

高分解能オシロスコープの真実

WHITE PAPER

Nov 7, 2019

概要

市場に広まる高分解能を謳うオシロスコープの性能を比較してみると、カタログの仕様だけでは分からない事実が浮かび上がりますが、ここではその背景などを解説します。



近年の処理速度の向上と省電力化が求められる IoT の進展により、信号の高速化、小信号化が進んでいます。こうした回路の評価/解析には高速信号に応じた広い帯域と、小振幅信号を詳細に観測できる高分解能のオシロスコープが要望されています。2011 年、こうした要望に応えテレデザイン・レクロイが 600MHz の広帯域で 12 ビットの高分解能を提供する高分解能オシロスコープを市場に先駆けて発表をしました。2013 年から他社からも広帯域、高分解能を謳うオシロスコープが発表され、現在、全て合わせると 10 以上のシリーズの高分解能オシロスコープが存在します。しかしながら、その全てが同じような性能を持つわけではありません。

【バナースペック】

カタログに周波数帯域 4GHz、最高サンプリング速度 40GS/s、垂直分解能 12 ビットと記載されている場合、12 ビットの高分解能の性能が 4GHz の帯域でも得られると期待するのですが、果たして期待通りの性能が得られるのでしょうか。いくつかの機器では、残念ながらカタログ上のバナースペックは同時には実現できません。もちろん、それぞれの仕様は特定の設定条件下で実現するのですが、分解能と周波数帯域の間にトレードオフの関係があり、どちらかを犠牲にしなければもう片方の仕様は満足できない設計になっています。

その点、テレデザイン・レクロイのアーキテクチャは、周波数帯域やサンプリング速度に関係なく、常に 12 ビットの分解能を実現しています。実際、WavePro 804HD においては 8GHz のシリーズ最高周波数帯域でも 12 ビットの分解能を提供します。図 1 を見てみると、B 社の製品はデータシート上に 4GHz、12 ビットと記載されていても、12 ビットを実現するには、周波数帯域を 500MHz まで落とさなければなりません。テレデザイン・レクロイのオシロスコープは、周波数帯域に関わらず、常に 12 ビットを実現します。

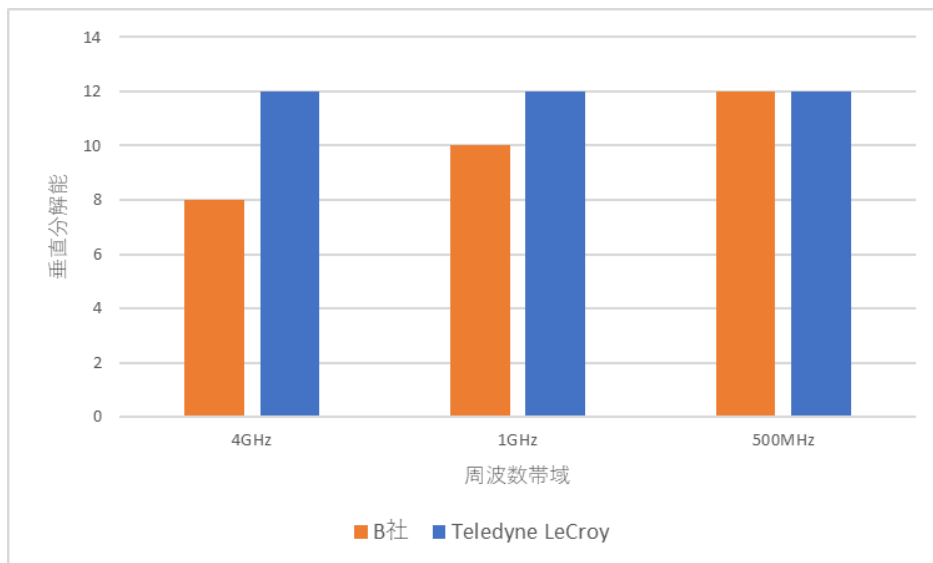


図 1: 垂直分解能と周波数帯域

【移動平均】

詳細は異なるものの移動平均と同種の演算をすることで垂直分解能を向上させるという手法を用いている機器があります。図 2 には 4 点を使った移動平均を示しています。点線で囲まれた 4 点のサンプル点(0,0,0,1)の平均として 0.25 の点が生成されます。つまり、刻みが 1/4 に細くなり、分解能が 2 ビット向上したのと同じになります。この手法は、一般的なアレージのように複数回の捕捉を必要とせず、単発の捕捉で行えるという利点がありますが、平均化によって信号の急峻な変化がやわらげられ、周波数帯域が下がってしまうという欠点もあります。

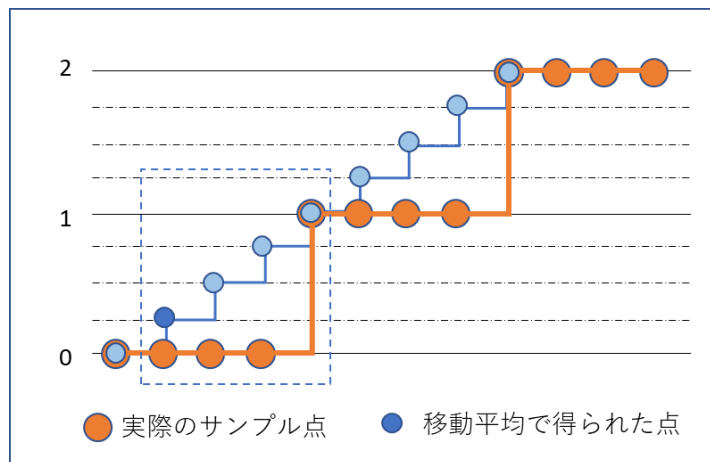


図 2: 4 点の移動平均による分解能の向上

ただし、処理によって下がった周波数帯域は、元のサンプリング速度に比例するので十分なオーバーサンプリングができていれば、アナログ周波数帯域を損なうことなく垂直分解能を向上させることができます。実際の信号は例のように理想的なものではなくノイズを含んだものなのでそうした場合に実際のパフォーマンスはどれだけ向上するのでしょうか。もしも、ノイズが完全にランダムであるとするならば、周波数帯域を 1/4 にするとノイズのパワーは 1/4 となり、振幅は 1/2 となります。SN 比が倍になることを意味しますので、有効ビット数が 1 ビット向上することに相当します。

例としてテレダイン・レクロイの ERES という手法では、40GS/s のサンプリング速度で波形を捕捉し、1 ビットの分解能向上をするときには、周波数帯域が 4.82GHz(40GHz のナイキスト周波数 20GHz の約 1/4)になるのは、先述した理屈にほぼ合っていることが分かります。一方、隣接した 2 つのサンプル点の平均を求めるとい手法では、表示上の分解能は倍になります。つまり 1 ビット分解能が上がるということです。

図 3 には、2 点の平均と 4 点の平均で得られる周波数特性とノイズの低減度合を見ています。2 点アベレージでは、3dB カットオフがナイキスト周波数 20GHz の半分 10GHz、4 点アベレージでは、4.4GHz になっています。有効ビット数が 1 ビット向上するためには、SN 比が 4 倍、つまりノイズが 1/4 にならなければなりません。2 ビット向上するには、1/16 にならなければいけないのですが、周波数特性を見る限り達成できないようです。実際に、ランダム・ノイズを発生させて 2 点アベレージおよび 4 点アベレージによるノイズ低減の効果も見ています。元のノイズ・レベル 22.7mV に対して、2 点アベレージの結果は 16.0mV、4 点アベレージの結果は 11.4mV と低減はしていますが、期待された値とは異なります。

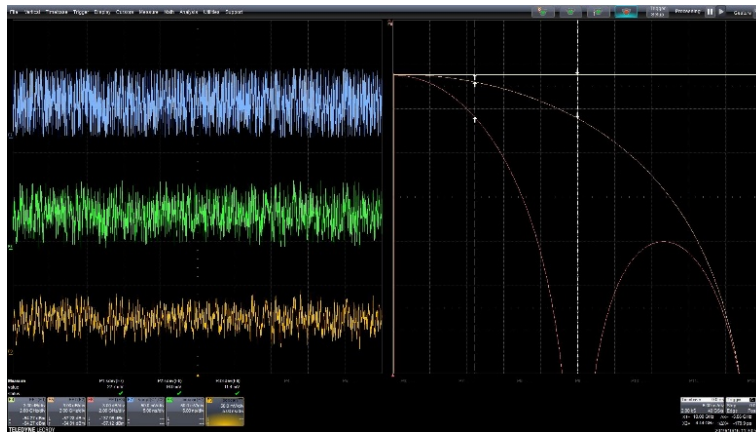


図 3: 移動平均の効果

【分解能と精度】

分解能が高い機器は、測定精度も良好であると期待しますが、分解能という仕様は、どれほど細かい刻みで電圧レベルを観測できるかという指標で、極端な話、高分解能の AD 変換器を用いれば簡単に高分解能は実現できます。しかしながら、入力アンプや他の部品が変わらないのであれば、ノイズ・レベルも測定精度も向上することはありません。従って、極端な話、分解能は高いが精度は悪いという機器があっても不思議ではありません。もちろん、市場には受け入れられないでしょうが。

では、実際の性能を確認するにはどうすればよいのでしょうか。ノイズ・レベルや有効ビット数なども実際の性能を表す指標になります。つまり、入力アンプのノイズ特性や、デジタル機器では避けられないデジタル・ノイズの混入を低減させる回路や実装などにより用いる AD 変換器の分解能に見合った性能にする必要があるということです。テレダイン・レクロイの WaveRunner 8208HD では、2GHz において 50mV/div の電圧レンジではノイズ・レベルが 0.33mV、有効ビット数が 8.4 ビットを示します。こうした高性能により垂直軸のゲイン精度がフルスケールの 0.5% という高い精度を実現しています。

他社の機器では、2GHz において 12 ビットとの表示があるにもかかわらず、50mV/div の電圧レンジにおけるノイズ・レベルが 1.86mV あり、有効ビット数は 6.3 ビットと低く、垂直軸ゲイン精度は、フルスケールの 1%にとどまっています(図 4 参照)。

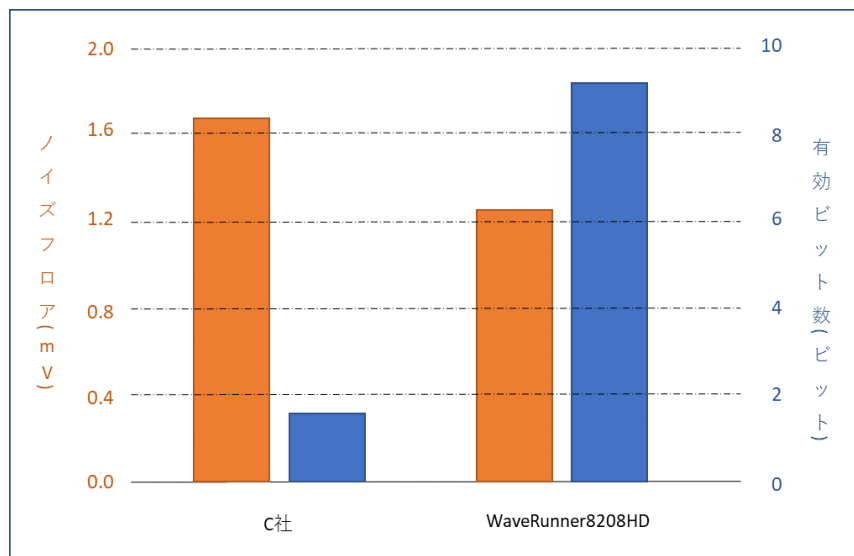


図 4: 同じ 2GHz、12 ビット機の性能比較

【多チャンネルの要望】

高分解能オシロスコープは、特にパワーエレ市場で好評を得ました。それは、パワーデバイスの測定において高い精度での計測を実現したからです。スイッチング動作をするパワーMOS や IGBT はデバイスの深化と共に、動作電圧が上がり、オン時の電圧が小さくなって 8 ビットの AD 変換器のダイナミックレンジでは捕らえ切れなくなっていたからです。

市場に登場した当時は、単相のデバイスの測定に用いられてきたものの、近年の三相インバータの測定需要から 6 チャンネル以上(三相の電圧と電流)の高分解能オシロスコープが求められるようになり、2014 年にテレデザイン・レクロイが 1GHz 帯域、12 ビット、8 チャンネルの製品を発表しました。この製品の登場により、三相モータ/インバータの測定/解析が新しいレベルに入っています。8 チャンネルの高分解能オシロスコープの有用性が認識されるに従い、より高いレベルの測定/解析のためにさらに多くのチャンネルが要望されるようになってきています。2019 年 10 月にテレデザイン・レクロイが発表した WaveRunner 8000HD シリーズは、単体では 2GHz、12 ビット、8 チャンネルのオシロスコープですが、2 台を同期運転することができ、トータルで 16 チャンネルで計測/解析することができます。

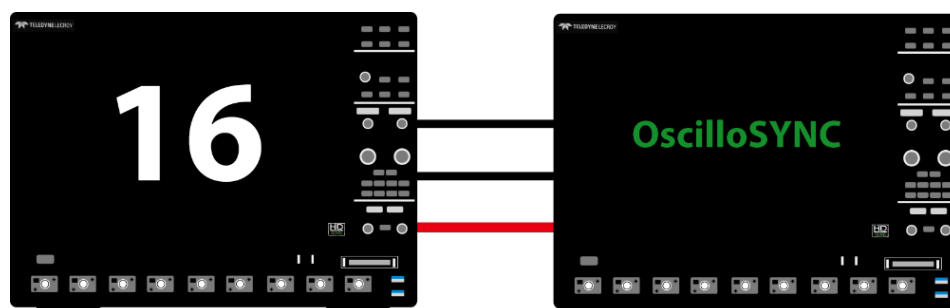


図 5: 2 台同期運転の接続図

【普及機】

前述したように、ハイエンドの 12 ビット高分解能オシロスコープの帯域は最大 8GHz、チャンネル数が最大 16 チャンネルまで対応するように進展しています。しかしながら、高分解能は魅力的で使ってみたいが高価で手が出ない。もっと手軽に利用したいといった声も近年大きくなってきています。これまでの高分解能オシロスコープを購入しようとする最低でもほぼ 100 万円が必要でした。もちろん、安価であっても名前だけの高分解能では意味がありません。2019 年 11 月にテレダイン・レクロイが発表した WaveSurfer4000HD シリーズは、100 万円を大幅に下回る価格で提供されますが、今まで蓄積してきた技術を反映して、低価格であっても、常時 12 ビットのコンセプトは維持しています。シリーズの最高帯域である 1GHz においても何も犠牲にすることなく 12 ビットの高分解能を実現しています。



図 6:WaveSurfer4104HD

【まとめ】

市場には、多数の高分解能オシロスコープが存在しますが、実用上のパフォーマンスは、データシート上のものと同じとは限りません。正しい選択をして製品開発に活用してください。WaveSurfer 4000HD シリーズは、最初の一步として手軽な選択となるでしょう。

【参考】

12 ビット・オシロスコープの比較をより詳しく解説した技術資料

- 高分解能オシロスコープの真実（日本語詳細版、全101ページ）
- Comparing High Resolution Oscilloscope Design Approaches（英文、全 78 ページ）

<https://teledynelecroy.com/japan/pdf/hd-dso/default.asp>