

リアルタイム・オシロスコープを使用した PLL の特性評価

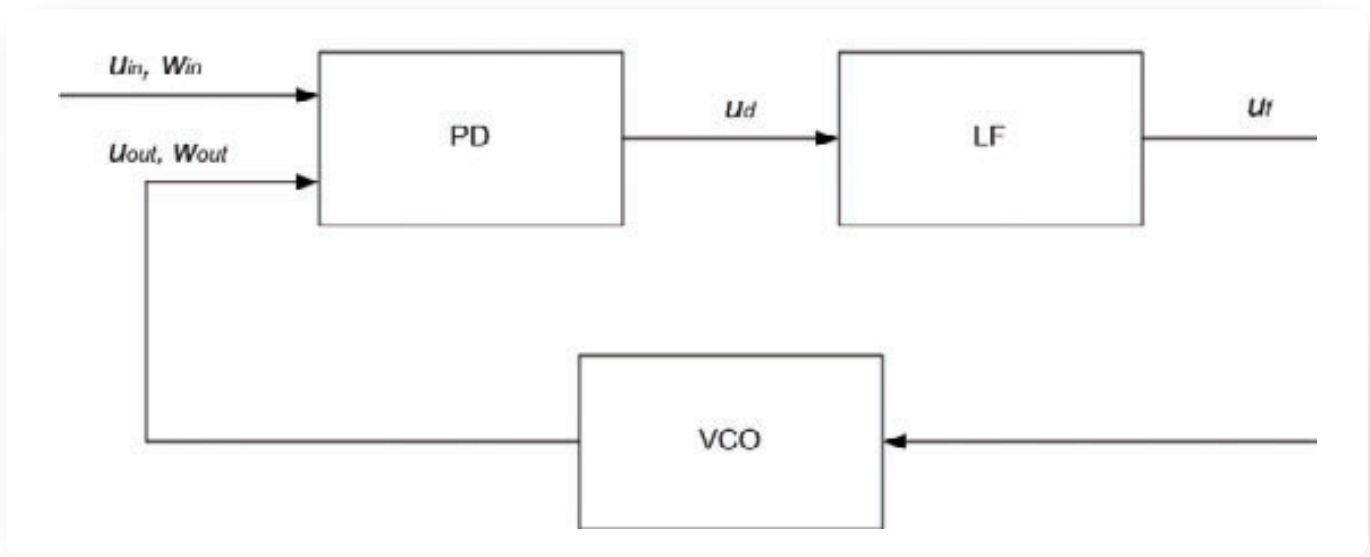


はじめに

PLL (Phase-Locked Loop) は通信のアプリケーションでよく使用されます。PLL は、デジタル・データ信号からのクロック・リカバリ (CDR)、衛星伝送信号からのキャリア再生、周波数と位相の変調と復調、および高精度受信機の周波数シンセサイザなどで使用されます。PLL の特性には、帯域、ノイズ、アキュイジション・レンジ、速度、ダイナミック・レンジ、安定性、および精度があります。このアプリケーション・ノートでは、PLL の動作原理を説明した後、リアルタイム・オシロスコープで実行される TDSJIT3 v2.0 ジッタ/タイミング解析ソフトウェアを使用した、典型的な PLL の評価方法について説明します。

PLL の動作原理

PLL は、オシレータで生成された出力信号の周波数と位相の両方を、基準信号または入力信号に同期させる回路です。同期された状態 (ロック状態ともいう) では、オシレータの出力信号と基準信号との位相エラーはゼロか、または一定に維持されます。位相エラーが累積されると、位相エラーを再び最小限度に抑えるように制御メカニズムがオシレータに作用します。このようなフィードバック・コントロール・システムでは、出力信号の位相が基準信号の位相にロックされます。これが、PLL (Phase-Locked Loop) と呼ばれる理由です。



▶ 図 1. PLL の基本構成図

PLL は、図 1 に示すように、電圧制御オシレータ (VCO)、位相検出器 (PD)、ループ・フィルタ (LF) の 3 つの基本機能ブロックで構成されています。

位相検出器は、入力信号と VCO 出力信号を比較します。この差分は、VCO の調整に使用される前に、ループ・フィルタによってフィルタ処理されます。LF はロー・パス・フィルタで、位相差の低周波成分のみが VCO に伝達されます。高周波成分は、フィルタ処理により除去されます。その結果、PLL は低周波成分の変動のみを追跡し、高周波成分の変動には追従しません。

PLL が線形システムとしてモデル化された場合、各ブロックは図 2 に示す伝達関数によって表されます。

入出力システムは、閉ループ伝達関数によって表されます。一般に、2 種類の閉ループ伝達関数を使用されます。1 つは位相伝達関数 $H(s)$ であり、次のように定義されます。

$$H(s) = \frac{\theta_{out}(s)}{\theta_{in}(s)}$$

もう 1 つはエラー伝達関数 $H_e(s)$ であり、次のように定義されます。

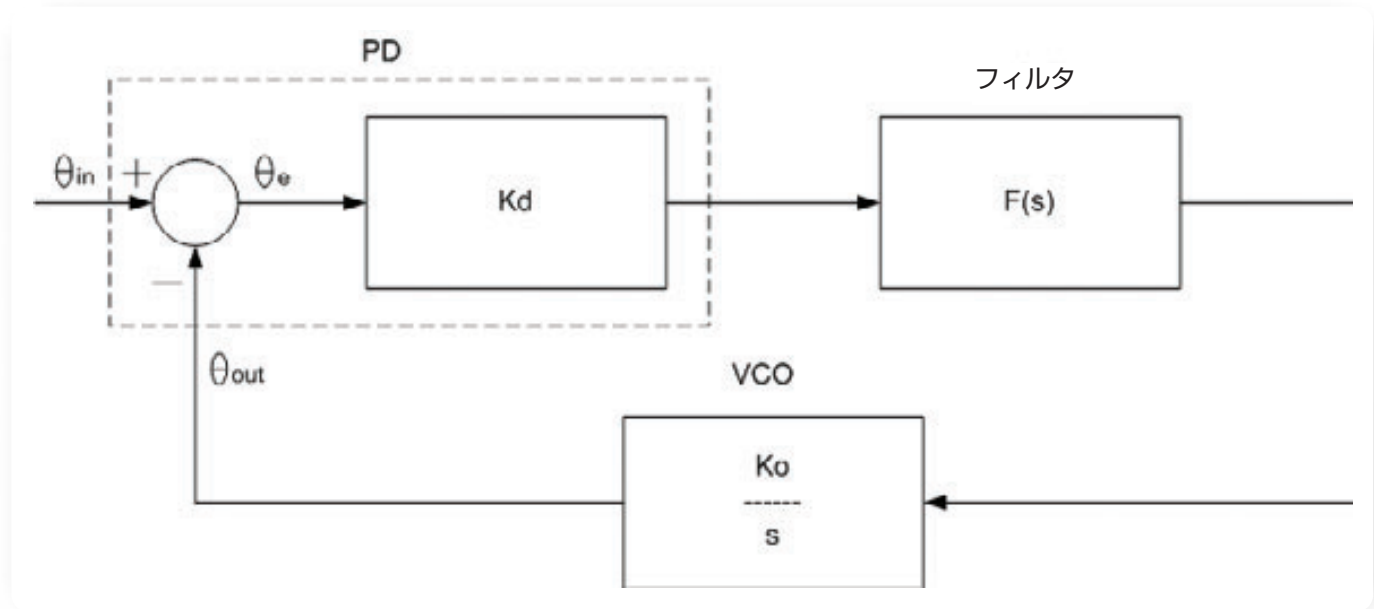
$$H_e(s) = \frac{\theta_e(s)}{\theta_{in}(s)}$$

位相伝達関数 $H(s)$ はロー・パスであり、エラー伝達関数 $H_e(s)$ はハイ・パスです。 $H(s)$ と $H_e(s)$ の関係を以下に示します。

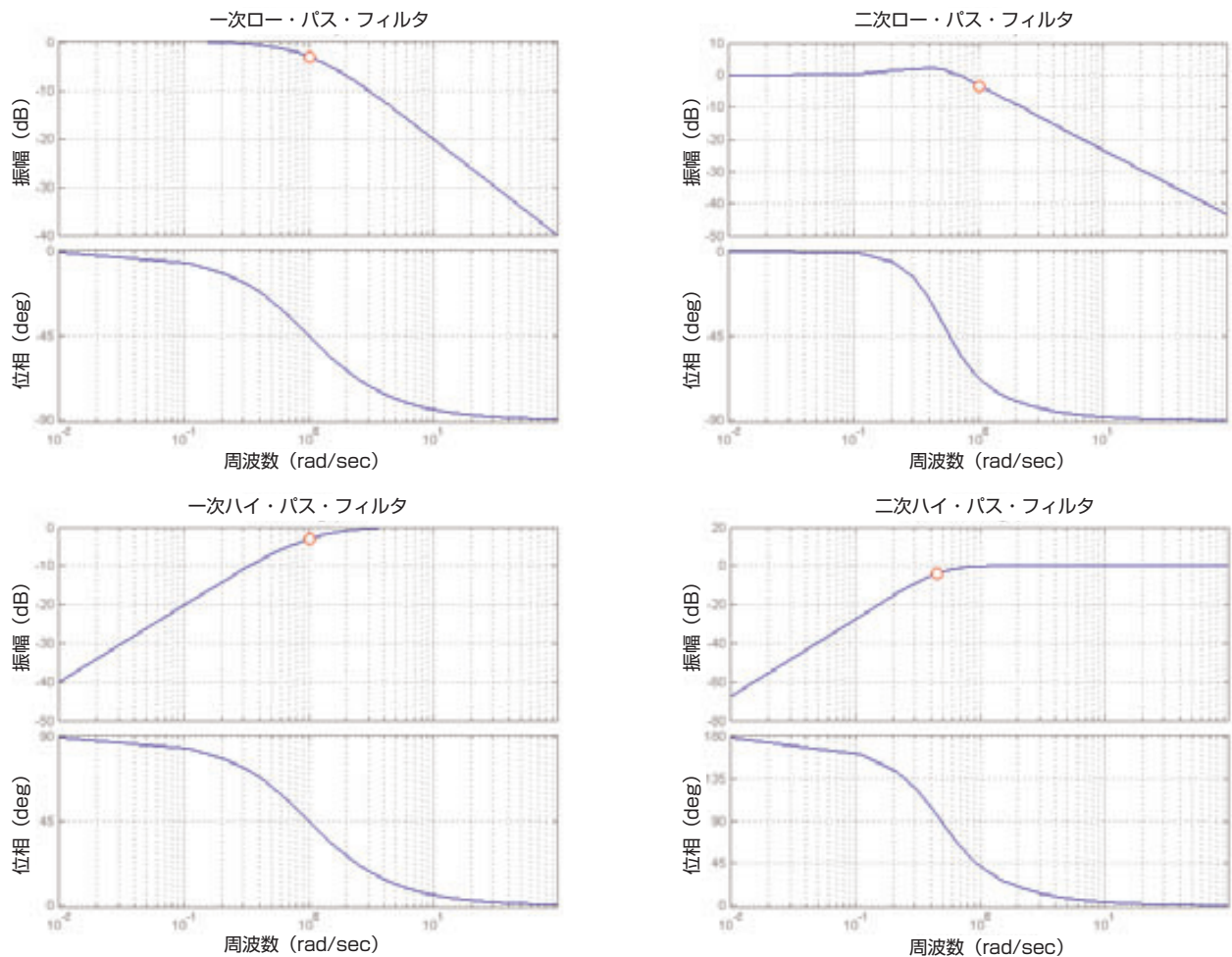
$$H_e(s) + H(s) = 1$$

この式は複素数で表されていることに注意してください。複素数は振幅と位相を持っているため、この式は 2 つの伝達関数の振幅の合計が 1 になることを表しているわけではありません。

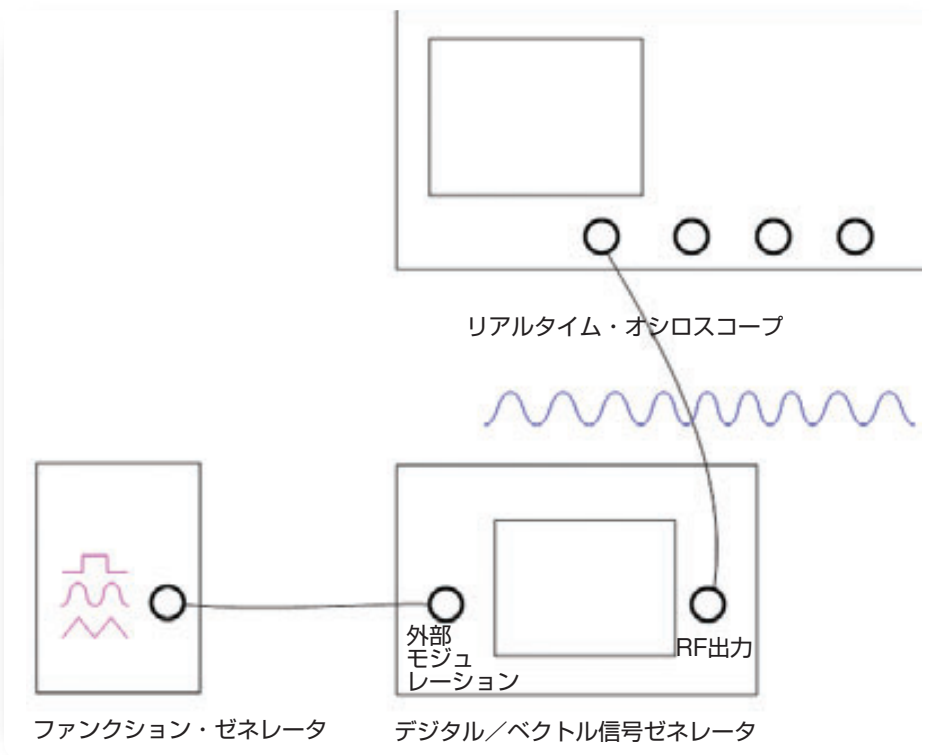
システムのカットオフ周波数は、一般に、振幅ゲインが -3 dB に低下したときの周波数として定義されます。カットオフ周波数が位相伝達関数に基づいて定義されているか、エラー伝達関数に基づいて定義されているかに注意することは重要です。たとえば、一次 PLL が位相伝達関数 $H(s) = \frac{1}{s+1}$ を持つ場合、対応するエラー伝達関数 $H_e(s) = 1 - H(s)$ は同じカットオフ周波数を持ちます。ただし、二次 PLL が位相伝達関数 $H(s) = \frac{1.4s+1}{s^2+1.4s+1}$ を持つ場合、位相伝達関数のカットオフ周波数とエラー伝達関数のカットオフ周波数は、図 3 に示すように異なります。



▶ 図 2. PLL 線形モデル



▶ 図 3. ボーデ線図：一次の $H(s)$ (左上)、一次の $H_e(s)$ (左下)、二次の $H(s)$ (右上)、二次の $H_e(s)$ (右下)
 赤丸のマークは -3dB ゲイン・ポイントです



▶ 図 4. FM 信号の生成および測定のためのセットアップ例

ジッタの生成と検証

PLL を評価するには、制御されたジッタを含むテスト信号が必要です。信号ゼネレータはこのような信号を生成できますが、ゼネレータの変調特性が不明で校正されていない場合は、実際のテスト信号のレートと偏差を確認することが重要です。TDSJIT3 v2.0 を使用すると、生成された信号のジッタを測定することができます。ジッタ生成の測定はジッタ出力の測定と同じです。

ジッタは、公称値からの時間のずれとして定義されます。実際には、さまざまな種類のジッタ測定が行われます。これらのジッタのうち一般に、周期ジッタと TIE（タイム・インターバル・エラー）ジッタが測定されます。よく知られているように、周期ジッタは TIE ジッタの一階微分であり、逆に TIE ジッタは周期ジッタの積分です。それは次の式からわかります。

$$\Delta p_n = p_n - p = [(n+1) \times p + \Delta t_{n+1}] - (n \times p + \Delta t_n) - p = \Delta t_{n+1} - \Delta t_n$$

ここで、 Δp_n は周期ジッタ、 p_n は実際の周期、 p は公称周期、 Δt_n は TIE ジッタです。

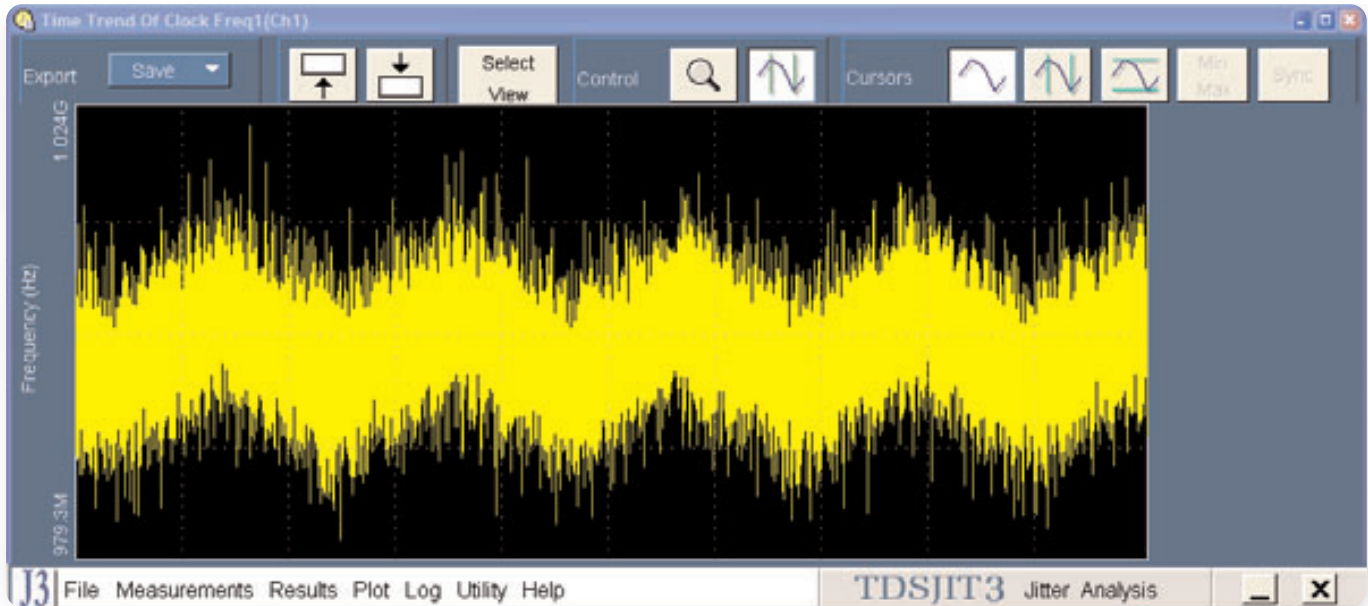
周波数と位相は関連する変数です。PLL は位相ロック・ループであるため、位相は PLL をキャラクタライズするための自然変数です。位相は周波数の積分であり、周波数は位相の微分です。したがって、位相ジッタと周波数ジッタとの関係は、TIE ジッタと周期ジッタとの関係と同じです。周期ジッタと周波数ジッタには、次の関係があります。

$$\Delta f_n = f_n - f = \frac{1}{p_n} - \frac{1}{p} = \frac{1}{p + \Delta p_n} - \frac{1}{p} = \frac{1}{p} \left(1 - \frac{\Delta p_n}{p} + O\left(\frac{\Delta p_n}{p}\right)^2 \right) - \frac{1}{p} \cong -\frac{1}{p^2} \Delta p_n$$

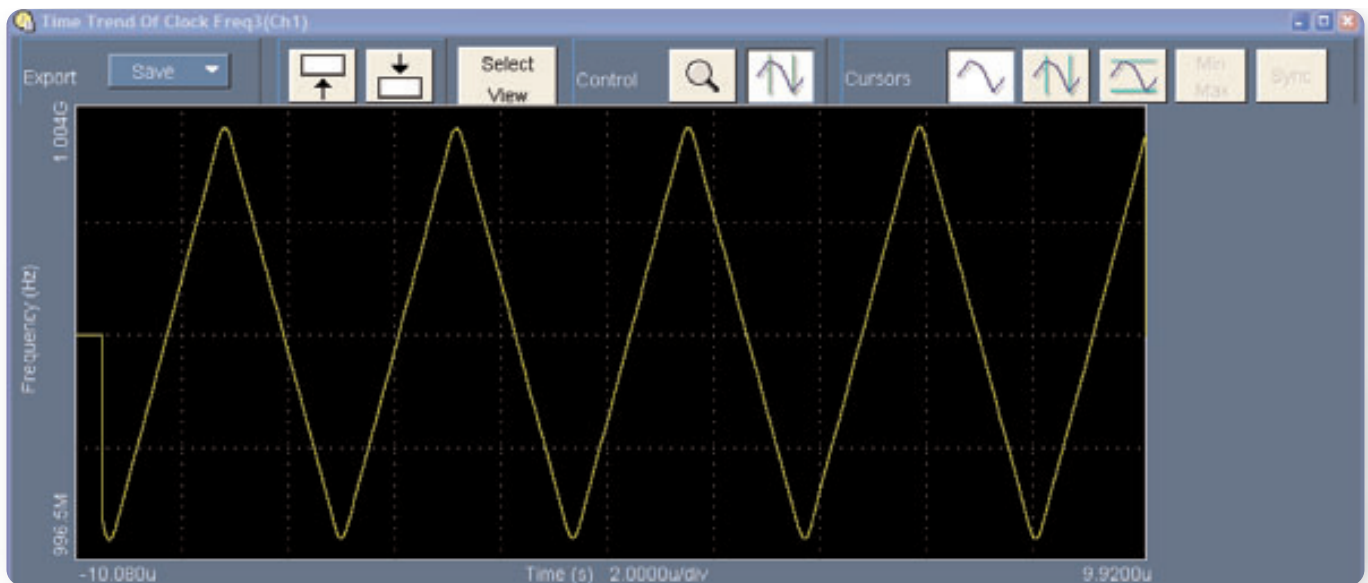
ここで $\frac{\Delta p_n}{p} \ll 1$

公称周期と比較して周期ジッタが比較的小さい場合、周波数ジッタは周期ジッタに比例します。周期ジッタが小さい場合は、条件 $O\left(\frac{\Delta p_n}{p}\right)^2$ を無視できません。

周波数ジッタと周期ジッタは互いに比例しなくなります。



▶ 図 5. スペクトラム拡散クロック信号の周波数のタイム・トレンド・プロット



▶ 図 6. スペクトラム拡散クロック信号のロー・パス・フィルタ処理された周波数のタイム・トレンド・プロット

次の例では、周波数変調（FM）に三角波信号を使用しています。図 4 では、信号ゼネレータの外部変調入力として、三角波信号を生成するファンクション・ゼネレータが使用されています。RF 出力は、テクトロニクス TDS7404B 型リアルタイム・オシロスコープに接続されます。リアルタイム・オシロスコープ上で実行されるアプリケーション・ソフトウェア TDSJIT3 v2.0 を使用して、ジッタを測定します。

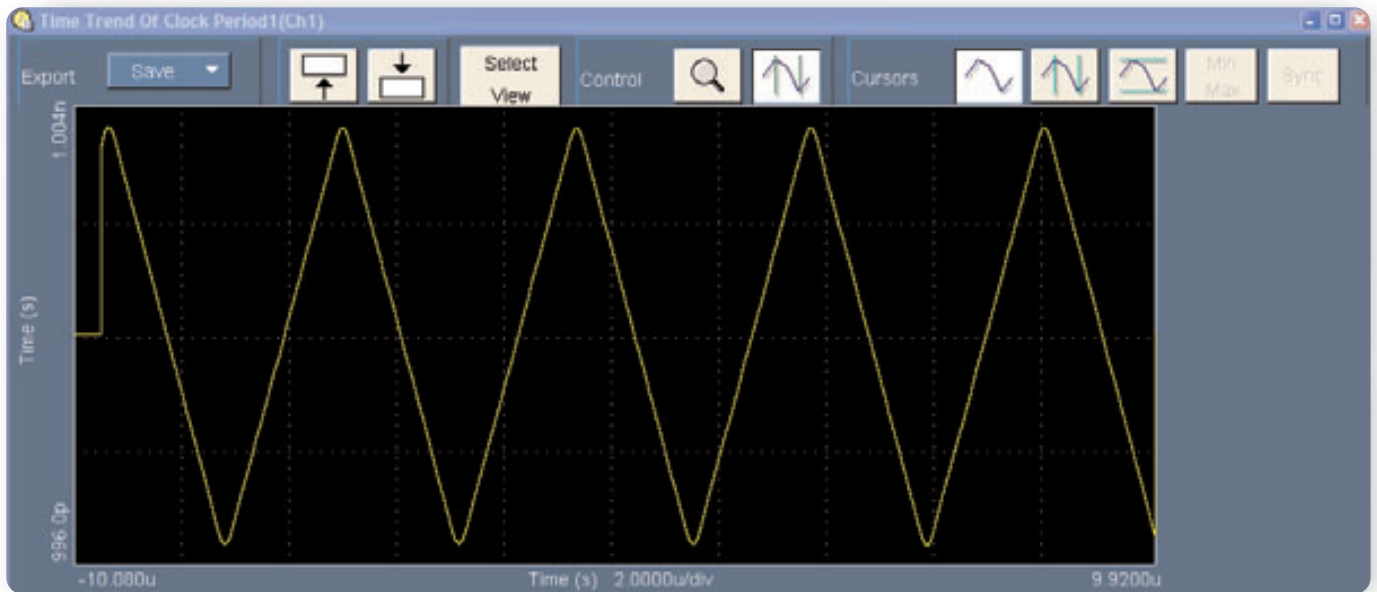
図 5 は、TDSJIT3 v2.0 を使用して測定された周波数と、取込まれた時間とのプロットを示しています。実際

に用いられた変調をより明確に表示するためには、高調波ノイズを除去する必要があります。TDSJIT3 v2.0 では、メニューで Measurements>Configure Meas>Filters の順に選択し、適切なロー・パス・フィルタを適用して高調波ノイズが除去できます。（この例では、2 MHz のカットオフ周波数を使用しています）。図 6 に結果を示します。

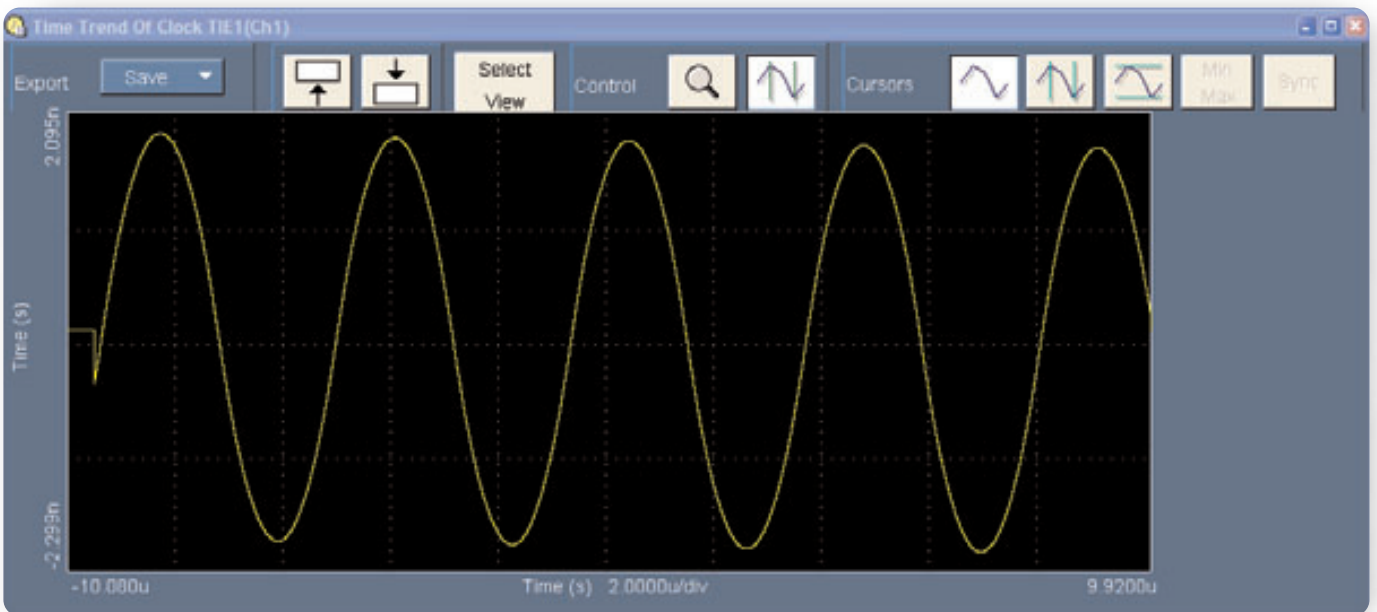
図 6 から、変調周波数のレートと周波数偏差ばかりでなく、変調キャリアの中心周波数も容易に確認できます。

リアルタイム・オシロスコープを使用した PLL の特性評価

▶ アプリケーション・ノート



▶ 図 7. スペクトラム拡散クロック信号のロー・パス・フィルタ処理された周期のタイム・トレンド・プロット



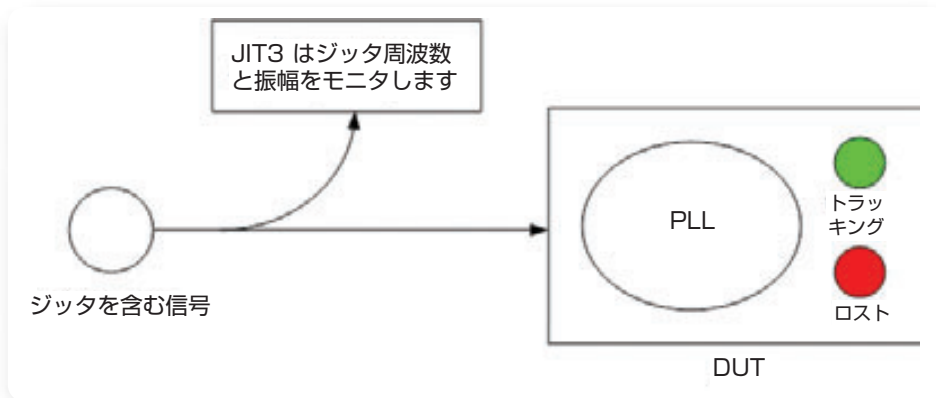
▶ 図 8. スペクトラム拡散クロック信号のロー・パス・フィルタ処理されたTIE のタイム・トレンド・プロット

図 7 は、(ロー・パス・フィルタ処理された) 周期も三角波のプロファイルを持っていることを示しています。これは、変調が狭帯域 FM であるためです。周期変化が比較的小さいので、周期ジッタは周波数ジッタに比例しています。

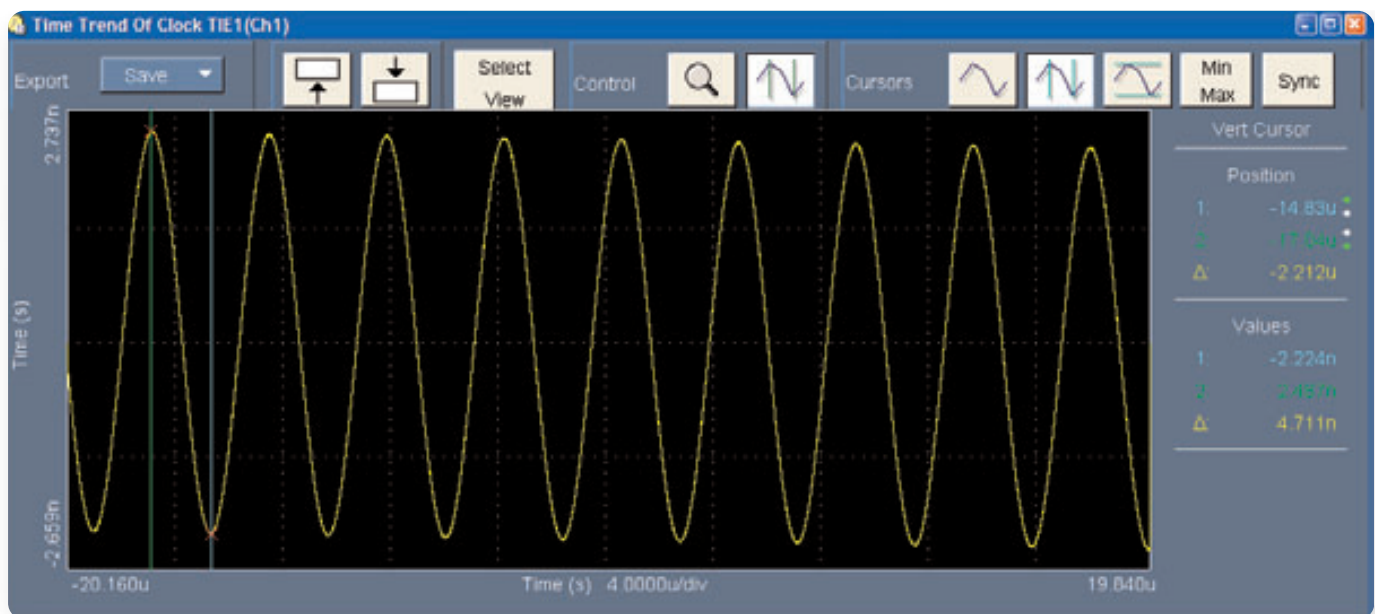
TIE ジッタは、周期ジッタの積分であることに注意してください。図 8 に示すように、三角波プロファイルの積分は正弦波プロファイルと同様の形状を持っています。

PLL ジッタ・トラッキング・パフォーマンス・テスト

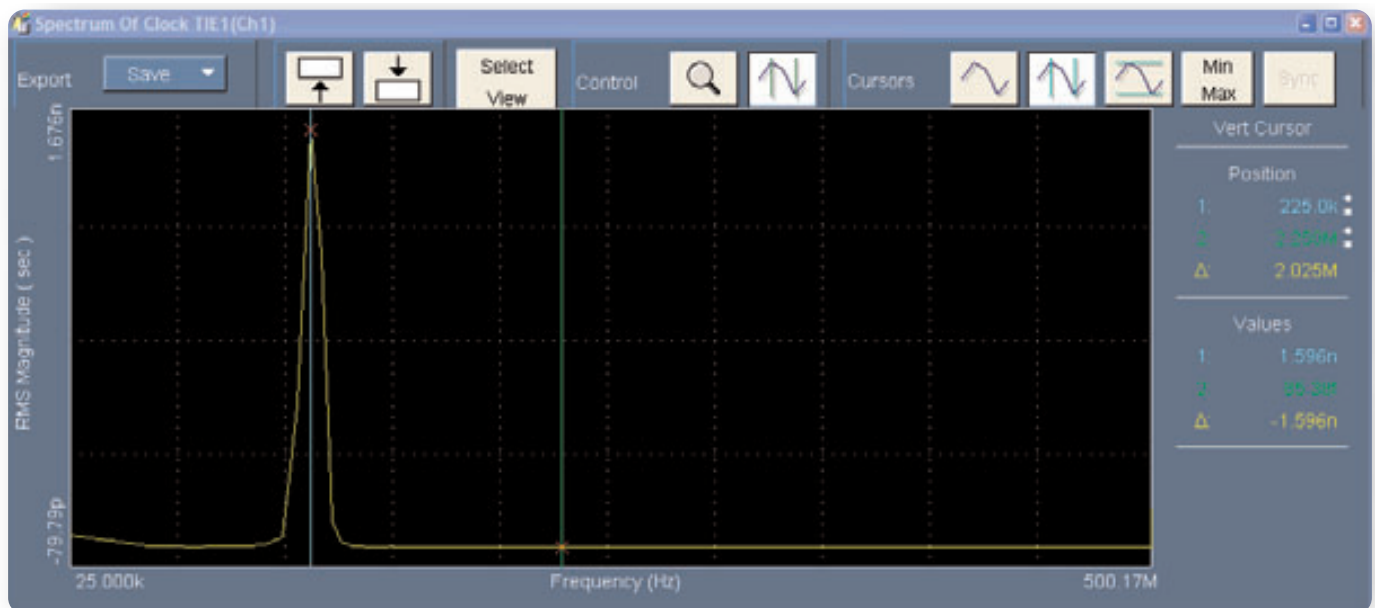
ジッタ・トラッキング・パフォーマンス・テストの目的は、ロックを維持した状態で PLL が扱うことのできる入力信号のジッタ許容量を測定することにあります。ジッタが許容値を超えると、PLL は入力の変調周波数に対するロックを解除します。図 9 に示すように、このテストでは、TDSJIT3 v2.0 を使用して PLL に与えられているジッタ量を測定します。その際、テスト中のデバイスのロックが解除されたことを示す機能により、ジッタが許容値を超えたことが確認できます。このテストにおける TDSJIT3 v2.0 の役割は、ジッタ生成テストにおける TDSJIT3 v2.0 の役割と同じです。



▶ 図 9. PLL ジッタ・トラッキング・パフォーマンス・テストのセットアップ

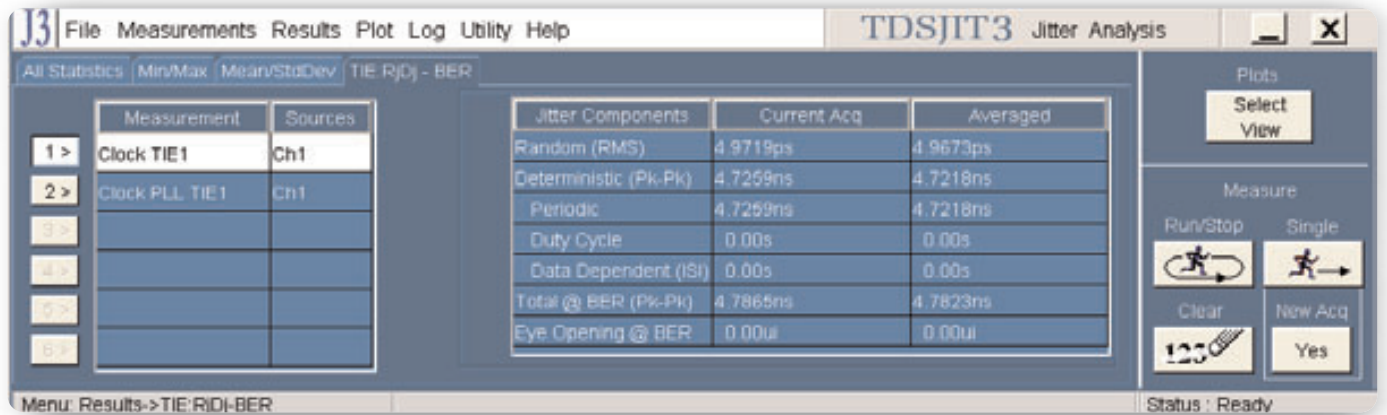


▶ 図 10. ジッタの時間領域表示

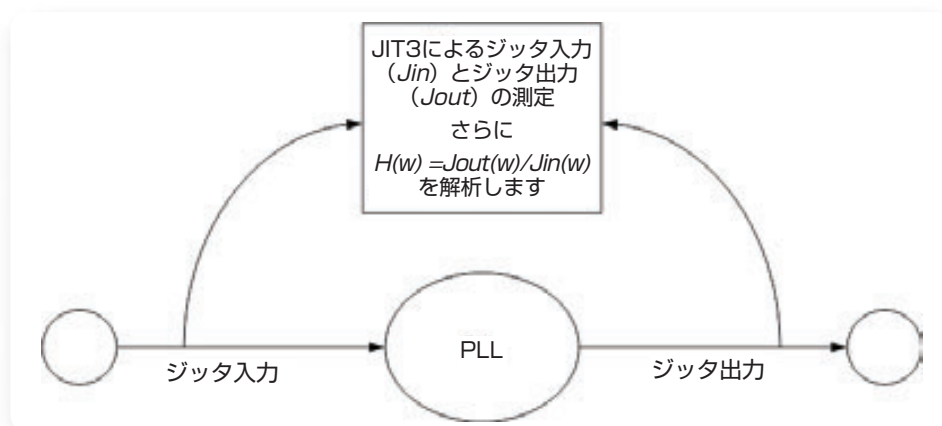


▶ 図 11. ジッタの周波数領域表示

リアルタイム・オシロスコープを使用した PLL の特性評価 ▶ アプリケーション・ノート



▶ 図 12. ジッタ・コンポーネントの表示



▶ 図 13. ジッタ・トランスファ・テストのセットアップ

ジッタの振幅と周波数は、TDSJIT3 v2.0 を使用して容易に測定、表示できます。タイム・トレンド・プロットは、図 10 に示すように明確な時間領域の表示を行います。また、スペクトラム・プロットは、図 11 に示すように周波数領域の表示を行います。

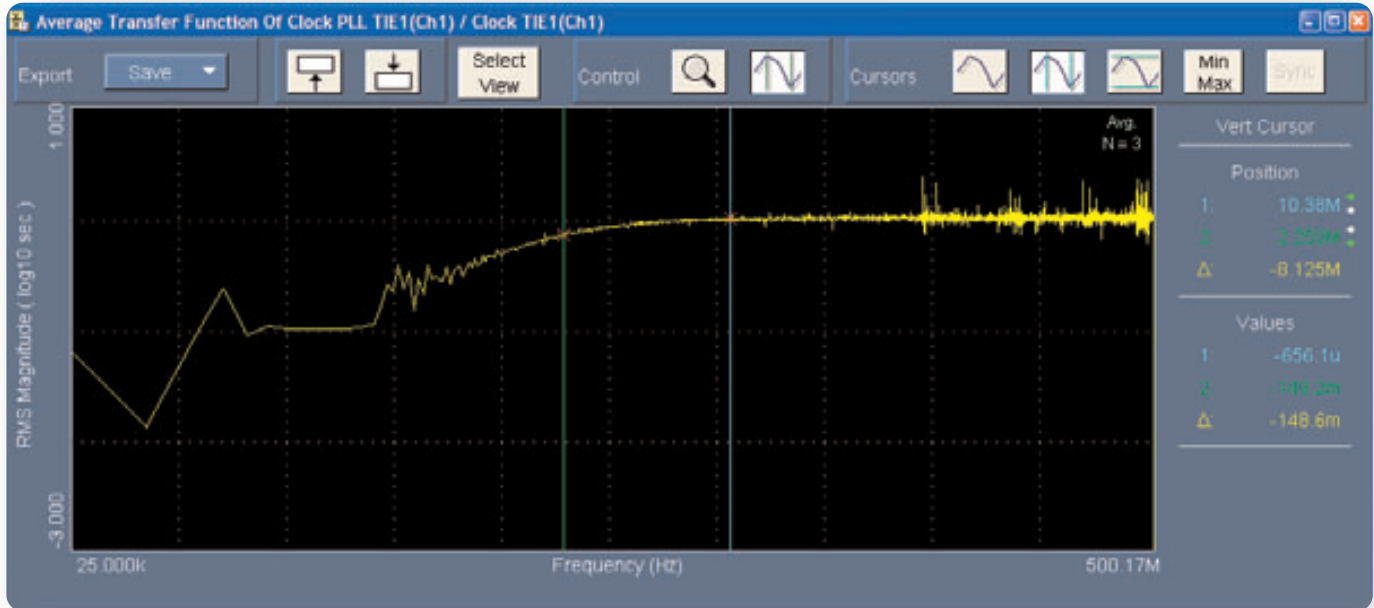
周期性ジッタ (PJ) コンポーネントの正確な振幅は、図 12 に示すように Rj-Dj 分離を実行することにより得られます。Rj-Dj 分離により、4.7ns の周期性ジッタのピーク・ピーク値が得られます。これは、タイム・トレンド・プロットからのカーソル測定と十分相関があります。スペクトラム・プロットは、周期性ジッタが 225 kHz の周波数を持ち、その実効値が時間領域で測定されたピーク・ピーク値と相関があることを示しています。

ジッタ・トランスファ

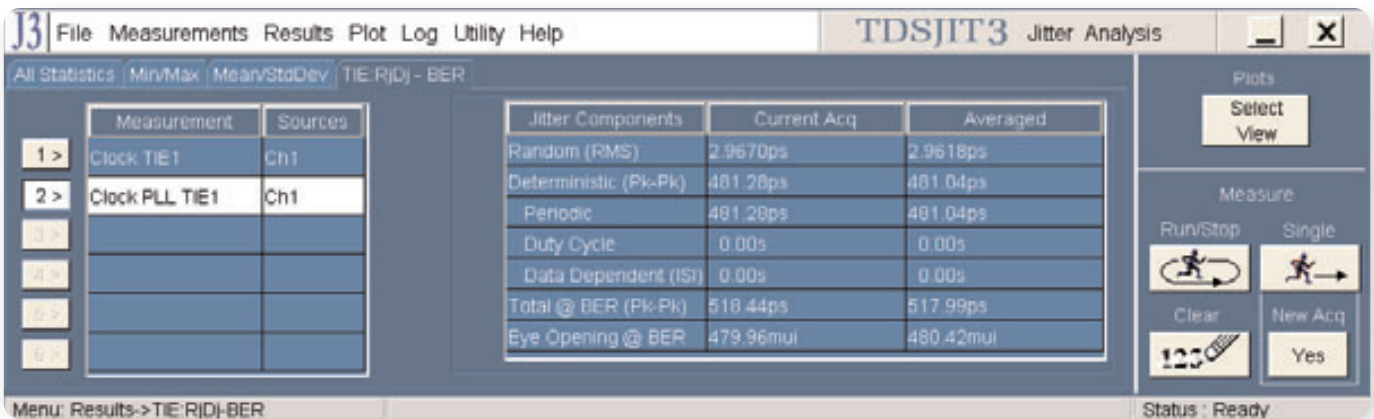
ジッタ・トランスファ・テストでは、PLL から出力されるジッタと PLL に入力されるジッタとが比較されます。TDSJIT3 v2.0 の伝達関数プロットを使用すると、こ

のタスクを容易に行うことができます。TDSJIT3 v2.0 により、PLL への入力信号のジッタ測定と、PLL からの出力信号のジッタ測定をそれぞれ行います。従来の方法にしたがって、伝達関数の分子に出力信号のジッタ測定結果を使用し、これら 2 つの測定間（入出力信号のジッタ）の伝達関数を表示します。

次の例では、前述のジッタ・トラッキング・テストの項で使用したものと同一 FM 信号を入力信号として使用しています。TDSJIT3 v2.0 により、まず最初にこの FM 信号の測定項目としてクロック TIEを選択します。次に、この FM 信号を入力信号としているテスト対象の PLL 出力信号の測定を行います。ここでは、PLL 出力信号の測定項目としてクロック PLL TIE を選択しています。この設定では、TDSJIT3 v2.0 のソフトウェア PLL を被測定対象としてテストすることになります。また、ソフトウェア PLL では、変調信号周波数の 10 倍にあたる 2.25 MHz のカットオフ周波数を持つ一次フィルタを設定しています。



▶ 図 14. PLL の伝達関数



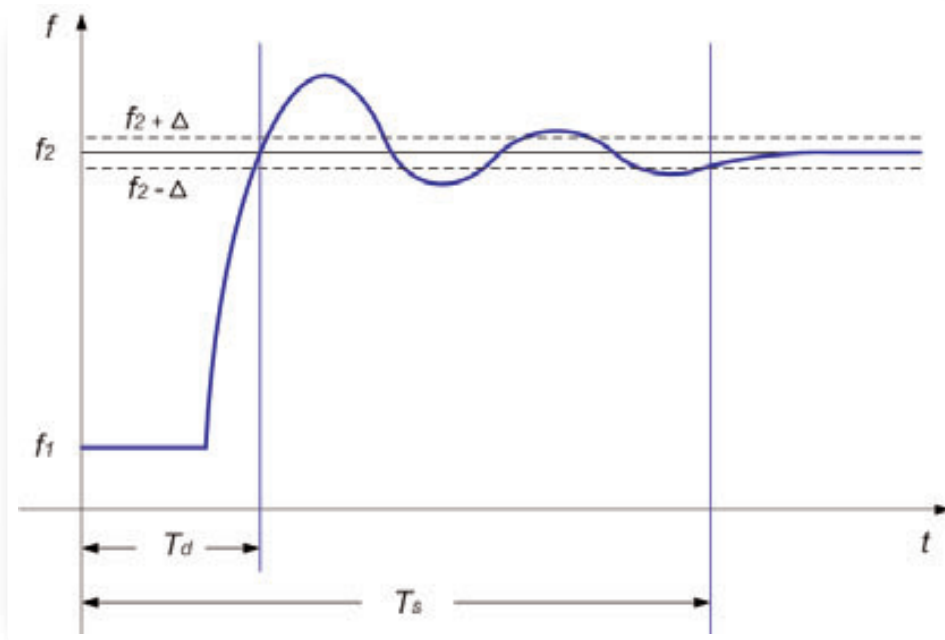
▶ 図 15. PLL 出力のジッタ・コンポーネント

TDSJIT3 v2.0 で伝達関数プロットを作成するには、メニューで Plot>Create を選択し、PLL 出力信号の測定として登録された項目を選択します。メニュー Add Plot の下で、Transfer Function を選択し、伝達関数の分母には入力信号の測定として登録された項目を選択します。

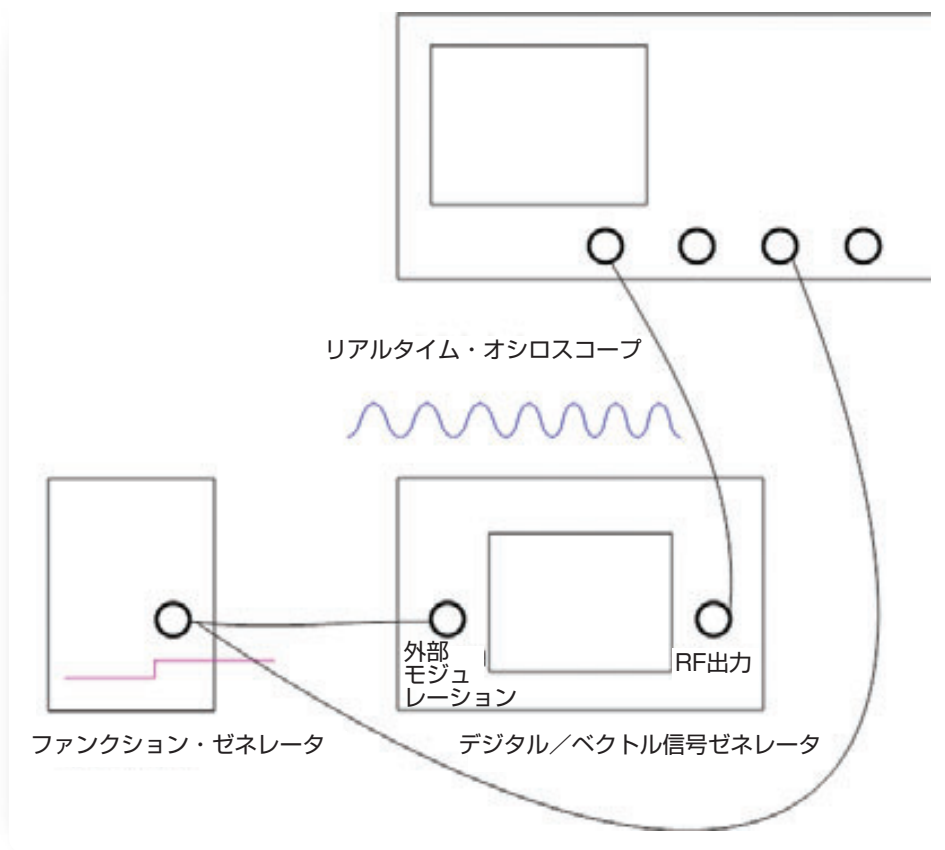
図 14 は、設定された PLL カットオフ周波数ポイントにおいて、伝達関数が log10 の値で -0.1492 のゲインを持っていることを示しています。このゲインは、20 を乗算してデシベル (dB) に変換できます。結果の -3dB は、

テスト中の PLL (TDSJIT3 v2.0 のソフトウェア PLL) の帯域を示しています。伝達関数プロットは、デフォルトでアベレージングを使用します。アベレージングによりスムーズなプロットが得られます。図 15 は、PLL の出力信号の周期性ジッタが、図 12 の値 (PLL の入力信号) と比較して約 10 倍減衰されていることを示しています。これは、周期性ジッタが PLL カットオフ周波数よりも約 10 倍低い周波数を持っているという事実と一致します。

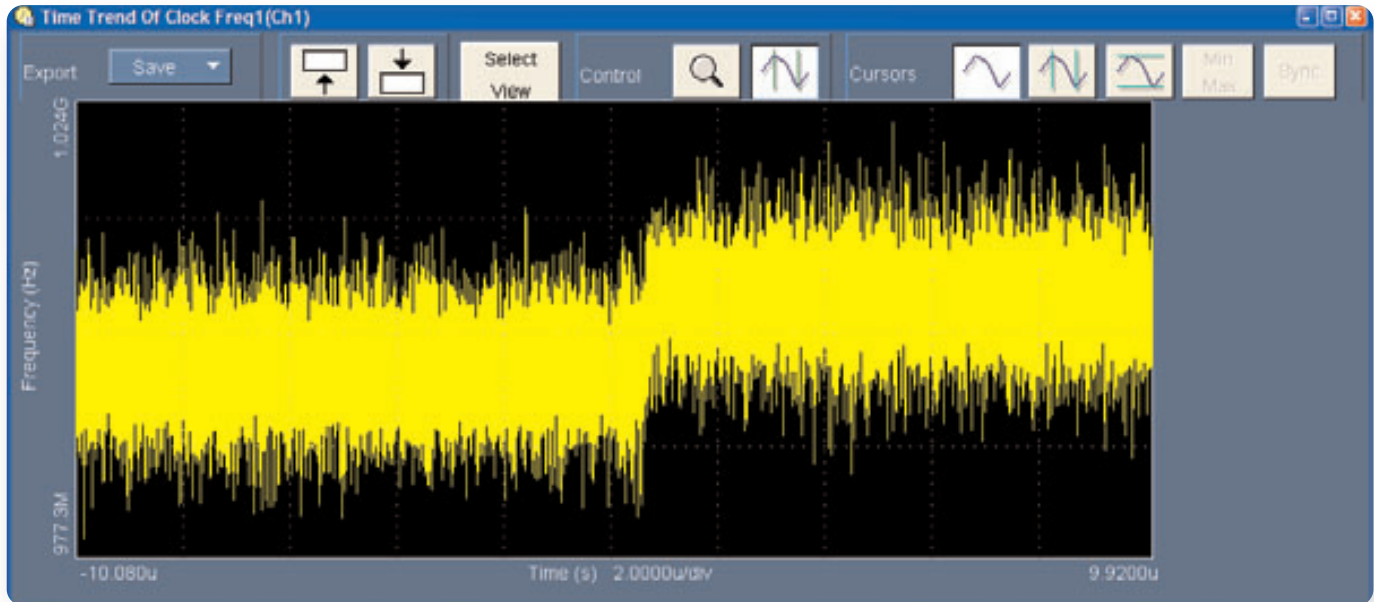
リアルタイム・オシロスコープを使用した PLL の特性評価
 ▶ アプリケーション・ノート



▶ 図 16. PLL のステップ応答



▶ 図 17. 過渡応答テストのセットアップ例



▶ 図 18. クロック周波数のタイム・トレンド・プロット

PLL の過渡応答

PLL の過渡応答は、周波数のステップ状の変化に対する PLL 応答を示します。この周波数の変化は、入力信号周波数のステップ状の変化または PLL 内の通倍比の変化によって発生する可能性があります。PLL の出力周波数は、図 16 に示すように、過渡期間を経て初期値から新しい値に変化します。

一般に、次の 2 つのパラメータを使用して過渡応答を評価します。

- ステップ時間 (T_d) : 入力周波数のステップ状変化の後、PLL がまず新たな周波数に到達する時間。
- セトリング時間 (T_s) : 入力周波数のステップ状変化の後、PLL が指定された周波数範囲 ($f_2 - \Delta$, $f_2 + \Delta$) 内に安定するのに要する時間。ここで、 Δ は $|f_2 - f_1|$ の 2% または 5% です。

この過渡応答がステップ応答です。オーバーシュート値も評価に使用される場合があります。

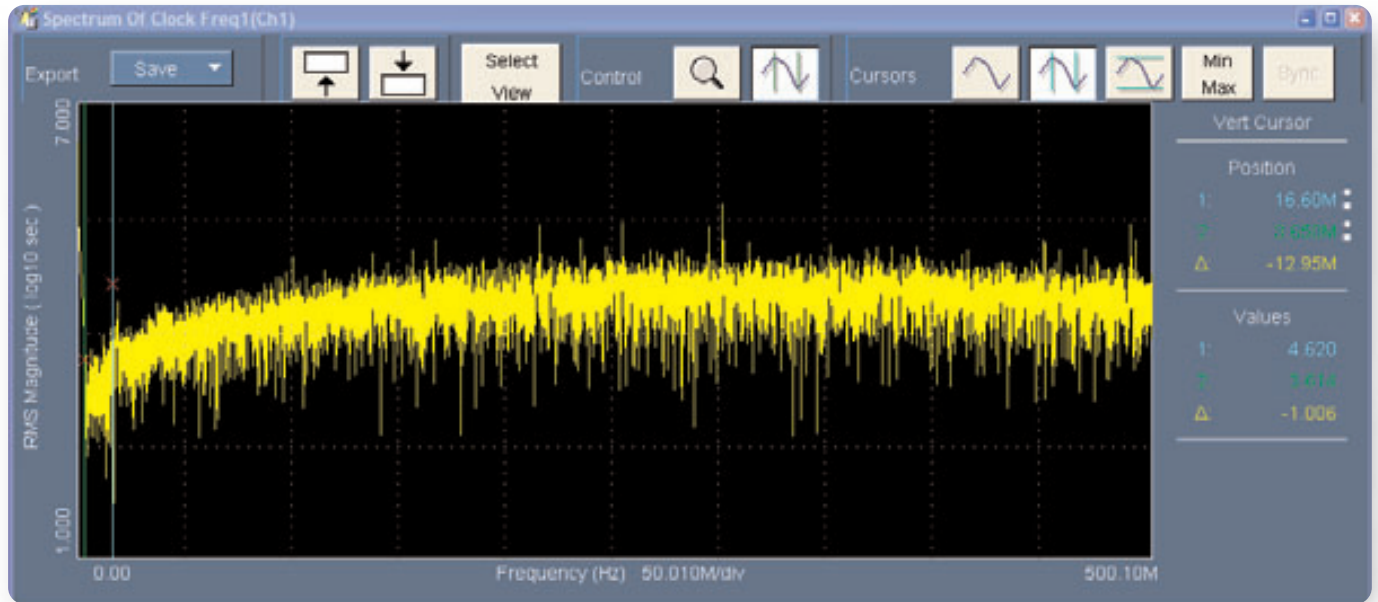
LTI (linear time-invariant・線形時不変) システムの場合、ステップ応答はインパルス応答 $h(t)$ の積分です。インパルス応答のフーリエ変換が伝達関数 $H(s)$ です。したがって、線形 PLL の伝達関数またはステップ応答の片方が既知の場合、もう一方を導き出すことができます。伝達関数 $H(s)$ は、一般に複素関数であるのに対して、TDSJIT3 v2.0 での伝達関数測定は振幅だけであることに注意してください。

次の例では、オシロスコープと TDSJIT3 v2.0 を使用した過渡応答の測定方法を示しています。過渡応答を取込むためには、ステップ信号によりオシロスコープをトリガする必要があります。TDSJIT3 v2.0 は、PLL 出力周波数の測定に使用されます。この例では、図 17 に示すように、シグナル・ゼネレータに対する外部 FM 変調信号としてファンクション・ゼネレータからのステップ信号を使用しています。シグナル・信号ゼネレータでの内部 PLL の過渡応答を測定します。ゼネレータからの周波数変調された正弦波信号は、TDS7404B 型の CH1 に接続されます。ステップ信号も、トリガとして使用するために CH3 に接続されます。

TDSJIT3 v2.0 を設定し、CH1 でクロック周波数測定を行います。図 18 のタイム・トレンド・プロットは、周波数のステップ状変化を示しています。

リアルタイム・オシロスコープを使用した PLL の特性評価

▶ アプリケーション・ノート

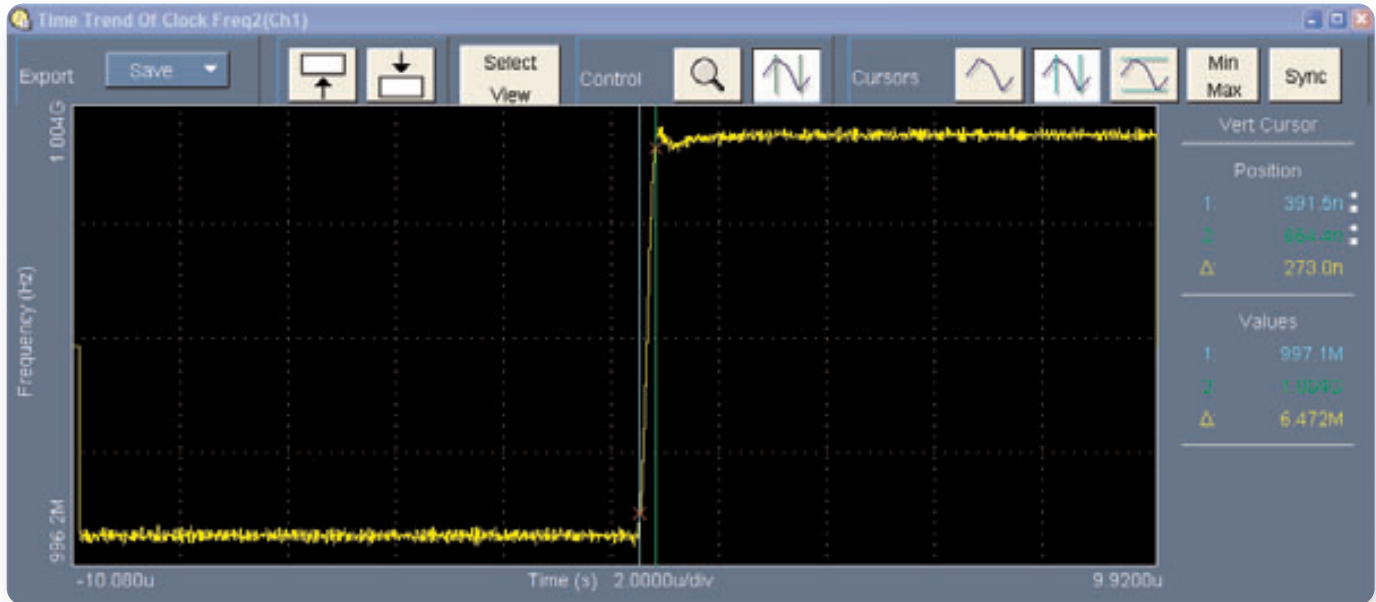


▶ 図 19. クロック周波数のスペクトラム・プロット

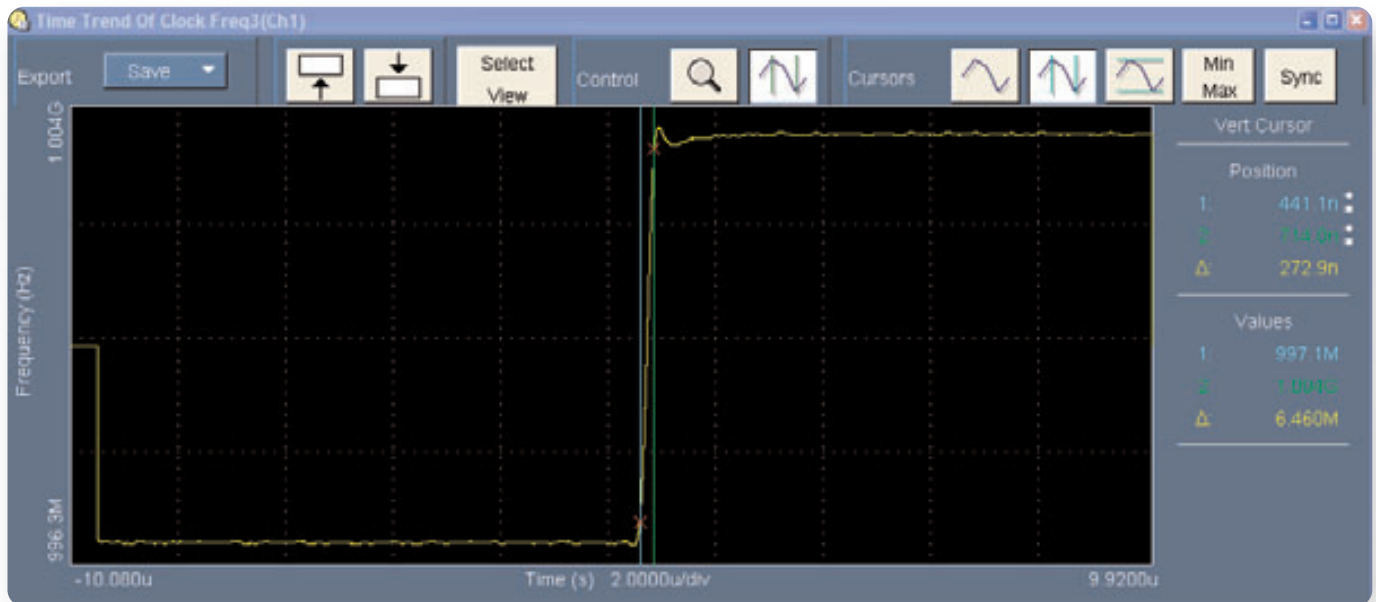
大きな高周波ノイズは、過渡応答の特性を不明確にするので、除去する必要があります。このノイズはTDSJIT3 v2.0 のロー・パス・フィルタにより、除去することができます。ロー・パス・フィルタのカットオフ周波数は、不要なノイズを除去できる程度に十分低く、また、過渡応答に影響を与えない程度に高い必要があります。PLL の立上り時間は、そのカットオフ周波数と相関があります。同じ原理はロー・パス・フィルタにも適用されます。次の式は、複数の立上り時間の影響を計算するための経験則です。

$$TR_{filtered} = \sqrt{TR_{PLL}^2 + TR_{filter}^2}$$

PLL のカットオフ周波数が既知で、ロー・パス・フィルタのカットオフ周波数を PLL のカットオフ周波数の 3 ～ 5 倍大きい値に設定できる場合、フィルタは過渡応答に対して大きな影響を及ぼさずに済みます。PLL のカットオフ周波数が不明の場合は、ロー・パス・フィルタのカットオフ周波数は次のように決定します。まず、スペクトラムを確認して、候補のカットオフ周波数の範囲を識別します。図 19 に示すように、低い周波数（3 MHz 未満）のスペクトラムのひとかたまりは残しておく必要があるもので、16 MHz を超えるスペクトラムは除去する必要があるノイズです。



▶ 図 20. 16 MHz のロー・パス・フィルタを使用したクロック周波数のタイム・トレンド・プロット、カーソルによる立上り時間測定



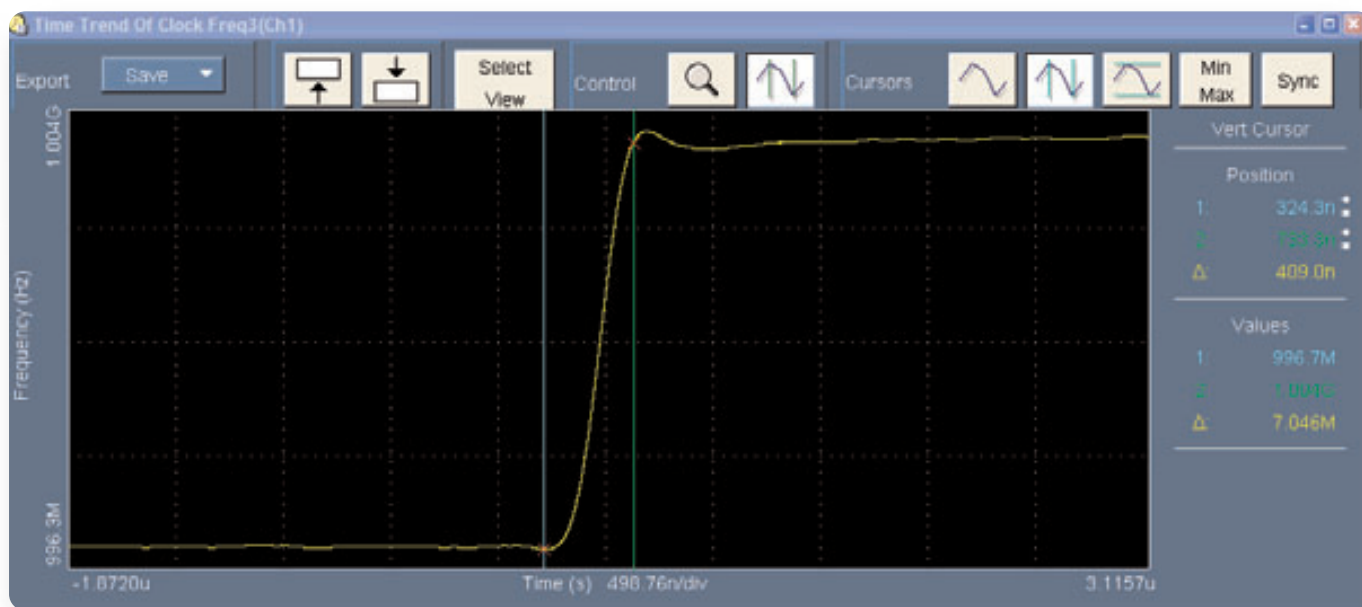
▶ 図 21. 4 MHz のロー・パス・フィルタを使用したクロック周波数のタイム・トレンド・プロット、カーソルによる立上り時間測定

前述の手順により決定された範囲で複数の異なるカットオフ周波数の値を使用し、フィルタの影響をチェックします。TDSJIT3 v2.0 では、同じ測定項目（たとえば、CH1 のクロック周波数）に対し複数のインスタンスが作成可能で、インスタンスごとに異なるフィルタを設定できます。この例では、3 つのクロック周波数測定がそれぞれ異なるフィルタ設定で作成されています。図 18 に示すように、最初のクロック周波数測定はフィルタなしで行います。図 20 と 21 に示すように、2 番目と 3 番目の

測定は、カットオフ周波数がそれぞれ 16 MHz と 4 MHz のロー・パス・フィルタを設定しています。カーソルによって測定された 図 20 と 21 の立上り時間は十分接近しており、4 MHz カットオフ周波数を使用したフィルタが過渡応答を歪ませないことがわかります。また、図 21 は十分鮮明（高周波ノイズが除去されている）であり、図から過渡応答パラメータが容易に測定できることを示しています。

リアルタイム・オシロスコープを使用した PLL の特性評価

▶ アプリケーション・ノート



▶ 図 22. PLL ステップ応答のカーソル測定

図 22 では、プロット・ズーム機能を使用して遷移時間付近のスケールを拡大し、詳細を示しています。カーソルにより、ステップ時間 T_d は 409 ns と測定できます。また、初期周波数が $f_1 = 996.7$ MHz、最終周波数が $f_2 = 1.004$ GHz であることも示しています。最終的に、カーソルを使用して、周波数オーバシュートが約 2.5% であると測定できます。

結論

TDSJIT3 v2.0 は、汎用のジッタおよびタイミング解析アプリケーションとして、PLL などの回路解析とデバッグに利用できる便利で高性能なツールです。TDSJIT3 v2.0 は、時間領域と周波数領域での正確な測定と明確なプロットを提供し、ジッタ生成、ジッタ耐性、ジッタ・トランスファ、および過渡応答などの PLL 性能をすばやく評価するうえで非常に有用です。

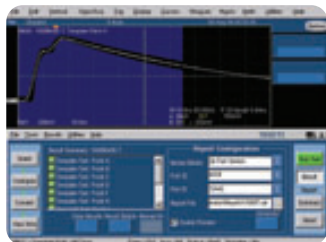
参考文献

- [1] Roland E. Best, "Phase-locked Loops – Design, Simulation, and Applications". McGraw-Hill, 1999.
- [2] Dan H. Wolaver, "Phase-locked Loop Circuit Design". Prentice Hall, 1991.
- [3] 『TDSJIT3 v2.0 ユーザ・マニュアル』 Tektronix, Inc., 2004.



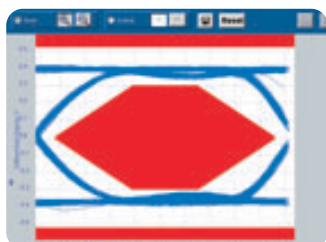
▶ パワー解析ソフトウェア – TDSWPWR3

TDSWPWR3 パワー解析ソフトウェアを使用すると、デジタル・オシロスコープは高度な解析ツールになります。TDSWPWR3 は、電源スイッチング・デバイスや磁気コンポーネントの電力損失をすばやく測定および解析し、カスタマイズ可能なフォーマットで詳細なテスト・レポートを作成します。この TDSWPWR3 を当社 TDS5000B シリーズまたは TDS7054B 型/TDS7104B 型デジタル・フォスファ・オシロスコープ、差動プローブおよび電流プローブとともに使用することで、電源の設計および検査に最適な測定システムになります。



▶ Ethernet コンプライアンス・テスト・ソフトウェア – TDSET3

TDSET3 Ethernet コンプライアンス・テスト・ソフトウェアは、10BaseT、100Base-TX、および 1000BaseT 技術の広範囲な試験を自動化することにより、生産性の向上を実現します。リターン・ロスなどを含む幅広い範囲の試験と精巧なテスト・フィクスチャ（別売）による完全なソリューションで、イーサネット・デバイスの物理レイヤを効率的に設計および検証できます。



▶ USB2.0 コンプライアンス・テスト・パッケージ – TDSUSB2

当社は、USB 2.0 物理レイヤ検査用の業界初の完全なソリューションとして、USB-IF の認可を受けた TDSUSB2 と TDS7000B シリーズ DPO を提供しています。TDSUSB2 では、各種テスト用にオシロスコープの設定をあらかじめ定義しておけるので、手動セットアップが不要です。コンプライアンス・テスト・フィクスチャが用意されているため、広範囲なテストのプロービングが可能になります。



▶ 光ディスク解析ソフトウェア – TDSDVD

TDSDVD 光ディスク解析ソフトウェア・パッケージは、当社 TDS5000B シリーズ および TDS/CSA7000B シリーズ・デジタル・フォスファ・オシロスコープと併せて使用するテスト・ツールです。このテスト・ツールを使用すると、最先端の光ディスク・システムを開発している設計エンジニアおよび検査エンジニアは、柔軟性を備えた、解析、タイム・インターバル表示、業界に特化した各種自動測定、および使い慣れたアナログ表示の利用が可能になります。

テクトロニクスの以下の連絡先までご連絡ください。

ASEAN / オーストラレーシア/ パキスタン (65) 6356 3900

Tektronix 有限会社 (インド) (91) 80-22275577

イタリア +39 (02) 25086 1

英国およびアイルランド +44 (0) 1344 392400

オーストリア +41 52 675 3777

オランダ 090 02 021797

カナダ 1 (800) 661-5625

韓国 82 (2) 528-5299

スイス +41 52 675 3777

スウェーデン 020 08 80371

スペイン +34 (901) 988 054

台湾 886 (2) 2722-9622

中央東ヨーロッパ、ウクライナ、およびバルト諸国

+41 52 675 3777

中央ヨーロッパおよびギリシャ +41 52 675 3777

中国 86 (10) 6235 1230

中東、アジア、および北アフリカ +41 52 675 3777

デンマーク 80 88 1401

ドイツ +49 (221) 94 77 400

日本 81 (3) 6714-3010

ノルウェー 800 16098

バルカン、イスラエル、南アフリカ、およびその他の

東ヨーロッパ諸国 +41 52 675 3777

香港 (852) 2585-6688

フィンランド +41 52 675 3777

ブラジルおよび南米 55 (11) 3741-8360

フランスおよび北アフリカ +33 (0) 1 69 81 81

米国 1 (800) 426-2200

米国（輸出版売）1 (503) 627-1916

ベルギー 07 81 60166

ポーランド +41 52 675 3777

ポルトガル 80 08 12370

南アフリカ +27 11 254 8360

メキシコ、中米およびカリブ諸国 52 (55) 56666-333

ルクセンブルグ +44(0) 1344 392400

ロシア、CIS およびバルト諸国 7 095 775 1064

その他の地域からのお問い合わせ：Tektronix, Inc.

1 (503) 627-7111

2004 年 11 月 1 日更新

詳細情報

Tektronix は、総合的に継続してアプリケーション・ノート、テクニカル・ブリーフおよびその他のリソースのコレクションを保守整備し、技術者が最先端で仕事できるように手助けをします。www.tektronix.com または www.tektronix.co.jp を参照してください。



Copyright © 2004, Tektronix, Inc. All rights reserved. Tektronix 製品は、登録済および出願中の米国その他の国の特許等により保護されています。本書の内容は、既に発行されている他の資料の内容に代わるものです。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” および “TEK” は Tektronix, Inc. の登録商標です。他のすべての商品名は、各企業の標準、商標および登録商標です。

09/04 FLG/WOW

61Z-18193-0

Tektronix

Enabling Innovation