

ジッタ・トレランス・テストとジッタ伝達特性テストのためのコントロールジッタの生成



はじめに

高速シリアル通信システムを設計する場合、常にジッタが問題になります。日常の作業でジッタの特性評価を行っている、意図的なジッタまたは制御可能なジッタを持ったクロック・ソースまたはデータ・ソースが必要になることがあります。目的に応じて信頼性があり、再現可能な結果を得るためには、このようなジッタ・ソースの細部まで十分な注意を払うことが重要です。利用可能な測定ツールを用いて最終的なジッタ・ソースを検証することで、高い精度を確保することができます。

TDSJIT3 v2.0 ジッタ解析ソフトウェアは、当社の高性能リアルタイム・オシロスコープ上で動作し、ジッタとタイミングを解析して視覚化するための豊富なツールを備えたソフトウェア・アプリケーションです。

TDSJIT3 v2.0 を適切なジッタ・ソースと組み合わせると、ジッタ・トレランスとジッタ伝達特性評価および解析を行うための強力なツールになります。

このアプリケーション・ノートのセクション1では、コントロール・ジッタを生成する方法（またはしない方法）について説明します¹。

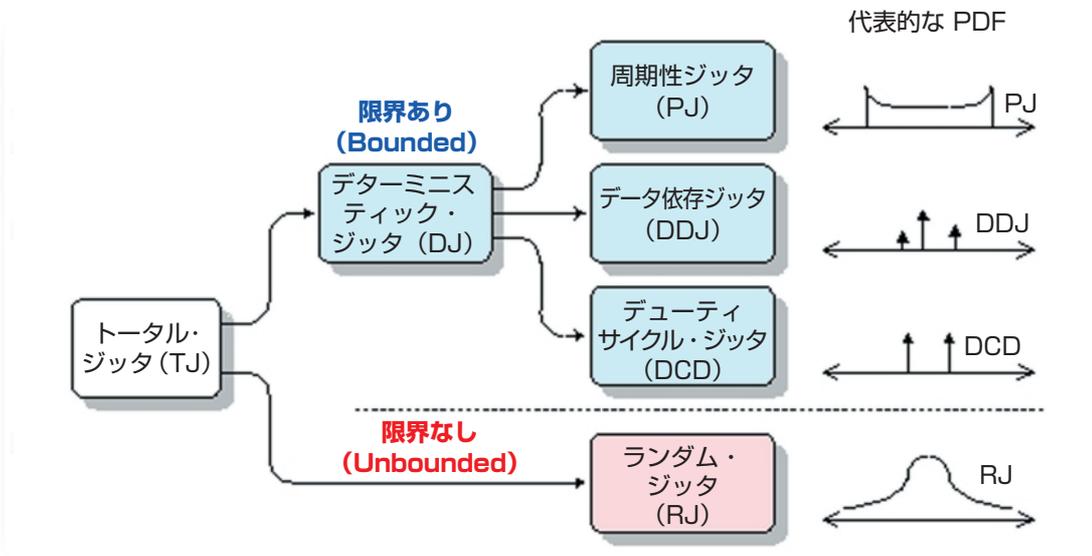
セクション2では、ジッタ・ソースを使用する可能性のある以下の作業について説明します。

- ジッタ・トレランス・テスト
- ジッタ伝達特性テスト
- テスト機器間の相関

¹ただし、最新のDTG5000シリーズ・データ・タイミング・ゼネレータでは、DTG5000シリーズ本体内蔵のジッタ生成機能に加え、DTGM31/32型出力モジュールのジッタ・コントロール入力にAWG710B型などの信号ゼネレータを組み合わせることで、制御可能なノイズ、ジッタの重畳が可能になります。

ジッタ・トレランス・テストとジッタ伝達特性テストのためのコントロールジッタの生成

▶ アプリケーション・ノート



▶ 図1. ジッタの階層

ここでは、それぞれの事例のジッタ生成で特に注意が必要な点についても説明し、TDSJIT3 v2.0を使用してテストをサポートする方法を示します。

セクション 1 : ジッタ生成の手法と落とし穴

タイミング・ジッタは、ランダム、データ依存、(非相関) 周期性など、さまざまなカテゴリに分けることができます。図1に示すように、これらのジッタは一般的にジッタの階層に分類されています。ある特定の種類のジッタを生成したり、複数の種類のジッタを合成する作業が必要になる場合があります。必要なジッタを得るには、次の要件について理解していることが必要です。

- 使用できるジッタ生成ツールの種類
 - それぞれのツールの性能上の制約
 - 目標を達成するためにツールを有効に組み合わせる方法
- これらの知識を習得することにより、特定の作業に適したテスト信号を効果的に作成できます。これらの知識がないと、不注意で誤りを犯してしまう可能性があります。

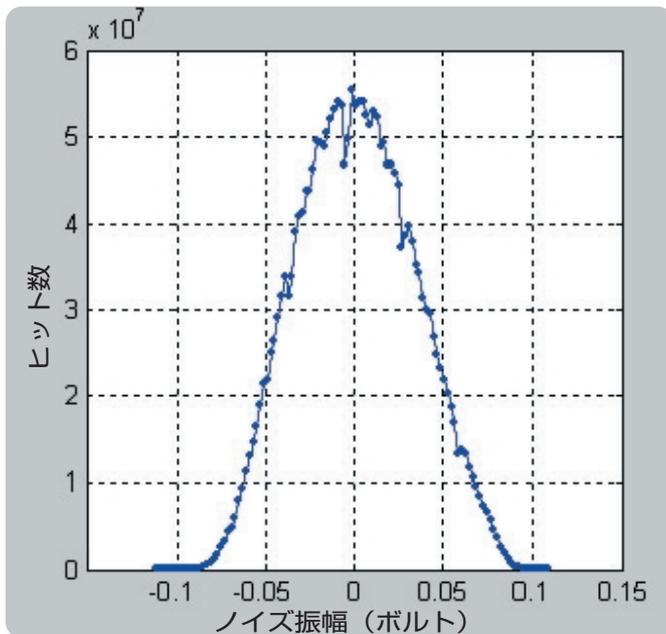
1.1 合成ジッタ

数種類のジッタ (ランダム、正弦、DDJ など) を組合わせて生成したジッタを持つ信号が必要な場合、当社の任意波形ゼネレータ (AWG) では、単純かつ簡単に発生させることができます。典型的な AWG は、D/A コンバー

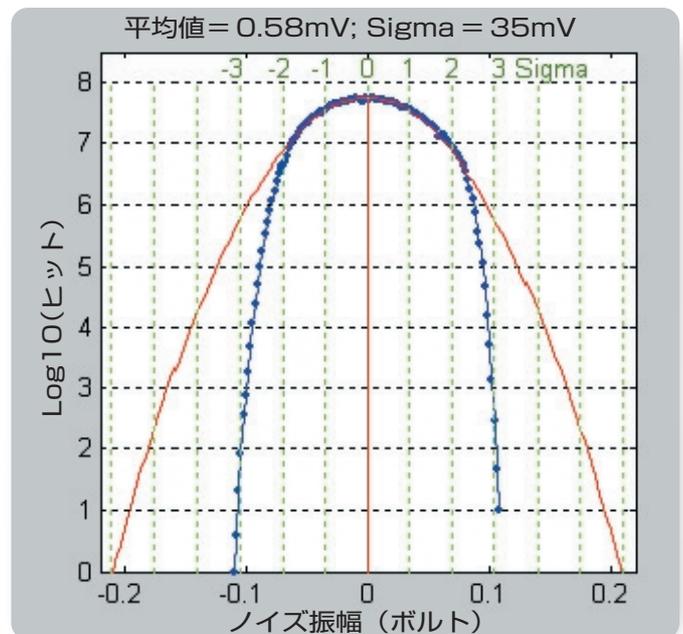
タに接続された大容量メモリ・バッファと考えることができます。波形メモリのセグメントをつなぎあわせて複雑なパターンを作成できる、プログラム可能なステート・マシンと考えることもできます。

AWGにはいくつもの魅力的な特長があります。AWGは、クロックに似た信号や考えられるあらゆるデータ・パターンを持ったデータ信号など、多くの異なる種類の信号を発生できます。立ち上がり時間やオーバershootを非常に高い精度で制御できます (これにより、さまざまなDDJを簡単に作成可能)。ランダム・ジッタの近似式を組み合わせることも可能で、AWGの出力でテストに必要なすべてのジッタを提供するために、これらのジッタを用途に合わせて組み合わせることができます。

ただし、この方法には制約があることを理解しておく必要があります。最も大きな制約になる可能性があるのは、発生できるランダム・ジッタの品質です。ほとんどのAWGで得られるデータ・パターンは (非常に長期間にわたる場合でも) 定期的に繰り返されるパターンに限られるため、このジッタは真のランダム・ジッタではなくせいぜい擬似ランダム・ジッタと呼べるものです。このような方法で作成されたジッタは見た目にはランダムであっても、そのヒストグラムから、要求の厳しい用途には適していません。これについては、セクション1.2でより詳細に説明します。



▶ 図2a. 「ガウシャン」ジッタ



▶ 図2b. 真のガウシャンとの比較

AWGで周期性のジッタ (Pj) をモデル化することはできませんが、いくつかの制約があります。パターンの長さは、パターンが繰り返されたときに不連続性が発生しないようにするために、周期性ジッタ変調の整数倍のサイクルを収めることができるほど十分な長さにする必要があります。複数の周期的な成分を使用して周期性ジッタを作成する場合、各成分に対して先に説明した規則を満たし、周期性成分の間に特別な高調波の関係を築く必要があります。また、変調する信号がクロック信号ではなくデータ信号である場合は、不連続性が発生するのを防ぐためにデータ・パターンの長さも考慮する必要があります。

合成ジッタを作成するための根本的に異なる手法として、さまざまなジッタ成分を個別に作成し、これらを組み合わせる方法があります。この手法については、セクション 1.5 で説明します。

1.2 ランダム・ジッタ

シリアル通信のテストを行う場合、ガウス確率密度関数 (PDF: Probability Density Function) を使用して平均ジッタに対しランダム・ジッタを定義します。この方法では、平均ホワイト・ガウシャン・ノイズを前提とする場合があります。この「ホワイト」とは、周波数領域で表示したときに、ノイズの decade あたりのパワーが等しいことを意味します。通常、通信リンクのガウシャン・ノイズは、低周波に他の漸近傾向 (たとえば、 $1/f$ または $1/f^2$) が見られることがありますが、高周波ではホワイ

ト・ノイズです。ガウシャン・ノイズは必ずしもホワイト・ノイズである必要はなく、またホワイト・ノイズもガウシャンである必要はないことに注意してください。

一般的に、ガウシャン電圧ノイズ (後でタイミング・ジッタに変換) を発生させる手法として、ノイズ・ゼネレータと呼ばれる機器を使用します。ノイズの生成に関して実績のある有名な製造元が少なくとも1つあります。要求の厳しい用途に対してはこのような機器を使用する方法も有効ですが、適切なパフォーマンスを得るには機器を慎重に選択する必要があります。この場合の落とし穴は、ガウシャン電圧分布が理論上制限のない振幅ピークを持つものに対して、実際の機器では必然的に出力電圧が制限されてしまうことです。電圧分布がきわめて低いレベルで切り捨てられる可能性があるため、ノイズ・ゼネレータは多くのテストに適していません。図2aでは、数分間にわたって収集された汎用ノイズ・ゼネレータの電圧分布が、リニア・スケール上に青色のヒストグラムとして示されています。一見すると、この分布はガウシャン分布と非常によく似ています。一方、垂直軸に対数スケールを使用した図2bでは、前の図と同じデータおよび、数学的に生成した真のガウス曲線 (赤) が重ねて表示されています。この図から、ノイズ・ゼネレータは、平均値の両側にざっと2標準偏差分の位置でガウス曲線から離れていることが明確になります。

ジッタ・トレランス・テストとジッタ伝達特性テストのためのコントロールジッタの生成

▶ アプリケーション・ノート

この問題を回避するために確認する必要がある重要な仕様は、機器の出力におけるRMS電圧に対するピーク電圧の比率として定義された、ノイズ・ゼネレータのクレスト・ファクタ（波高率）です。このクレスト・ファクタが不適切な場合は、ガウシアン分布が切りとられたようになり、通信リンクにおけるノイズの実際の統計値から大幅に外れることとなります。一般に、通信リンクではアイ・クロージャの仕様点として10～12のBERが使用されます。このBERはクレスト・ファクタで7.03、すなわち16.9dBに相当します。使用するノイズ・ゼネレータがこのレベルを十分に超えるクレスト・ファクタを明確に示していない場合は（または、電圧圧縮が発生する時点を示していない場合）、要求の厳しい用途に対してはノイズが適切なガウシアンになっていないと仮定する必要があります。ノイズ源があってもそれが十分なガウシアンであるか不明な場合は、付録Aで説明している、高性能オシロスコープとMATLABスクリプトを使用したソースの評価方法を参照してください。

ガウシアン電圧波形が得られたら、それをタイミング・ジッタに変換する必要があります。この作業については、セクション1.5で説明します。

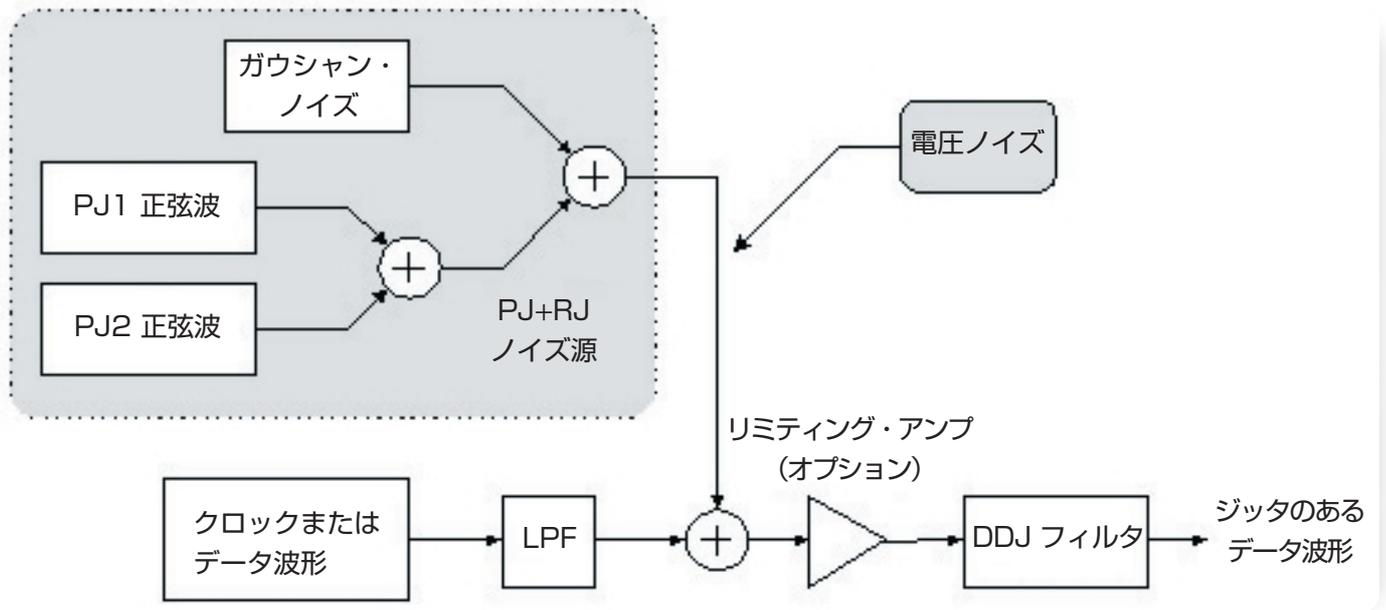
1.3 周期性ジッタ (Periodic Jitter)

最も簡単にPJ（周期性ジッタ）を生成するには、内部に正弦波オシレータとFM（またはPM）変調器を備えた信号ゼネレータを使用します。通常この手法を使用するのは、単一周波数の周期的な変調が必要な場合に限られます。複数の相関のない周波数でPJを生成する場合は、外部のFMまたはPM入力による信号源を使用できます。この場合、外部のパワー・コンバイナを使用していくつかの正弦電圧を加え、次にその結果を使用して元の信号に変調入力に乗せることができます。この手法については、セ

クション1.5でより詳細に説明します。信号源に内部または外部の変調元がある場合、変調がPJとして表示される際のピーク・ツー・ピーク・ジッタに対応する周波数の偏差を慎重に確認します。多くの場合、この方法は、何年にもわたって無線技術者によって使用されてきた非常に簡単で、正確なテクニックです。一般にBessel Null技法として知られるこのテスト方法は、周波数変調された信号のキャリア振幅が、さまざまな周波数偏差に対してゼロになるという事実を利用しています。これは、第1種0次Bessel関数で予測されています。このテストの詳細な説明については、変調無線信号に関するWebサイトまたは実践テキストを参照してください。

1.4 データ依存性ジッタ

実際の通信リンクにおいて、データ依存性ジッタ（DDJ）が発生する最も大きな原因は、高周波での信号損失と位相ずれです。意図的にリンクにDDJを追加する最も簡単な方法は、帯域制限要素を加えることです。この要素を挿入するには、長いケーブル、実際のバックプレーン、またはローパス・フィルタを使用することができます。さまざまな長さインピーダンスを持つ相互接続の高速バックプレーンは、いくつかのベンダから入手できます。この手法の利点は、導入するDDJで、実際のシステムにおけるDDJを厳密にモデル化できる可能性があることです。欠点は、導入するDDJの量をほとんど制御できないことで、その量を単独で確認することはきわめて困難です。ローパス・フィルタを挿入してDDJを導入すると、伝送チャネルの数学的なモデルを高い信頼性のレベルで知ることができる利点があります。次に、通信リンクをシミュレートし、与えられたデータ・パターンで発生するDDJの量を厳密に予測することができます。この方法では、導入するDDJの量を正確に確認できます。



▶ 図3.

1.5 ジッタ源の組み合わせ

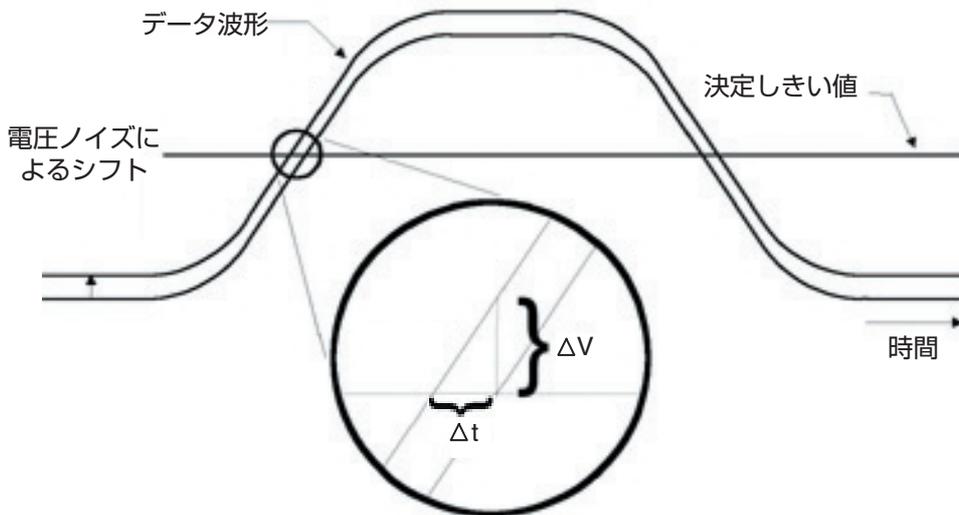
より複雑なシステムのテストに対しては、複数の障害を持つ信号を生成できます。たとえば、複数の相関のないPJ源、校正された量のガウシアン・ランダム・ジッタ、および既知の量のDDJを使用して、データを変調することができます。

これらの場合、通常は意図したPJおよびRJ成分を表す電圧波形を作成し、次にこの電圧波形を使用してデータを変調する必要があります。残念ながらこの方法は、電圧から位相への変換を行うときに予期しない欠陥が入り込みやすい欠点があります（変調されたデータ・リンクに帯域制限要素を追加する方法でもDDJを導入できます）。電圧から位相への変換を行う最も簡単な方法は、FM入力を備えたデータ・ゼネレータを使用することです。通常

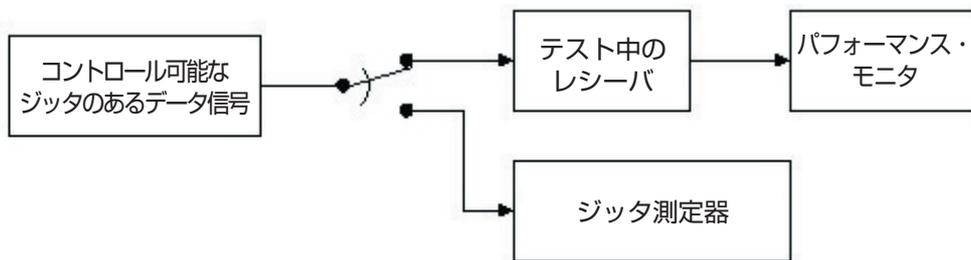
このゼネレータの内部では、FM入力はVCOに入力されています。この方法では、優先度の高い順に、帯域幅と直線性の2つに注意する必要があります。多くのゼネレータの変調入力が入力帯域幅が100MHz未満の帯域幅に制限されているため、この手法では広帯域のランダム・ノイズを加えることができません。多くのVCOは、本質的に非線形な電圧対周波数の特性を持つため、直線性にも問題があります。電圧ノイズを非常に広帯域で、タイミング・ジッタに変換できる方法の1つに、データ・エッジに比較的低速なスルー・レートを持つデータ波形に対し、パワー・コンバイナを使用して単純にノイズ電圧を加える方法があります。この手法を図3に示します。この図では、クロックまたはデータ波形のエッジが高速にならないように、ローパス・フィルタが使用されています。

ジッタ・トレランス・テストとジッタ伝達特性テストのためのコントロールジッタの生成

▶ アプリケーション・ノート



▶ 図4.



▶ 図5. ジッタ・トレランス・テスト用の一般的なセットアップ

エッジ検出しきい値の範囲内では、ノイズ波形がデータ波形を押し上げたり引き下げたりするため、しきい値を通過するときに順方向または逆方向のバイアスが瞬時にかけられます。たとえば、データ波形に 10V/ns で立上るエッジがある場合、波形が上方向に 50mV シフトすると、しきい値を 5ps 早く通過することになります。このため、信号のスルー・レートで、電圧からタイミングへ変換するゲインが効果的に設定されます。図 4 はこの様子を示しています。電圧からタイミングへの変換に続いて、任意でリミティング・アンプを使用して高速エッジを復元できます。この手法は少量のジッタを加えるときには役立ちますが、波形転送に線形性がある場合にも、電圧からタイミングへのジッタ変換の線形性が確保されます。波形が最大波形または最小波形に近づくと、スルー・レート

の変化によって変換はより非線形になります。ランダム・ノイズはこのように高い「ピーク対平均」比率を持つため、この方法を使用するのは非常に少量のランダム・ジッタが必要な場合に限定する必要があります。

セクション 2 : ジッタ・テストのシナリオ

2.1 ジッタ・トレランス

ジッタ・トレランスとは、デバイスが公称の性能を維持することができる、許容可能なタイミング・ジッタ量を意味します。このテストには、ジッタ制御が可能なデータ・ソース、ジッタ信号の特性を確認する方法、および被測定レシーバが、その性能を満たしているか検出できる方法が必要です。図 5 に代表的なブロック図を示します。

入力信号のジッタは、標準規格に応じてさまざまな形態になることがあります。たとえば、SONETのテストでは、正弦位相変調すなわちPJの形態のジッタが必要です。このジッタは、振幅がコンプライアンス・マスクに従って調整されるときに、定められた周波数を掃引または段階的に変化します。この信号では、特定レベルのランダム・ジッタは不要で、実際にはRJを無視できると仮定しています。セクション1.3で説明した方法は、この種類のテストに対する要件を簡単に満たすことができます。

SONETのテストとは対照的に、SATAの仕様では、さまざまなランダム・ジッタとデターミニスティック・ジッタが含まれたテスト信号が必要です。このテスト信号の作成には、十分に注意が必要です。特に、切り捨てられたヒストグラムを持つRJソースを使用すると、ランダム・ジッタ・ノイズがよりガウシアンに近い状態で不合格になるデバイスであっても、これを合格させてしまう可能性があります。 10^{-12} BERレベルを超える忠実度のガウシアン分布が必要であるため、多くのAWGは十分に機能を果たすことができません。

2.2 ジッタ伝達特性

ジッタ伝達特性は、デバイスまたはシステムの出力時に存在するジッタ量を、特定の入力時のジッタ量と比較して求めます。通常この比率は周波数領域で指定され、ボーデ・プロットとして表現されたコンプライアンス・マスクと比較されます。

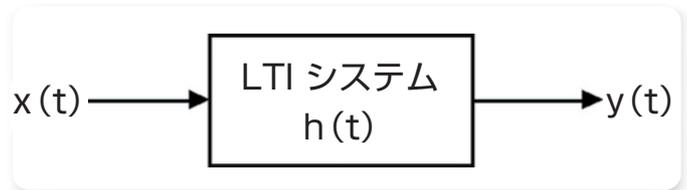
2.2.1 線形システム理論の概要

図6に示すような、入力 $x(t)$ 、出力 $y(t)$ 、およびインパルス・レスポンス $h(t)$ を持つ線形時間不変システムのブロック図について検討します。

古典的な線形システム理論では、図のようなシステムの伝達関数は次のようになります。

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)}$$

ここで、 $X(s)$ は $x(t)$ のラプラス変換を表し、 $s = \sigma + j\omega$ は複素数周波数を表します。実際のシステムのレスポンスの測定が目的であるため、 $\sigma = 0$ とします。



▶ 図6.

また、ラプラス変換はフーリエ変換に置き換えることができます。したがって、実質的には伝達関数は次のようになります。

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)}$$

各種の用途で、振幅レスポンスが状態を適切に表すため、最終的に次のような式になります。

$$|H(j\omega)| = \left| \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} \right| = \frac{|Y(j\omega)|}{|X(j\omega)|}$$

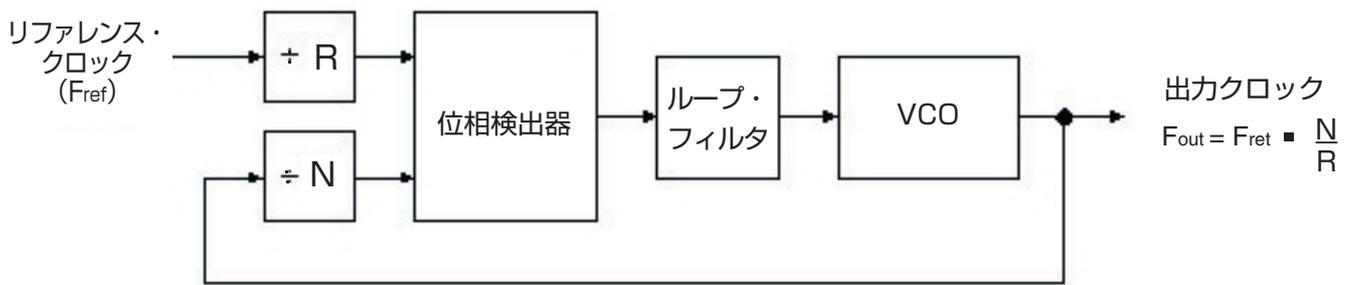
図6では、信号 $x(t)$ と $y(t)$ は、通常これらのポイントにおける実際の電圧波形を表します。ただし、それぞれデバイスの入力および出力における時間領域ジッタ変調を表すよう、これらの波形を容易に対応付けることができます。この場合、 $X(j\omega)$ は周波数領域で表現されたデバイスへの入力におけるジッタ変調を表し、 $Y(j\omega)$ は出力におけるジッタ変調を表します。この解釈に従うと、 $H(j\omega)$ はジッタ伝達関数になります。

2.2.2 TDSJIT3 v2.0における伝達関数プロットの設定

TDSJIT3 v2.0を使用すると、多くの事例においてデバイスを通るジッタ伝達関数の振幅を直接測定することができます。この測定を行うには、デバイスの入力と出力を同時にプロービングし、両方のポイントで同じ測定方法（すなわち、データ周期測定）を設定します。アキュジションが完了したら、Plot（プロット）、Create（作成）の順に選択して、さまざまなプロット方法の選択を表示します。ユーザ・インタフェースの左側の表で、出力ジッタ（図6の $y(t)$ ）に対応する測定方法を選択し、次にTransfer Function（伝達関数）ボタンを選択します。表示されるダイアログ・ボックスに、選択した測定方法が伝達関数式の分子として示されます。分母に対しては、入力ジッタ（図6の $x(t)$ ）に対応する測定方法を選択し、OK（OK）を選択します。

ジッタ・トレランス・テストとジッタ伝達特性テストのためのコントロールジッタの生成

▶ アプリケーション・ノート



▶ 図7.

結果のプロット・ウィンドウでは、入力ジッタの振幅で除算された出力ジッタの周波数領域の振幅が、対数・対数軸上に表示されます。スペクトラム振幅の実際の測定は、一定量のノイズによる影響を受けているため、プロットした波形に誤ったピークや谷が表示されることがあります。より正確なプロットを行うには、TDSJIT3 v2.0をフリーラン・モードにして、複数の測定値を取り込みます。デフォルトでは、このプロットはそれ以降の測定結果を含めた平均になり、複数のアキュイジションで平均化することにより、測定ノイズが大幅に低減されます。この手法は、入力と出力が同じレートになっていないデバイスにも利用できます。この事例は2番目の例で説明します。

2.2.3 例1：CDRの評価

伝達関数は、クロック・データ・リカバリ (CDR) デバイスで使用されるような、フェーズ・ロック・ループ (PLL：Phase-Locked Loop) の特性を評価する場合に非常に役立ちます。正しく機能するCDRは、入力信号の低周波の時間変動をトラッキングします。CDRのループ帯域幅を大幅に超える時間変動 (すなわち、ジッタ) はトラッキングできません。このような高い周波数では、デバイスの出力におけるジッタは、CDRのVCOのジッタで制御する必要があります。これら2つの範囲の間では、PLLがジッタ・ピーク発生の原因になる場合があります。

CDRのジッタ伝達曲線をプロットするには、CDRで追跡する入力波形に、そのCDR本来のノイズよりはるかに大きいジッタ・ノイズがあると都合がいいです。このジッタは、スペクトラム全体に十分に分散しては必要ありません (すなわち、「ホワイト」)、ガウシアンである必要はありません。したがって、この場合には汎用AWG、またはノイズ・ジェネレータをデータ・ソースとして使用することができます。

CDRはそのループ帯域幅内にあるジッタをトラッキングするため、低周波では伝達関数が0dBのゲインを持っている必要があります。CDR本来のジッタが入力信号のジッタより低い場合、ジッタ伝達関数をPLL帯域幅ポイントの近くで、20dB/decadeのレートまで引き下げる必要があります (タイプ2 PLLでは、実際にはブレイクポイントはPLL帯域幅より少し下にあります。この理由については、「リアルタイム・オシロスコープを使用したフェーズ・ロック・ループ・システムの評価」を参照してください)。

2.2.4 例2：PLL クロック乗算器

フェーズ・ロック・ループは、図7に示すような方法で、リファレンス・クロックを乗算して高い周波数にする場合によく使用されます。理論上は、ループ帯域幅内での出力におけるジッタは、リファレンス・クロックのジッタに分割比（この場合は、 N/R ）を乗算したものに等しくなります。ループ帯域幅より外側の領域では、出力のジッタはループのVCOのジッタに応じて決まります。ただし、電源ノイズといった、ジッタが発生する他の要因を設計に取り入れる場合は、この理論は成り立ちません。

周波数領域でジッタを表示する場合、表示できる最も高いジッタ周波数はクロック・レートの半分になります。（これは、アクティブなクロック・エッジの位相は、クロック・サイクルごとに1回だけサンプリングが可能で、ナイキスト理論によるとクロック・レートの半分より高いジッタ周波数成分は、エイリアシングによってより低い周波数に代わってしまうためです）。

TDSJIT3 v2.0を使用すると、 F_{out} 上のジッタ対 F_r 上のジッタの伝達関数をプロットできます。これを行うには、入力と出力にそれぞれ1つのTIE測定を設定し、 TIE_{out}/TIE_{ref} をプロットします。分子と分母のクロック・レートが異なる場合、TDSJIT3 v2.0はいずれかの低いレートを自動的に使用して、周波数軸に対する右側の制限を決定します。

最後の例のように、変調したクロックを使用すると、PLLによって入力から出力までジッタが転送される状況を調べることができます。また、前で説明したように、このようなテスト方法は、ジッタ生成に対する極端な要求には対応できません。

2.3 テスト機器の検証

今日では数多くのジッタ測定システムがあり、さまざまな価格、利便性、柔軟性、技術的な能力、および公称性

能の製品が利用可能です。設計エンジニアや資格を持つエンジニアにとって面倒な作業の1つに、利用可能なソリューションを比較し、その用途に最適なものを選択することがあります。この選択における重要な要素は、機器またはシステムの精度と再現性に対する評価です。

公称性能を検証する手法の1つに、機器のジッタの結果を、一般的にはBERTのような信頼されている基準機器のものと比較する方法があります。通常この方法は信頼できる手法ですが、BERTにもエラーの要因はあります。ジッタ測定の方法と技術が確立されるにしたがって、最終的な判定機器としてBERTを使用する方法は、見直されるようになっていきます。パフォーマンスを検証する別の手法では、実際のジッタが「既知」である信号を作成し、測定された結果を予想される値と比較します。ジッタに関しては一般に認められた基準がないため、この分野で評価を行おうとする人が利用できる技術ガイドはほとんどありません。残念ながら、すべてを正しく評価する方法に比べ間違った評価を行う方法のほうが多くあります。テスト機器を評価する作業は、ジッタを生成する厳しいテストであるため、これを当然のこととして受け入れることはできません。この分野で作業を行おうとする場合は、確率分布および周波数偏差と位相偏差の検証に関するセクション1のすべての説明を十分に検討してください。

TDSJIT3 v2.0は、ジッタが多く単発測定から得た統計の結果であるという仮定に基づいています。このため、個別の測定に対して基準となる機器の精度の仕様を適用すると、合成ジッタの精度を推測することができます。分離方法の精度またはRJとDJそれぞれの結果の精度を指定することは困難です。スペクトラム分離法は、さまざまなジッタ成分を直接表示することができ、どの方法でも間違いやすい、機器のノイズ・フロアに対する感度に関しては、利用可能なうち最も精度の高い方法と考えられています。

ジッタ・トレランス・テストとジッタ伝達特性テストのためのコントロールジッタの生成

▶ アプリケーション・ノート

まとめ

ジッタのパフォーマンスを評価する場合は、特性が既知の意図的なジッタが含まれた信号源があると役に立ち、またはそれが必須になる場合があります。この一見簡単そうな目標の達成が、きわめて困難である場合があります。幸い、多くの実際の作業では理論レベルのジッタを必要としません。それぞれの用途で重要なジッタの特性を理解することにより、可能な限りコストを節約しながら要求を満たす機器を使用し、安易な方法で判断の間違いから高価な対価を払う状況になることを回避できます。

RJとDJのスペクトラム分離法は、さまざまなジッタ成分を直接表示できるため、利用できる最も精度の高い方法と考えられています。他のすべての実装方法と同じように、測定ハードウェアのノイズ・フロアによって、得られるパフォーマンスの実用上の限度が制限されます。

用語集および略語

AM	振幅変調
AWG	任意波形ゼネレータ
BER	ビット・エラー・レート
BERT	ビット・エラー・レート・テスト
CDR	クロック・データ・リカバリ
DDJ	データ依存ジッタ
FM	周波数変調
ISI	シンボル間干渉
PDF	確率密度関数
PJ	周期性ジッタ
PLL	フェーズ・ロック・ループ
PM	位相変調
PRBS	擬似ランダム・バイナリ・シーケンス
SJ	正弦ジッタ
VCO	電圧制御オシレータ

付録 A：ガウシアン電圧波形の確認

次の手順を使用すると、名目上のガウシアン・ノイズ・ソースを調べ、振幅の分布が理論上のガウス曲線とどの程度正確に一致するか確認できます。この手順は、データのアクイジションと解析の2つのステップで構成されています。実行するには、高性能オシロスコープとMATLAB*解析アプリケーションにアクセスする手段が必要です。

データのアクイジションは、当社TDS5000シリーズ、TDS6000シリーズ、またはTDS7000シリーズ・オシロスコープ上で実行するものとして説明していますが、適切な変更を行えば、ヒストグラムを測定してエクスポートする能力を持つ、他のオシロスコープ上でも同じ技法を使用できる場合があります。

解析にはMATLABスクリプトを使用します。以下の説明は、MATLABの使用方法に習熟していない場合でも、解析を正しく実行できることを目的にしています。

A.1：データのアクイジション

ノイズ源の振幅分布を確認するため、ノイズ源の出力は、オシロスコープのチャンネル1に直接接続する必要があります。オシロスコープのサンプル・レートは、ノイズ源の帯域幅より数倍高く設定し、垂直方向の感度は、標準的なアクイジションでの波形のピークが、オシロスコープのデジタイザのダイナミック・レンジの25～35%を超えないように設定します。このように設定すると、時々発生する高いピークをクリッピングしないで取込むことができます。波形の長さは必要に応じて設定できますが、レコード長が長くなればなるほど、短いレコードに比べてより急速に統計データが蓄積されます。

次の手順は、ヒストグラム測定を設定する場合に使用できます。

1. 上の説明に従って、オシロスコープの垂直軸と水平軸の感度およびレコード長を調整します。垂直バー・カーソルをオンにし、これらのカーソルを使用して、目盛の左端と右端に対応する時間位置を見つけます。同様に、水平バー・カーソルを使用して、目盛の最上部と最下部に対応する電圧を見つけます。
2. オシロスコープの最上部のバーを「Menu」（メニュー）モードに設定し（「Buttons」（ボタン）ではありません）、Measure（測定）、Waveform Histograms…（波形ヒストグラム…）の順に選択します。波形ソースをCh1、ヒストグラムのモードを「Vert」（垂直軸）に設定します。ヒストグラムのスケールは対数に設定します。対数スケールに設定すると、ガウス曲線の下部を明瞭に表示することができます。エクスポートされたデータは、どのイベントにおいても線形性を保つことに注意してください。手順1で説明したように、Left Limit（左制限）とRight Limit（右制限）コントロールを、目盛の左端と右端に対する時間値に設定します。同様に、Top Limit（上制限）とBottom Limit（下制限）を、目盛の最上部および最下部の電圧に一致するように設定します。これでヒストグラム・ボックスに表示スクリーン全体が収まり、目盛の左側にヒストグラムが表示されます。
3. オシロスコープをしばらくの間フリーラン・モードで実行します。7-sigmaレベルに近い統計を累積するには、通常は一晚以上実行する必要があります。ノイズ源がガウシアンから大幅に外れる場合は、この実行時間が短かったことを示している可能性があります。
4. 取込まれたヒストグラムをエクスポートします。File（ファイル）、Export Setup…（エクスポート設定…）の順に選択し、Measurements（測定）タブに移動します。Histogram Data (CSV)（ヒストグラム・データ（CSV））ラジオ・ボタンを選択し、Export（エクスポート）を選択します。これにより、2つの列を持つASCIIテキスト・ファイルが保存されます。最初の列には、ヒストグラムのビン値（この場合はボルト）が格納されます。2番目の列には、対応するビンの母集団が格納されます。

*MATLABはThe Mathworks, Inc. (www.mathworks.com) の登録商標です。

ジッタ・トレランス・テストとジッタ伝達特性テストのためのコントロールジッタの生成

▶ アプリケーション・ノート

A.2 : データの解析

この付録の最後に掲載されているスクリプト「check_gaussian_match.m」を使用して、MATLABでデータを解析します。次の手順を使用します。

1. 任意の作業ディレクトリに、エクスポートしたヒストグラム・ファイルとMATLABスクリプトを配置します。MATLABアプリケーションを起動し、右上隅にある現在のディレクトリ・パスの横の参照ボタン(「…」)を使用して作業ディレクトリに移動します。
2. MATLAB プロンプトに、次のように入力します。

```
>> load filename.csv -ascii
```

ここで、>>はMATLABプロンプトを表し、filename.csvはエクスポートに使用した実際の名前です。これで、エクスポートしたファイルの名前をデータ・マトリックスの名前として使用されたヒストグラム・データが、MATLABワークスペースにロードされます。次のように入力すると、マトリックスの名前を確認できます。

```
>> whos
```

このコマンドで、ロードされたすべてのデータ・オブジェクトの要約が表示されます。

3. ヒストグラム・データの名前を、解析スクリプトで要求されている「my_hist」に変更します。名前を変更するには、次のように入力します。

```
>> my_hist = filename;
```

このコマンドを実行すると、ヒストグラムのコピーが「my_hist」という名前で作成されます。

4. MATLABプロンプトに、次のように入力します。

```
>> check_gaussian_match
```

このコマンドで解析スクリプトが実行されます。結果として、実際に測定されたヒストグラムが青色で、最も適合するガウス曲線が赤色でプロットされて示されます。垂直の線は、平均および±1、±2、…±7 sigmaポイントを表します。2つの曲線に大きな違いがある(これは、ノイズ・ソースの出力振幅が圧縮されるためです)ことが明確にわかり、ノイズ源がガウス曲線と一致する範囲を知ることができます。

MATLABに習熟しているかまたは興味があれば、任意のテキスト・エディタを使用して解析スクリプトを調べ、スクリプトの変更を検討してみてください。

A.3 : テクニカル・ノート

理論上のガウス曲線は、測定したヒストグラムの母集団に従って各ヒストグラム・ポイントを重み付けした後で、ヒストグラム・データに対して次の関数でカーブ・フィッティングすると表示できます。

$$H(x) = yMax * e^{\frac{-(x-meanValue)^2}{2*sigma^2}}$$

yMax、sigma、およびmeanValueの3つのパラメータすべてを調整すると、最も適合するカーブが見つかります(ヒストグラムとpdfの間の正規化因子を考慮するには、主要項yMaxを通常項1/(sigma*sqrt(2*pi))に置換します)。カーブ・フィッティングは、重み付けされたヒストグラム・ポイントと、理論上のガウス曲線間の平均二乗誤差に対する制約のない非線形な最小化手法です。

A.4 : MATLAB スクリプト

任意のテキスト・エディタを使用して、次のスクリプトをファイル「check_Gaussian_match.m」に保存してください。

```
% Script to verify the match between a measured histogram and the
% best-fit mathematically-computed Gaussian:
%   Measured histogram in blue.
%   Computed Gaussian in red.
%   Red vertical line at mean value
%   Green vertical lines at 1, 2, 3, ... 7 sigma points

% Set these to 1 or 0 as desired
plot_error_curve = 1;   % Plot error between measured and theoretical, in green
plot_logarithmic = 1;   % Use log or linear vertical scale

pp = my_hist(:,2); % bin populations
ii = my_hist(:,1); % bin positions

% Initial estimate of the peak value of the non-normalized Gaussian
yMax = max(pp);

% Initial estimates of the mean and sigma
x_temp = find(pp > 0.6065*yMax);
x1 = x_temp(1);      % Right one-sigma bin (approx.)
x2 = x_temp(end);   % Left one-sigma bin (approx.)
sigma = abs(ii(x1) - ii(x2))/2;
meanValue = mean(ii([x1 x2]));

ibn = find(pp > 0.9); % Find indexes of all bins that are not empty
bn = ii(ibn);        % Histogram bin values for non-empty bins
```

ジッタ・トレランス・テストとジッタ伝達特性テストのためのコントロールジッタの生成

▶ アプリケーション・ノート

```
% Find optimum curve fit
X = fminsearch(...
    inline('norm((pp-x(3)*exp(-((ii-x(2)).^2)/(2*x(1)^2))).*pp)', 'x', 'pp', 'ii'),...
    [sigma;meanValue;yMax], [], pp, ii);
sigma = X(1); meanValue = X(2); yMax = X(3);
b = (-7:0.1:7)*sigma + meanValue;    % Bin values where we compute ideal Gaussian
h = yMax * exp(-((b-meanValue).^2)/(2*sigma^2));

if plot_error_curve,
    % Find indexes of bins for which we have a confident measurement (at least 10 hits)
    % We will only plot the error curve for these bins
    ibg = find(pp > 9);
    bg = ii(ibg);

    hg = yMax * exp(-((bg-meanValue).^2)/(2*sigma^2));
    percentError = 100*((hg - pp(ibg))./hg);
end

% Now plot results
if plot_logarithmic,
    % Use log vertical scale (recommended)
    if plot_error_curve,
        [haxes,h11,h12] = plotyy(bn,log10(pp(ibn)),bg,percentError);
        set(get(haxes(2), 'ylabel'), 'string', 'Error (%)')
        set(h12, 'color', [0 0.5 0]);
    else
        plot(bn,log10(pp(ibn)), '-.')    % Plot actual measurements
    end
    hold on;
    plot(b,log10(h), 'r');                % Plot theoretical Gaussian
```

```

% Plot vertical lines to show sigma intervals
plot([1;1]*(-7:7)*sigma + meanValue,[0;log10(yMax)]*ones(1,15),'g');
plot([1;1]*meanValue,[0;log10(yMax)],'r');

ylabel('Log10 ( Hits )');

else
% Use linear vertical scale
if plot_error_curve,
[haxes,hl1,hl2] = plotyy(bn,pp(ibn),bg,percentError);
set(get(haxes(2),'ylabel'),'string','Error (%)')
set(hl2,'color',[0 0.5 0]);
else
plot(bn,pp(ibn),'.-') % Plot actual measurements
end
hold on;
plot(b,h,'r'); % Plot theoretical Gaussian

% Plot vertical lines to show sigma intervals
plot([1;1]*(-7:7)*sigma + meanValue,[0;yMax]*ones(1,15),'g');
plot([1;1]*meanValue,[0;yMax],'r');

ylabel('Number of Hits');

end

title(['Mean Value = ' num2str(meanValue) ' ; Sigma = ' num2str(sigma)])
xlabel('Noise Amplitude ( Volts )');
hold off; grid on; zoom on;

```

DPO — デジタル・フォスファ技術

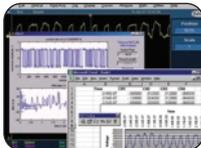
百聞は一見にしかず



デジタル・フォスファ・オシロスコープ (DPO) は、各種アプリケーション、コミュニケーション・マスク・テスト、間欠的に発生する信号のデジタル・デバッグ、定型のデジタル設計、タイミング・アプリケーションなどを扱い、ユーザにとって理想的な最良の設計ツールとトラブルシューティング・ツールを提供します。当社は、100MHzから7GHzの広い帯域幅をカバーし、新しい世界を開くためのDPOを各種取り揃えています。

OpenChoice®

豊富な選択肢を持つネットワーク・ソリューションと解析ソリューションを提供します。



OpenChoiceには、ソフトウェア・ライブラリ、ユーティリティ、サンプル、業界の標準プロトコル、およびインタフェースが集められ、Tektronixの多数のオシロスコープとロジック・アナライザに提供されています。OpenChoiceを利用すると、GPIO、イーサネット、RS-232、共有メモリなどのさまざまなコネクティビティ・プロトコルと物理インタフェースを使用して、60MHzから15GHzに至るまでのオシロスコープやロジック・アナライザとネットワークを介して通信できます。

TekConnect®

簡単な操作で優れた信号忠実度と比類ない汎用性



TekConnectインタフェースを利用すると、プローブの機能をより向上させて、高電圧、電流、パワー、そして μ Vレベルの信号を測定できます。TekConnectインタフェースでは、オシロスコープ入力で最大18GHzまでのバンドパスを提供し、優れた信号忠実度を達成しながら、比類ない汎用性も確保しています。TekConnectインタフェースを利用すると、最高のシグナル・インテグリティを維持し、現在または将来の帯域幅の増加に対応することができます。

Oscilloscope Software

オシロスコープ・ソフトウェア 汎用オシロスコープで、極めて専門的な解析を実行できるようになります。



当社は、独自技術と手順ノウハウをオシロスコープに組込む優れたアプリケーション・ソリューションを提供し、専門性の高い製品の開発と試験を大幅に簡素化しています。シリアル・データの標準規格からパワー測定に至るまで、当社は、さまざまな種類のオシロスコープ・ソフトウェアを用意し、オシロスコープを極めて専門的で強力な解析ツールとして提供します。

Tektronix お問い合わせ先:

東南アジア諸国/オーストラリア (65) 6356 3900

オーストリア +41 52 675 3777

バルカン半島/イスラエル/アフリカ南部諸国およびISE 諸国 +41 52

675 3777

ベルギー 07 81 60166

ブラジルおよび南米 55 (11) 3741-8360

カナダ 1 (800) 661-5625

中東ヨーロッパ/ウクライナおよびバルト海諸国 +41 52 675 3777

中央ヨーロッパおよびギリシャ +41 52 675 3777

デンマーク +45 80 88 1401

フィンランド +41 52 675 3777

フランスおよび北アフリカ +33 (0) 1 69 86 81 81

ドイツ +49 (221) 94 77 400

香港 (852) 2585-6688

インド (91) 80-22275577

イタリア +39 (02) 25086 1

日本 81 (3) 6714-3010

ルクセンブルグ +44 (0) 1344 392400

メキシコ、中米およびカリブ海諸国 52 (55) 56666-333

中東アジア/北アフリカ +41 52 675 3777

オランダ 090 02 021797

ノルウェー 800 16098

中華人民共和国 86 (10) 6235 1230

ポーランド +41 52 675 3777

ポルトガル 80 08 12370

大韓民国 82 (2) 528-5299

ロシアおよびCIS 諸国 7 095 775 1064

南アフリカ +27 11 254 8360

スペイン (+34) 901 988 054

スウェーデン 020 08 80371

スイス +41 52 675 3777

台湾 886 (2) 2722-9622

イギリスおよびアイルランド +44 (0) 1344 392400

アメリカ 1 (800) 426-2200

その他の地域からのお問い合わせ 1 (503) 627-7111

Updated 5 January 2006

詳細について

当社は、最先端テクノロジーに携わるエンジニアのために、資料を用意しています。当社ホームページ(www.tektronix.co.jp)またはwww.tektronix.comをご参照ください。



Copyright © 2006, Tektronix. All rights reserved. Tektronix製品は、米国およびその他の国の取得済みおよび出願中の特許により保護されています。本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およびTEKはTektronix, Inc.の登録商標です。その他本書に記載されている商品名は、各社のサービスマーク、商標または登録商標です。

1/05 FLG/WOW

61Z-18431-3

日本テクトロニクス株式会社

東京都港区港南2-15-2 品川インターシティB棟6階 〒108-6106
製品についてのご質問・ご相談は、お客様コールセンターまでお問い合わせください。

TEL 03-6714-3010 FAX 0120-046-011

電話受付時間/9:00~12:00/13:00~18:00 月曜~金曜(祝日は除く)

当社ホームページをご覧ください。 www.tektronix.co.jp
お客様コールセンター ccc.jp@tektronix.com