルタイム・オシロスコープでは、ノイズ・フロアが大きくなるために第3高調波より高い高調波成分を捕捉できない可能性があります。実際、高データ・レート(6 Gbps以上)のレシーバ側では、ほとんどの場合、リアルタイム・オシロスコープは、帯域幅に関係なく第5高調波をまったく捕捉できません。これは、第5高調波の成分が、リアルタイム・オシロスコープのノイズ・フロアよりも小さいからです。第5高調波を実際に測定対象とするには、等価時間オシロスコープが必要です。等価時間オシロスコープは、ノイズ・フロアが小さく、多くの場合第5高調波を捕捉できます。リアルタイム・オシロスコープは、大容量メモリ、高速サンプリング・レートなどの機能を提供します。このため、第3高調波までの捕捉にとどめ、リアルタイム・オシロスコープの機能を活用するか、等価時間オシロスコープを使って第5高調波を捕捉するかを判断する必要があります。注意すべき点として、立ち上がり時間が30 ps以下であれば、リアルタイム・オシロスコープでも第5高調波成分が表示されるようになることです。これは、将来、リアルタイム・オシロスコープも第5高調波を捕捉できる可能性があることを示しています。

## 関連カタログ

タイトル	カタログ番号
Infiniium DSO/DSA9000A シリーズ Data Sheet	5989-7819JAJP
86100C 広帯域オシロスコープ Data Sheet	5989-0278JA
N5393A PCI Express電气的特性検証／コンプライアンス・ソフトウェア Data Sheet	5989-1240JA



## Keysight Technologies のオシロスコープ

20 MHz ~ 90 GHz 以上でさまざまなサイズ、業界最高レベルの仕様と、幅広いアプリケーション

## myKeysight



[www.keysight.co.jp/find/mykeysight](http://www.keysight.co.jp/find/mykeysight)

ご使用製品の管理に必要な情報を即座に手に入れることができます。



[www.axistandard.org](http://www.axistandard.org)

AXIe (AdvancedTCA<sup>®</sup> Extensions for Instrumentation and Test)は、AdvancedTCA<sup>®</sup>を汎用テストおよび半導体テスト向けに拡張したオープン規格です。Keysightは、AXIeコンソーシアムの設立メンバです。



[www.lxistandard.org](http://www.lxistandard.org)

LXIは、Webへのアクセスを可能にするイーサネット・ベースのテスト・システム用インタフェースです。Keysightは、LXIコンソーシアムの設立メンバです。



[www.pxisa.org](http://www.pxisa.org)

PXI (PCI eXtensions for Instrumentation) モジュラ測定システムは、PCベースの堅牢な高性能測定／自動化システムを実現します。



[www.keysight.com/quality](http://www.keysight.com/quality)

Keysight Electronic Measurement Group  
DEKRA Certified ISO 9001:2008  
Quality Management System

## 契約販売店

[www.keysight.co.jp/find/channelpartners](http://www.keysight.co.jp/find/channelpartners)

キーサイト契約販売店からもご購入頂けます。  
お気軽にお問い合わせください。

PCIe is a trademark and PCI Express is a registered trademark of PCI-SIG.

## キーサイト・テクノロジー合同会社

本社〒192-8550 東京都八王子市高倉町9-1

## 計測お客様窓口

受付時間 9:00-18:00 (土・日・祭日を除く)

TEL ■■■ 0120-421-345

(042-656-7832)

FAX ■■■ 0120-421-678

(042-656-7840)

Email contact [japan@keysight.com](mailto:japan@keysight.com)

電子計測ホームページ

[www.keysight.co.jp](http://www.keysight.co.jp)

●記載事項は変更になる場合があります。  
ご発注の際はご確認ください。