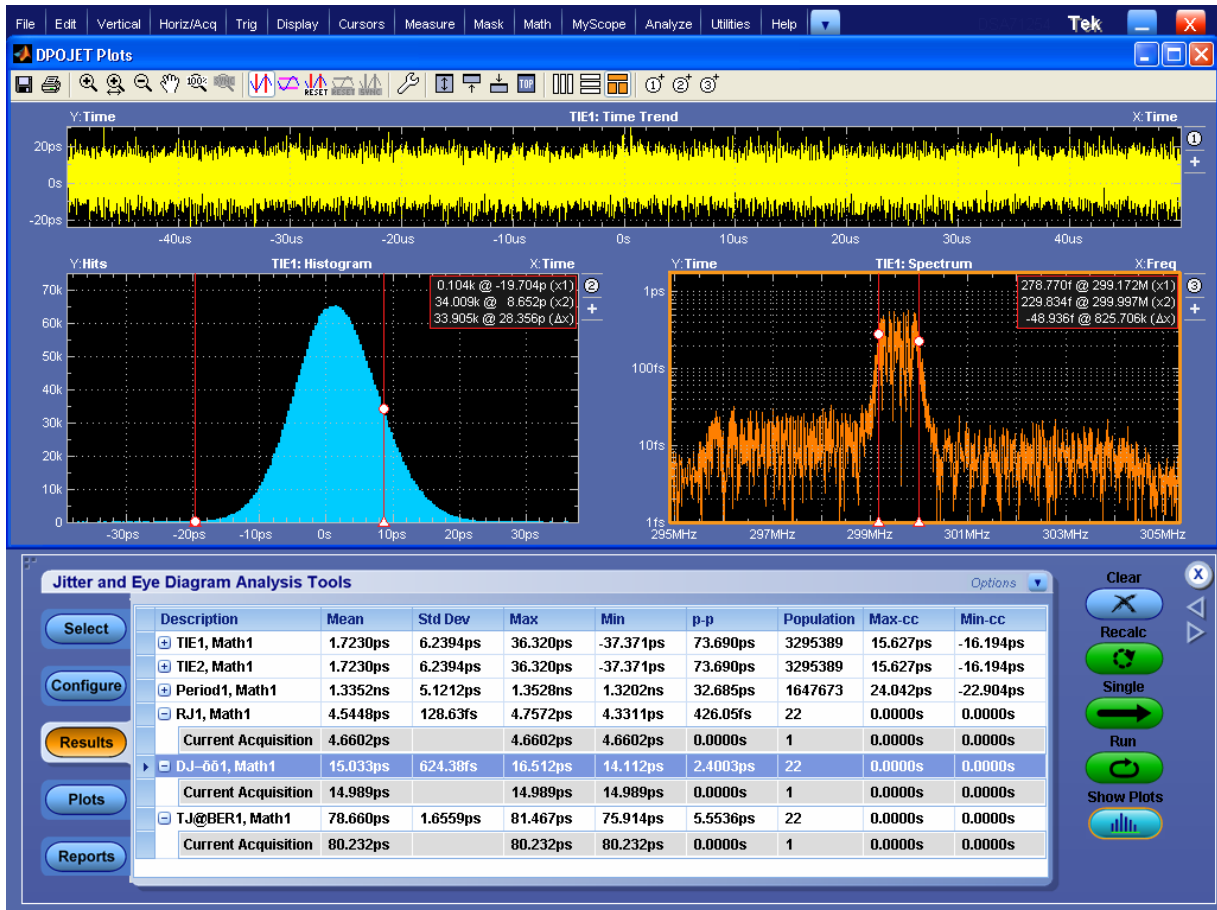


ジッタ解析:

▶ 確度 ▶ デルタ時間確度 ▶ 分解能 ▶ ジッタ・ノイズ・フロア



▶ 確度

パラメータ測定において、適切な許容誤差やテスト・マージンを確保するためには、既知の確度が必要になります。ジッタ測定も例外ではありません。当社は、ジッタ測定において確度を規定し、代表値を明示しています。確度とジッタ測定は、機器のタイミング安定度、サンプリング・ノイズ、機器の振幅ノイズ・フロア、信号の補間誤差など、いくつかの大きな要因によって影響を受けます。

補間誤差は、実際の電圧サンプル間における直線補間によって生ずる誤差です。この誤差は、100ps の立上り時間を、50%のスレッシュホールド、20GS/s でサンプリングした場合、0.3ps rms 未滿となります。この誤差は、 $\text{SIN}(X)/X$ 補間を使用し、振幅を入力フルスケールまで大きくすることで小さくすることができます。ほとんどの場合、この誤差は他の誤差に対して無視できますが、 $\text{SIN}(X)/X$ 補間や Sinc 補間などの非直線補間を使用することで軽減することができます。

タイミング誤差のもう一つの要因が、垂直ノイズまたは振幅ノイズです。計測器の振幅ノイズは、入力アッテネータ、プリアンプ、トラックアンドホールド・アンプ、A/D コンバータ回路などが持っている固有の振幅ノイズがその原因となります。このノイズは、アッテネータの設定、帯域制限、あるいは室温などによっても変化します。

サンプリング・システム内におけるタイミング要素の安定度が、タイミング測定に直接影響します。時間軸に誤差があると、その時間軸を基本とした測定も同様の、あるいはそれ以上の誤差になります。オシロスコープの時間軸安定度は、電圧サンプルが取込まれるゲートあるいはトリガとなる、リファレンス・クロック、周波数マルチプライヤ、カウンタ、および関連する回路によって影響を受けます。

さらに、A/D コンバータのアパーチャ誤差と量子化誤差も加わります。これらの誤差は、サンプル・データがどのように使われるかによって、振幅ノイズとタイミング・ノイズの両方に影響を及ぼします。どのようにアナログからデジタルに変換されるかによるため、実際の誤差要因を特定することは困難です。サンプリングは有限の時間でサンプルをゲートするため、任意のサンプルが取込まれる A/D コンバータのアパーチャ誤差には時間誤差と振幅誤差の両方が含まれます。A/D コンバータの分解能と関連する量子化誤差が組合せられ、サンプル時間と電圧には有限の誤差が生じます。

さらに、振幅ノイズはタイミング測定精度のもう 1 つの重要な要因となります。エッジが高速な場合、振幅はあまり影響を及ぼしませんが、エッジ・レートが遅くなると振幅ノイズは支配的な要因となります。これは、システム帯域に比べてエッジ・レートが遅くなると、振幅ノイズによってスレッシュホールドを交差するタイミングが変化し、タイミング測定誤差となるからです。

これらのノイズの原因となる要素に対してどのように対処し、より精度の高い測定結果を維持するためにはどのようにすればよいのでしょうか。当社では、時間測定の精度を規定するために、「デルタ時間精度」という用語を使用しています。デルタ時間精度は、上記に説明した精度を含む、タイミング精度に影響を及ぼす誤差を含むため、この仕様は非常に重要になります。

▶ デルタ時間精度

DPO72004 型では、デルタ時間精度 (DTA) の仕様は、以下のように近似されます。

$$DTA_{pk-pk} = 5 \times \sqrt{2 \times \left[\left[\frac{N}{A} \times t_{rm} \right]^2 + t_j^2 \right]} + TBA \times duration$$

- ここで、A = 入力信号振幅 (V)
- t_{rm} = 10~90%で測定される立上り時間 (s)
- N = 入力関連のノイズ (Vrms)
- t_j = ショート/ミディアム期間のアパーチャ誤差 (s rms)
- TBA = 時間軸精度 (2ppm)
- duration = デルタ時間測定値 (s)
- エッジ形状はガウシアン・フィルタ応答によるものと仮定します。

オシロスコープで規定されている固有のデルタ時間精度の詳細については、それぞれのオシロスコープのマニュアルに記載されています。一般に、任意のエッジからエッジへのタイミング測定仕様は精度として保証されており、NIST でトレサブルとなっています。

上記の式は、スケールと信号振幅、入力ノイズ、その他影響する要因を含んでいます。DTA を詳細に解説するには紙面に限りがあるため、ここではいくつかの要素について説明します。ここでは DPO70000 シリーズの DTA 仕様を例に説明します。この仕様ではある係数を使用しており、ワーストケースの主要因となっています。

$$DTA = \pm 0.3 \times SI + 2.0 ppm \times MI$$

- ここで、SI はサンプル間隔 (s)
- MI は測定間隔 (s)
- ±0.3 はオシロスコープのアクイジション・システムに起因する固定係数
- 2.0ppm は、DPO70000 シリーズの時間軸精度の仕様

なぜ数式なのでしょう。さまざまな要因によって確度は異なったものになります。時間軸確度 — 10.0MHz のリファレンス信号を正しく校正し、どのようにドリフトが発生するのかによって、ロング・ターム測定に影響を及ぼします。例えば、1.0ms のパルス測定する場合、補間誤差などの ps 以下の影響は、0.4ppm のキャリブレーション・オフセットによる誤差に比べると非常に小さなものです。1.0ms × 0.4ppm では、400ps の誤差となります。サンプル誤差、垂直軸ゲイン確度、補間確度、ノイズは最初の項に含まれ、ショートターム測定に影響します。例えば、3Gbps のデータ信号を測定する場合、時間軸誤差は大きく影響し、サンプリング誤差は支配的になります。サンプリング・タイミングの 10% 誤差は 2ps です。しかし、333ps の 2ppm はわずか 667as です。

DPO72004 型による短い周期のクロックと大きなパルス幅の 2 つの測定例を見ると、顕著な違いが見えてきます。1.0GHz の高速なクロックにおいて、50GS/s またはポイントあたり 20ps のリアルタイム・サンプリングで周期を測定します。DTA の式から次のように求められます。

$$DTA = \pm 0.3 \times 20 \text{ ps} + 2.0 \text{ ppm} \times 1 \text{ ns} = \pm 6.002 \text{ ps peak}$$

これは、単発またはリアルタイム・アキュジションの測定における最大のピーク測定誤差です。約 1000 回の測定におけるサンプル・サイズでは、誤差の標準偏差は一般的に $0.06 \times SI + 3.5 \text{ ppm} \times MI$ となり、この例では約 1.2ps rms となります。

大きな周期の測定では、定数 0.3 によるショートタームによる影響は、時間軸のキャリブレーションと安定度にくらべると非常に小さくなります。

$$DTA = \pm 0.3 \times 20 \text{ ps} + 2.0 \text{ ppm} \times 10 \text{ us} = \pm 21.200 \text{ ps peak}$$

この例では、100kHz のクロックを測定した場合、誤差は最大で 21ps ピークにもなります。時間軸誤差が支配的ですので、実効値の結果も同様となります。

ここで重要なことは、DSA72004 型などの当社オシロスコープの確度の仕様は、特定の校正期間に対するものであり、かつ、環境による影響を含んでいるということです。これは、特定の温度、湿度の範囲を超える場合、および校正後 1 年経過した後では、最大測定誤差はデルタ時間確度の仕様と等しいか、それ以下であるということです。代表的なシリアル・データ・レートでは、誤差は 6ps ピーク未満であり、1.2ps rms 未満です。確度の代表値は、イメージに比べるとより良い値となっています。

▶ 分解能

測定分解能とは、測定の変化を確実に検出できる能力と定義することができます。測定確度や測定再現性と混同しがちですので注意が必要です。タイミング測定においては、分解能は信号のタイミングの小さな変化（それが必然的なものか、ノイズによるものかであっても）を識別できる能力です。ハードウェアによるカウンタのビット幅、あるいはカウンタの電氣的帯域幅などでもタイミング分解能は影響を受けます。あまり目立ちませんが、演算によるアベレージングを実行するソフトウェアによってもタイミング分解能は影響を受けます。

一般的なタイム・インターバル・アナライザ (TIA、SIA) などのハードウェア・タイマでは、タイミング分解能はハードウェア的に数百フェムト秒の影響を受けます。ハードウェア・カウンタまたは同様の回路のクロックが 5GHz の場合、0.2ps 以下の小さな変化は検出できません。これはデバイスの物理的な限界であり、容易に理解することができます。

リアルタイム・オシロスコープでは、タイミング分解能はサンプル・レート、補間の確度、ソフトウェアベースの演算ライブラリによって制限を受けます。50GS/s のサンプル・レートと SIN (X)/X 補間では、数十フェムト秒の分解能が可能です。この場合は演算ライブラリがベースとなるため、実際の分解能はサブ・フェムト秒 (0.0001ps) になります。

分解能は、タイミングの小さな変化を測定する能力とも言えますが、常に正しいわけではありません。変化が、オシロスコープが本来持っている測定ノイズ以下である場合はどうでしょうか。このように、ノイズやジッタの小さな振幅を測定する場合は、システム全体のノイズ・フロアを考慮する必要があります。単にシステムの分解能を理解しただけでは、本当の意味での分解能、確度、全体の性能の限界を理解することはできません。

▶ ジッタ・ノイズ・フロア

ジッタ・ノイズ・フロアとはなんでしょうか。ジッタ・ノイズ・フロア(JNF)は、ジッタ測定における計測器固有のノイズ成分と言えます。JNFにより検出可能なジッタの下限が決まります。JNF 付近のジッタ振幅は、客観的に観測不可能です。JNF 以下のジッタ振幅を切り分けることができるという人もいますが、その性能には他のシステム・エラーによるパラメータの値がありません。

JNF を検証する 1 つの方法として、ノイズのない、正確な時間の信号を計測する方法があります。完全な信号は現実的ではないため、ジッタ・ノイズ・フロアをデモするのに使用する比較的良質な信号源があります。このテストで推奨されている機器として、Anritsu 3690A など、低位相ノイズを持った高精度 RF ジェネレータが挙げられます。その他の方法としては、反射パルスが変化しないように伝送ラインを短絡し、その反射パルスのパルス幅を測定する方法などがあります。

DA72004 型オシロスコープの JNF の式を以下に示します。

$$JNF = \sqrt{\left[\frac{N}{FS_i \times A} \times trm \right]^2 + t_j^2} \quad (\text{sec rms})$$

ここで、A = 入力信号振幅 (V)

t_{rm} = 10~90%で測定される立上り時間 (s)

N = 入力関連のノイズ (Vrms)

FS_i = 入力のフル・スケール・レンジ

t_j = ショート/ミディアム期間のアパーチャ誤差 (s rms)

エッジ形状はガウシアン・フィルタ応答によるものと仮定します。

当社は、JNF の測定にタイム・インターバル・エラー (TIE) を使用しています。TIE には信号の任意の位相エラーが含まれているため (エラーが高周波または低周波であっても、またシングル・イベント、蓄積されたエラーであっても)、最適です。さらに、リアルタイム機器における TIE 手法の基準は、計算された完全なクロックです。^{*1}

もう 1 つ JNF に影響を及ぼす要因があり、測定結果に含めるものとしてジッタ・ノイズの周波数バンドがあります。ジッタを含むすべてのノイズには、km からオングストロームまでの波長をもった周波数成分が含まれています。JNF の測定では、周波数レンジによる限界も考慮する必要があります。当社では、最大レコード長と最高サンプル・レートにおける JNF の値を代表値としています。また、上記のような式も規定しています。

JNF の値を競合他社の製品と比較する場合、当社は比較対象製品と比べて短いレコード長を使用することがあります。例えば、DSA72004 型には、50GS/s で最大 200M サンプルのレコード長があり、250Hz までのジッタを測定する能力があります。比較対象としての Agilent DSO81304B は、40GS/s でわずかに 2M サンプルのレコード長しかないので、20,000Hz までのジッタしか測定することができません。

ほとんどのノイズは 1/f ゆらぎをもっているため、250Hz~20kHz の 6 オクターブ・レンジは重要であり、位相ノイズ測定におけるキャリアからの周波数オフセットと等価になります。この 2 種類の計測器を正しく比較するためには、DSA72004 型のレコード長と垂直軸フルスケールの設定を比較対象機器と同様に設定する必要があります。

この周波数レンジで比較した場合、DSA72004 型の JNF は 400fs であり、Agilent DSO81304B の JNF は 650fs となります。^{*2}

^{*1} さまざまな位相と高調波の関係を維持したまま、すなわちリファレンスに対する安定した位相と高調波ノイズを取込み、DC 付近から計測器の周波数帯域までのジッタを測定できるのは、リアルタイム性能を持った計測器だけです。(リアルタイムでない方法では、内蔵のハードウェア・クロック・リカバリ回路を位相基準とするため、フィルタによって低周波ノイズが除去されます。これは上記で述べた PLL TIE 測定と同様です。)

^{*2} Agilent では、JNF と JMF (Jitter Measurement Floor) を同じ意味で使用しています。

▶ まとめ

DTA と JNF を組合せることで、経時的またはタイミング・ドメインにおける計測器の測定能力を効果的に、かつ正確に特長づけることが可能になります。

次のページから示すスクリーンショットは、DSA72004 型オシロスコープで BERT または RF ジェネレータなどの安定したソースの信号を測定しており、代表的な性能を示しています。

最初の図 1 では、比較的短い 10ns の信号を表示しています。TIE は 328fs rms です。この値は、競合他社製品のジッタ測定フロアと同等です。

次の図 2 は、より妥当な時間であり、レコード長である $10\mu\text{s}$ の信号を取込んでいます。この例では、DSA72004 型の TIE はわずかに増加して 415fs となっています。レコード長は、競合のオシロスコープのレコード長の限界近くになっていることにご注目ください。

3 番目の図 3 では、40GS/s、40M サンプルで 1ms の間、安定したクロック信号の TIE を測定しており、競合オシロスコープの最大レコード長の 20 倍もの長い時間を取込んでいます。1ms の取込みには、1kHz からオシロスコープの周波数帯域（この例では 15GHz）までのノイズが含まれています。

TIE は約 1.0ps rms となっていますが、重要なのは最大タイミング誤差のピーク・トゥ・ピークの値です。1ms の取込みにおいて、ピークのタイミング測定誤差は $\pm 7\text{ps}$ 未満であり、サイクル・トゥ・サイクルでは約 $\pm 4\text{ps}$ ピークとなっています。計測器の一般的な使用用途と PLL ベースの TIE 測定を考えた場合、40M サンプル、1ms のレコードにおいて、誤差は $\pm 3\text{ps}$ ピーク、500fs rms 以下となります。

信号源はノイズを含んでいるため、実際の計測器の JNF 値は表示される値より小さくなります。

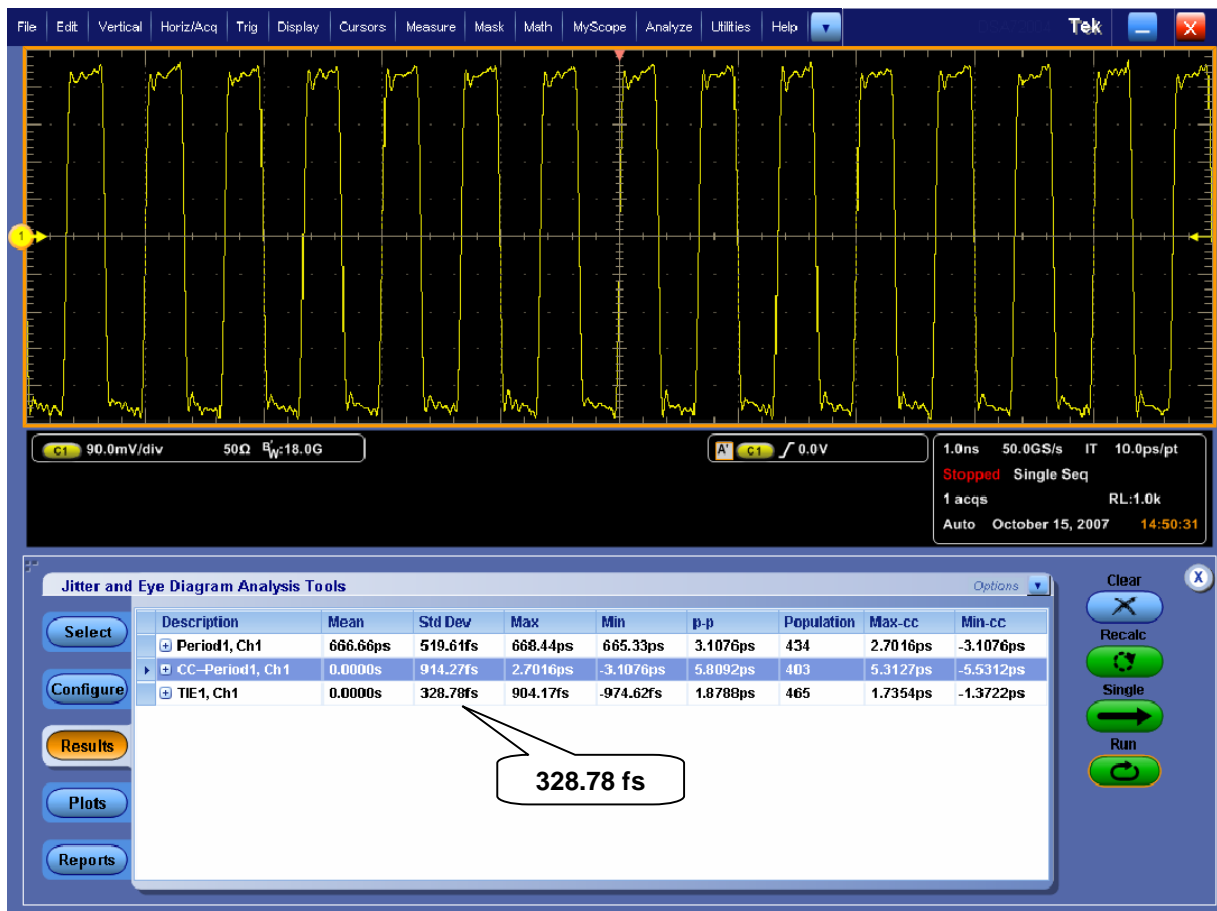


図 1 - 10ns の取込み

図 1 は、競合他社が JNF/JMF を決定するのと同様な測定手法を示しています。時間軸設定には、200MHz までのノイズ周波数しか含まれていません。ほとんどの規格テストでは現実的ではないテスト・ケースであり、測定要件としては 1.5MHz 以下が必要になります。

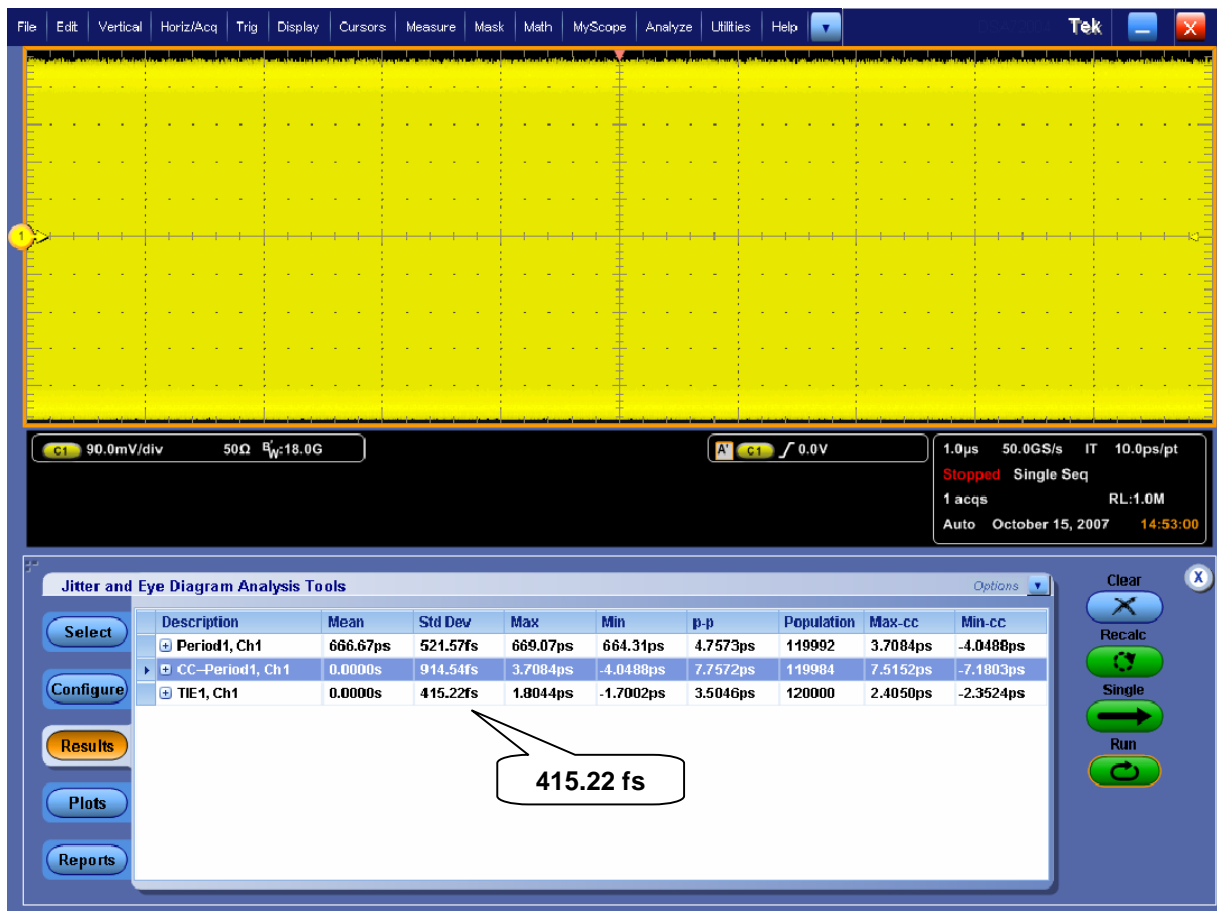


図 2 - 10 μ s の取込み

図 2 の 10 μ s の取込みでは、長時間の取込期間におけるジッタ・ノイズ・フロアを示しています。この例では、約 100kHz までの低周波ノイズが含まれています。信号に含まれるノイズをより完全に示しており、Agilent DSO81304B の最大レコード長近くで取込んでいます。しかし、これでも現実にリアルタイム・オシロスコープが使用される状況を表してはなりません。

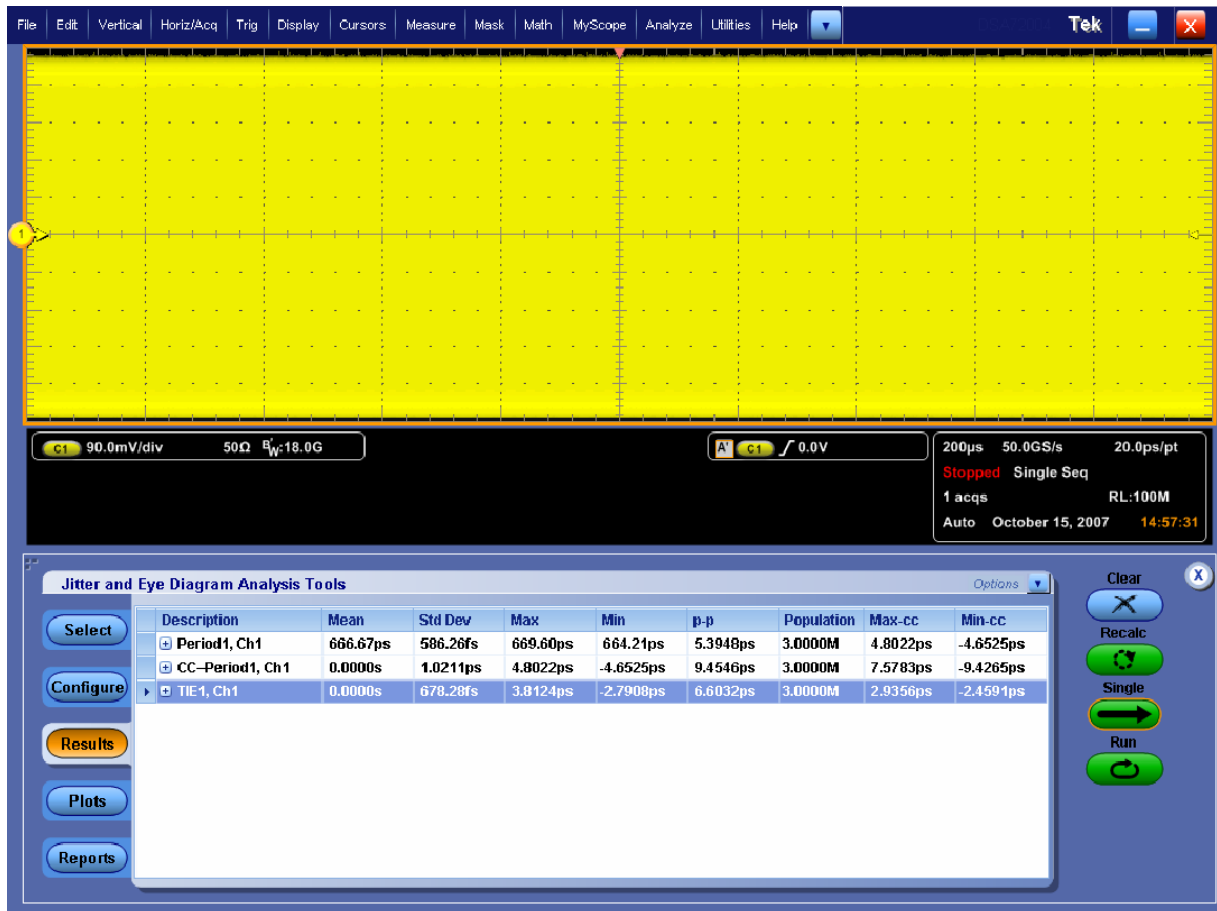


図 3 - 2ms の取込み

図 3 では 2ms の取込みを示しており、500Hz までのジッタと変調効果を直接観測しています。DSA72004 型では、まだ ps 以下の JNF を維持しており、678fs rms となっています。

FBD、PCI Express、DDR2 などの最新の規格では、ロング・メモリで取込み、処理することでサイクル・トゥ・サイクル依存を観測し、リファレンス・クロックの変調プロファイルを検証し、PLL とクロック・リカバリ性能を検証します。DSA72004 型は、50GS/s、100M サンプルのレコード長で非常に長い時間を取込むことができます。

ジッタは、DC から光までにおよぶ現象です。ジッタの原因を特定するためには、キロヘルツ以下の電源周波数から、マルチギガヘルツの隣接クロックとデータ周波数までのすべてのジッタ・スペクトラムを観測する必要があります。当社の DSA70000 シリーズは、その性能を備えています。



Tektronix お問い合わせ先:

日本

本社03-6714-3111

SA営業統括部03-6714-3004

ビデオ計測営業部03-6714-3005

大宮営業所048-646-0711

仙台オフィス022-792-2011

神奈川営業所045-473-9871

東京営業所042-573-2111

名古屋営業所052-581-3547

大阪営業所06-6397-6531

京都オフィス075-323-9048

福岡営業所092-472-2626

湘南カスタマ・サービス・センタ0120-7-41046

地域拠点

米国1-800-426-2200

中南米52-55-542-4700

東南アジア諸国／豪州65-6356-3900

中国86-10-6235-1230

インド91-80-2227-5577

欧州44-0-1344-392-400

中近東／北アフリカ41-52-675-3777

他30カ国

Updated 01 June 2007

Copyright Tektronix. All rights reserved. Tektronix 製品は、米国およびその他の国の特許(出願中を含む)により保護されています。本文書は過去に公開されたすべての文書に優先します。仕様および価格は予告なしに変更することがあります。Tektronix、TEK は、Tektronix, Inc の登録商標です。Windows は、Microsoft Corporation の登録商標です。その他の商標、製品名称などは、各社の商標または登録商標です。