

# 信号発生器のすべて

XYZs of Signal Generators





## 信号発生器のすべて

### 目次

<b>完全な測定システム</b> .....	<b>5</b>
<b>信号発生器</b> .....	<b>6</b>
アナログとデジタル .....	7
<b>信号発生器の基本的なアプリケーション</b> .....	<b>8</b>
検証 .....	8
デジタル変調送受信機のテスト .....	8
評価 .....	8
D/A および A/D コンバータのテスト .....	8
ストレス/マージン・テスト .....	9
通信レシーバに対するストレス追加 .....	9
信号生成の手法 .....	9
<b>波形の概要</b> .....	<b>10</b>
波形の特性 .....	10
振幅、周波数および位相 .....	10
立上りと立下り時間 .....	10
パルス幅 .....	11
オフセット .....	12
差動信号とシングルエンド信号 .....	12
基本波形 .....	13
正弦波 .....	13
方形波と矩形波 .....	13
のこぎり波と三角波 .....	14
ステップ波とパルス波 .....	14
複雑な波形 .....	15
信号変調 .....	15
アナログ変調 .....	15
デジタル変調 .....	15
周波数掃引 .....	16
直交変調 .....	16
デジタル・パターンとデジタル・フォーマット .....	16
ビット・ストリーム .....	17

# 信号発生器のすべて

## ▶ 入門書

<b>信号発生器の種類</b> .....	<b>17</b>
<b>アナログおよびミックスド信号発生器</b> .....	<b>18</b>
アナログおよびミックスド信号発生器の種類 .....	18
任意ジェネレータ .....	18
任意波形／ファンクション・ジェネレータ (AFG) .....	18
任意波形ジェネレータ (AWG) .....	20
ミックスド信号発生器のシステムと操作パネル .....	22
性能に関する用語と注意事項 .....	24
メモリ容量 (レコード長) .....	24
サンプル (クロック) レート .....	24
周波数帯域 .....	26
垂直軸 (振幅) 分解能 .....	26
水平軸 (タイミング) 分解能 .....	27
シフト／ローテート .....	27
出力チャンネル .....	28
デジタル出力 .....	28
フィルタリング .....	29
シーケンス機能 .....	29
統合エディタ .....	31
データのインポート機能 .....	32
ミックスド信号発生器を使用した波形生成 .....	33
ArbExpress による波形作成 .....	34
AWG のアプリケーションの傾向 .....	35
プリエンファシス／ディエンファシス信号の生成 .....	35
マルチレベル信号の生成 .....	35
広帯域 RF 信号の生成 .....	36
無線 I/Q および IF 信号の生成 .....	36
<b>ロジック信号発生器</b> .....	<b>37</b>
ロジック信号発生器の種類 .....	37
パルス・パターン・ジェネレータ (PPG) .....	37
データ・タイミング・ジェネレータ (DTG) .....	37
ロジック信号発生器のシステムと操作パネル .....	42
性能に関する用語と注意事項 .....	43
データ・レート .....	43
パターン長 .....	43
垂直軸 (振幅) 分解能 .....	43
水平軸 (タイミング) 分解能 .....	43
出力チャンネル .....	44
シーケンス機能 .....	44
統合エディタ .....	44
データのインポート機能 .....	44
ロジック信号発生器を使用した波形生成 .....	45
<b>まとめ</b> .....	<b>46</b>
<b>用語集</b> .....	<b>47</b>

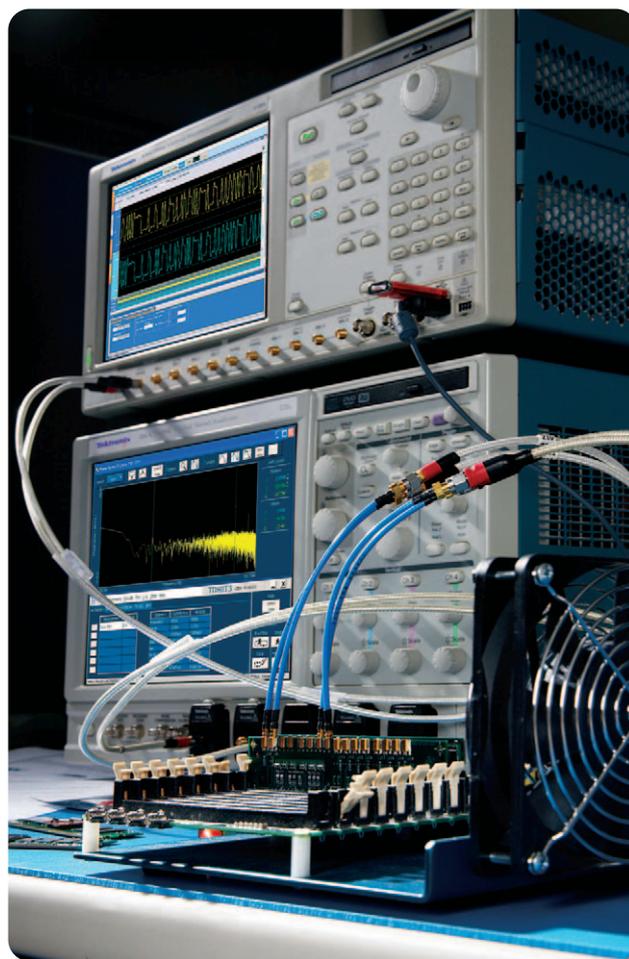
## 完全な測定システム

電子測定を行う場合に必要な機器としてまず思い浮かぶのは、おそらくオシロスコープやロジック・アナライザなどのアキュイジション計測器でしょう。しかし、これらの計測器は、何らかの信号を取り込むことができなければ役に立ちません。取り込むべき信号自体が存在せず、外部の信号発生器を用意しなければならないケースも多くあります。

たとえば、歪みゲージ増幅器はセンサで受信した信号を増幅するだけで、それ自体が信号を生成することはありません。デジタル・アドレス・バス上のマルチプレクサも、カウンタやレジスタなどのデバイスからの信号トラフィックを処理するだけで、やはり信号は生成しません。しかし、増幅器やマルチプレクサを回路に接続するには、当然、事前のテストが必要です。アキュイジション計測器でこれらのデバイスの動作を測定するには、デバイスに信号を加え動作させなければなりません。

また、新しいハードウェアの開発では、目的とする設計仕様を完璧に満たしてなお余裕があるかどうか、その動作を評価する必要があります。このようなテスト（マージン・テストまたはリミット・テストと言う）では、信号生成能力と測定能力を併せ持つソリューションが必要です。デジタル信号を扱う機器を設計する場合とアナログまたはミックスド信号を扱う機器を設計する場合とでは使用するツールが異なっても、どちらもアキュイジション計測器と信号発生器を必要とするという点では同じです。

信号発生器（信号ジェネレータ）はアキュイジション計測器と対になる機器であり、この2つが揃って初めて完全な測定ソリューションになります。図1では、この2種類の計測器はDUT（被測定装置）の入出力端子のそばに置かれています。信号発生器は、設定をさまざまに変更することで、アナログ波形、デジタル・データ・パターン、変調、歪み、ノイズなどの信号を供給できます。設計、評価、トラブルシューティングを効果的に行うためには、ソリューションを構成するこの2つの機器が不可欠です。



▶ 図1. ほとんどの測定では、アキュイジション計測器と信号発生器を組み合わせたソリューションが必要です。トリガ接続により、DUT出力信号の取り込みが簡単になります。

## 信号発生器のすべて

### ▶ 入門書

本書では、信号発生器の概要と役割、およびその用途について説明します。各種信号発生器とその機能を理解することは、研究者、エンジニア、測定技術者としての必須条件です。正しいツールを選択すれば、作業がはかどり、信頼できる結果をすぐに得ることができます。

この入門書では、以下の項目について説明します。

- ▶ 信号発生器の動作原理
- ▶ 信号波形の種類
- ▶ ミックスド信号発生器とロジック信号発生器の違い
- ▶ 信号発生器の基本的な操作方法
- ▶ 簡単な波形の生成方法

本書について不明な点やご質問などがありましたら、当社お客様コールセンターまでお問い合わせください。または [www.tektronix.co.jp/signal\\_sources](http://www.tektronix.co.jp/signal_sources) を参照してください。

## 信号発生器

信号発生器とは、その名が示す通り、電子測定で被測定回路を動作させるために使用する信号源のことです。ほとんどの回路は、時間とともに振幅が変化する、ある種の入力信号を必要とします。信号は、グラウンド・リファレンス・ポイントの上下でピークが変動する、真の双極 AC<sup>1</sup> 信号であることもあれば、DC オフセット電圧レンジを超えて正負のいずれかに変化することもあります。正弦波などのアナログ関数、デジタル・パルス、バイナリ・パターン、または任意の波形であることもあります。

信号発生器で生成できるのは「理想的」な波形だけではありません。既知の歪み（エラー）の量と種類を再現し、それらを出力信号に印加することもできます（図 2 参照）。これは信号発生器の最大の長所の 1 つです。非測定回路だけでは、必要とする（予測可能な）歪みを必要なタイミングと場所で再現することができない場合もよくあります。歪みのある信号を DUT に供給し、その応答を観察することにより、通常のパフォーマンスを超えるストレスがかかったときの耐久性を知ることができます。

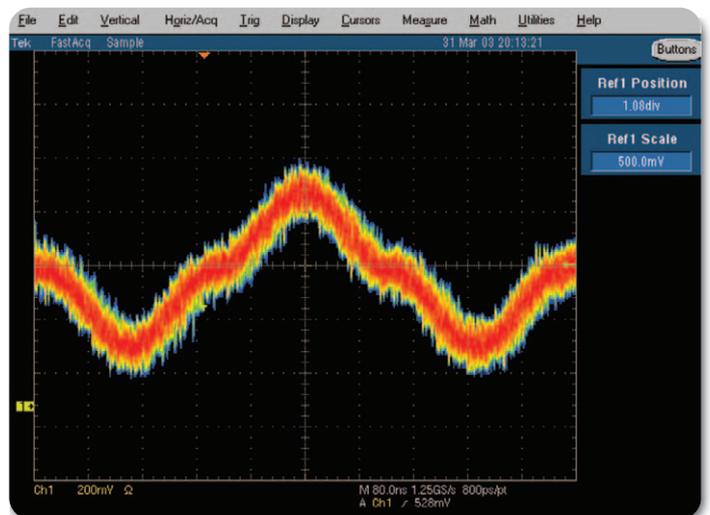
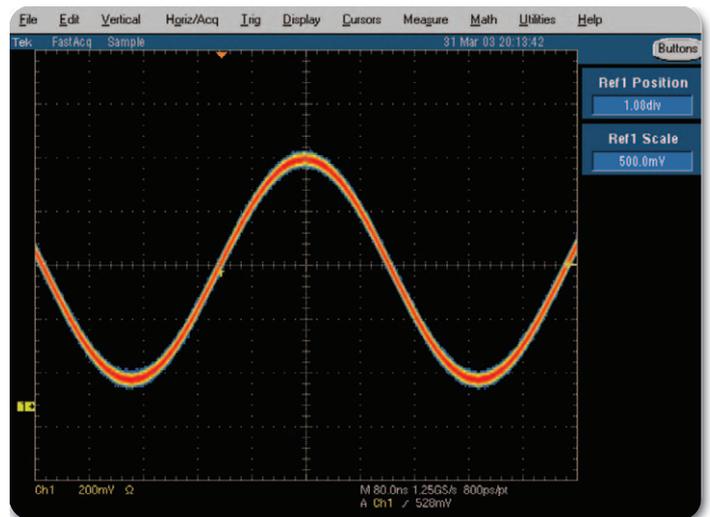
<sup>1</sup> 「AC」は、通常、0V（グラウンド）リファレンス付近で正負に変動する信号を意味する用語で、電流の流れる方向が周期ごとに反転します。しかし、ここでは説明の便宜上、「AC」をグラウンドとは関係なく変動する信号として定義します。たとえば、+1 ~ +3V の間で変化する信号は、常に同じ方向に電流が流れますが、AC 波形と解釈します。ほとんどの信号発生器は、グラウンド中心（真の AC）波形とオフセット波形のどちらでも生成できます。

## アナログとデジタル

現在の信号発生器は、ほとんどがデジタル技術をベースにしています。最も効率的なソリューションと言え、アナログまたはデジタルの用途に合わせてその機能を最適化した信号発生器ですが、現在の信号発生器の多くはアナログとデジタルの両方に対応できます。

任意波形ジェネレータ (AWG) とファンクション・ジェネレータは、主に、アナログ/ミックスド信号用途向けです。これらの計測器は、サンプリング手法を利用して、考え得るほとんどすべての形状の波形を生成および変更できます。これらのジェネレータには、一般に 1 ~ 4 チャンネルの出力があります。一部の AWG は、サンプリングしたアナログ出力と別に、外部機器のトリガなどに使用できるマーカ出力と、サンプルごとのデータをデジタル形式で供給する同期デジタル出力を備えています。

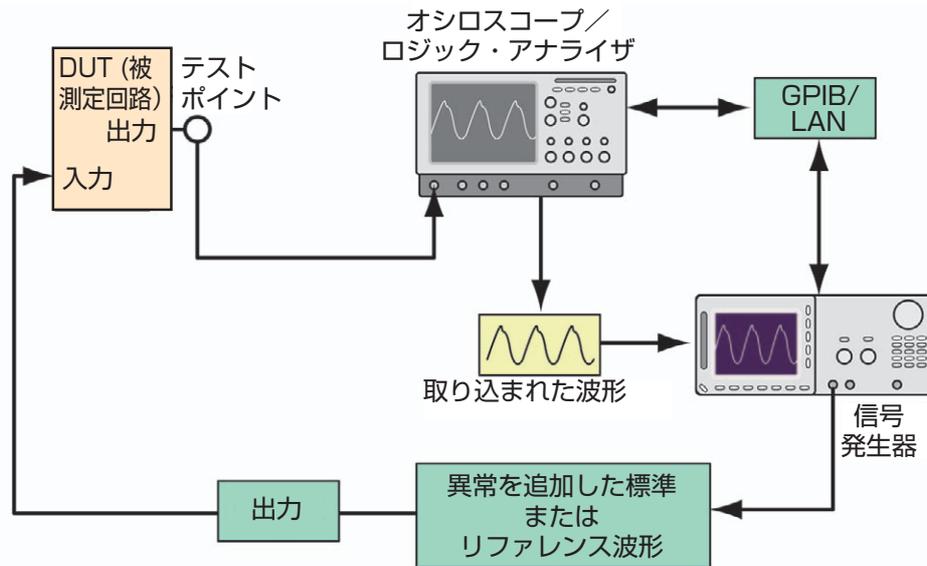
デジタル波形ジェネレータ (ロジック信号発生器) には、パルス・ジェネレータとパターン・ジェネレータの 2 種類があります。パルス・ジェネレータは、少数のチャンネル出力から、通常は非常に高い周波数の方形波またはパルスを発生し、高速デジタル機器の動作テストに最も一般的に使用されます。パターン・ジェネレータは、データ・ジェネレータ、データ・タイミング・ジェネレータとも呼ばれ、一般に、8、16、またはそれ以上の同期デジタル・パルス列を、コンピュータ・バスやデジタル・テレコム部品などに供給します。



▶ 図 2. 理想的な波形 (上) と「実際」の波形 (下)。汎用性のある信号発生器により、デバイスのストレス・テストや評価のニーズに応じて、あらかじめ設定された歪みやアブレーションを出力することができます。

## 信号発生器のすべて

### ▶ 入門書



▶ 図 3. 信号発生器では、標準波形やユーザ定義波形、または取り込んだ波形の特定の部分に、テストで必要とされる障害を加えることができます。

## 信号発生器の基本的なアプリケーション

信号発生器には実に多くの用途がありますが、電子測定関連では、検証、評価、ストレス/マージン・テストという3つの基本的なカテゴリに分類できます。代表的な用途は次のとおりです。

### 検証

#### デジタル変調送受信機のテスト

新しい送信機や受信機の開発、設計では、ベースバンドのI&Q信号を異常ありと異常なしの2通りでシミュレートし、新しい無線標準規格との適合性を検証する必要があります。任意波形ジェネレータの上位機種では、歪みの少ない高分解能信号を1ギガビット/秒(1Gbps)のデータ・レートまで生成し、「I」位相と「Q」位相の独立した2チャンネルに信号を供給することができます。

受信機のテストでは、実際のRF信号を使用しなければならないこともありますが、これに必要なRF信号は、最大サンプル・レート20GS/sの任意波形ジェネレータであれば直接合成することができます。

### 評価

#### D/A および A/D コンバータのテスト

新開発のD/Aコンバータ(DAC)とA/Dコンバータ(ADC)については徹底的にテストを行い、リニアリティ、モノトニシティ、および歪みの限界を確認する必要があります。最先端のAWGでは、同時同相のアナログ/デジタル信号を生成し、これらのデバイスを最高1Gbpsの速度で駆動することができます。

## ストレス／マージン・テスト

### 通信レシーバに対するストレス追加

シリアル・データ・ストリーム・アーキテクチャ（デジタル・コミュニケーション・バスやディスク・ドライブ増幅器で幅広く使用されています）を担当しているエンジニアは、デバイスに機能障害、特にジッタ違反やタイミング違反を発生させて、ストレスを付加する必要があります。ジッタ編集、生成ツールを備えた高度な信号発生器を利用すると、計算に要する時間を大幅に節約できます。これらの計測器は、200fs (0.2ps) というほんのわずかな時間でも信号エッジをシフトできます。

## 信号生成の分類

信号発生器による波形生成には、何通りか方法があります。そのどれを使用すべきかは、DUT とその入力要件に関する情報、つまり、歪みやエラー信号、その他の変数を追加する必要性の有無に依存します。最近の高性能信号発生器には、波形生成に少なくとも次の3つの分類があります。

- ▶ **作成**：回路のシミュレーションやテストなどの目的に新規で作成されます。
- ▶ **再生**：オシロスコープ、ロジック・アナライザ、リアルタイム・スペクトラム・アナライザなどで取り込んだ信号を、直接あるいは編集した信号で出力します。
- ▶ **生成**：標準規格に準拠した理想信号またはストレス信号を出力します。規格値からの許容範囲の設定等も行えます。

## 信号発生器のすべて

### ▶ 入門書

## 波形の概要

### 波形の特性

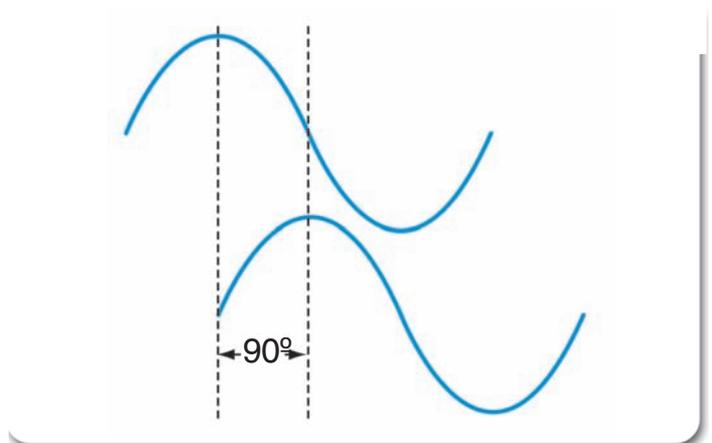
「波」とは、量的な値が一定の時間間隔で反復して変化するパターンです。波には、音波や脳波、海波、光波、電圧波など、いろいろな種類がありますが、そのどれも周期的な反復現象であるという点で本質は同じです。信号発生器では、電気的な波（通常、電圧波）の繰り返しを制御して生成することができます。

波の繰り返しの1回分を「サイクル」と呼びます。波形は、時間と共に変化する波の動きを視覚的に表したものです。電圧波形は、水平軸に時間、垂直軸に電圧を持つ、古典的な直交座標系のグラフィカルな表現です。なお、計測器によっては、電流波形や電力波形などについても、取り込みおよび生成が可能なものがありますが、本書では、通常の電圧対時間の波形のみを説明対象とします。

### 振幅、周波数および位相

波形には多くの特性がありますが、その中でも重要なのが振幅、周波数、そして位相です。

- ▶ **振幅**：波形の電圧の「強さ」の尺度。AC信号の振幅は絶えず変化しています。信号発生器では、電圧レンジをたとえば  $-3 \sim +3V$  という具合に設定し、この2つの電圧値の間で変動する信号を生成することができます。ただし、変動率は波形の形状と周波数の両方で決まります。
- ▶ **周波数**：完全な波形サイクルが発生するレートです。周波数の単位はヘルツ (Hz) です（以前はサイクル/秒と呼ばれていました）。周波数は、波形の周期（波長）の逆数です。波長は、隣接する波の相似したピーク間の距離で測定します。周波数が高くなるほど、周期は短くなります。
- ▶ **位相**：理論的には、 $0^\circ$  ポイントを基準にした波形サイクルの変位です。実際には、リファレンス波形または時間の基準点に対するサイクルの時間的ずれが位相です。



▶ 図 4. 位相シフト（遅延）は2信号間のタイミングずれです。位相は、通常、図に示すように度で表されますが、時間値の方が適切な場合もあります。

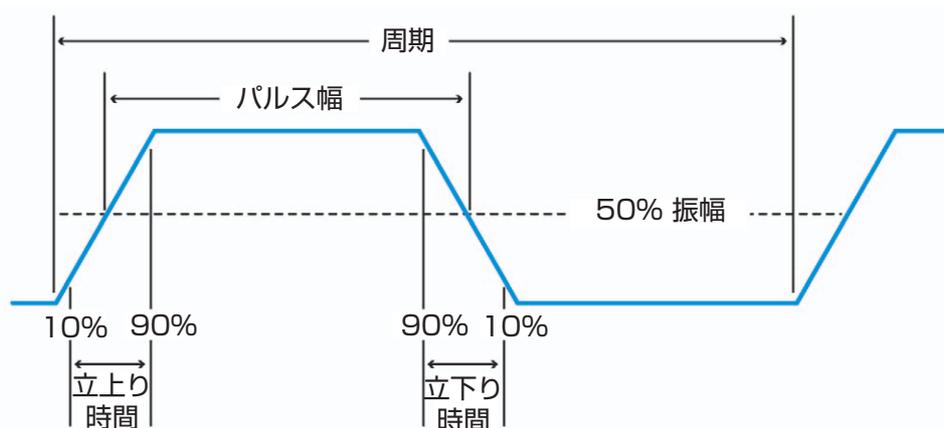
位相については、正弦波を見ると最もよくわかります。正弦波の電圧レベルは、数学的には円運動に関係しています。完全な円のように、正弦波の1サイクルは  $360^\circ$  運動しています。正弦波の位相角は、周期がどのくらい経過したかを表します。

2つの波形の周波数と振幅が同一でも、位相が異なる場合があります。位相シフトは遅延とも呼ばれ、図4に示すように、周波数と振幅が同一の2つの信号のタイミングのずれを表します。位相シフトは、電子機器では頻繁に発生します。

波形には振幅、周波数、位相という基本パラメータがありますが、これらを用途に合わせて変更することで最適な波形が得られます。これ以外にもさまざまなパラメータがあり、多くの信号発生器では、これらについても変更が可能です。

### 立上りおよび立下り時間

通常、パルスと方形波の特性である立上り時間と立下り時間とも呼ばれるエッジのトランジション時間は、信号エッジにおいてある状態から別の状態に遷移するまでの時間を測定したものです。これらの値は、最近のデジタル回路では数ナノ秒 (ns) 以下です。



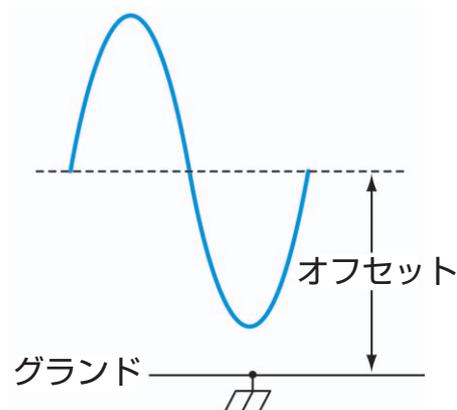
▶ 図 5. 基本的なパルス特性。

立上り時間と立下り時間は、どちらもトランジション前後の静的電圧レベルの 10～90% 間で測定されます（20～80% を使用することもあります）。図 5 に、パルスとそのパラメータをいくつか示します。この図は、オシロスコープ上に表示されるイメージで、信号周波数に比べてサンプル・レートを高く設定しています。サンプル・レートが低いほど、この波形はより「方形」に近くなります。

パルスの立上り時間と立下り時間を個別に変えることもあります。たとえば、非対称のスルー・レートを持つ増幅器を測定する場合や、レーザ・スポットの溶接ガンの冷却時間を制御する場合などがあります。

### パルス幅

パルス幅とは、パルスのリーディング・エッジからトレーリング・エッジまでの経過時間のことです。「リーディング」は、正に向かうエッジと負に向かうエッジのどちらかを特定する用語ではありません。これは、「トレーリング」についても同様です。つまり、「リーディング」も「トレーリング」も、サイクル内でのイベント発生順序を表すだけであって、パルスの極性によってエッジがリーディングとトレーリングのどちらになるかが決まるということではありません。図 5 では、正に向かうエッジをリーディング・エッジとしています。パルス幅は、各エッジの 50% 振幅点間の時間測定値です。



▶ 図 6. オフセット電圧は、AC 値と DC 値の両方を含む信号の DC 成分です。

「デューティ・サイクル」という用語もありますが、これは、パルスのハイとロー（オン／オフ）の時間間隔を表します。図 5 は、50% のデューティ・サイクルの例です。100ns 周期のサイクルで、アクティブ・ハイ（オン）レベルが 60% であれば、デューティ・サイクルは 60% になります。

デューティ・サイクルの具体例を示すために、1 秒間のバースト後に 3 秒間休止するアクチュエータを考えてみましょう。このアクチュエータは、4 秒のうち 3 秒間は休止するので、デューティ・サイクルは 25% になります。

## 信号発生器のすべて

### ▶ 入門書

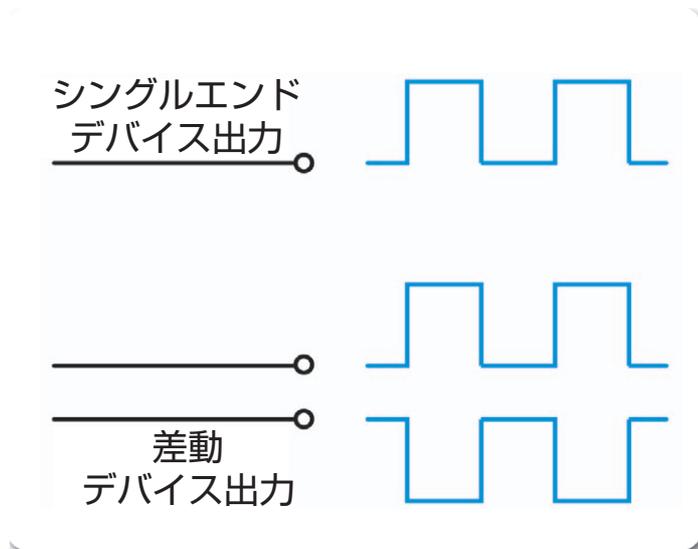
#### オフセット

すべての信号の振幅が、グラウンド (0V) を基準として変化するわけではありません。「オフセット」電圧とは、回路グラウンドと、信号振幅の中心との電圧差です。オフセット電圧は、図 6 に示すように、AC と DC の両方を含む信号の DC 成分を表します。

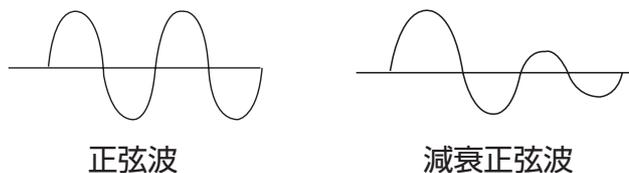
#### 差動信号とシングルエンド信号

差動信号とは、互いに補完し合う 2 つの信号経路を使用して、それぞれ同一でグラウンドに対して極性が反転している信号を伝える方法です。信号のサイクルが進み、一方の信号が正に振れたとき、もう一方の信号は同じだけ負に振れます。たとえば、ある瞬間に一方の信号の電圧が +1.5V であったとすると、もう一方の信号の電圧は -1.5V ちょうどになります (2 つの信号が完全に同相であったと仮定した場合)。差動信号は、クロストークとノイズを排除し、有効な信号のみを通過させる優れた方法です。

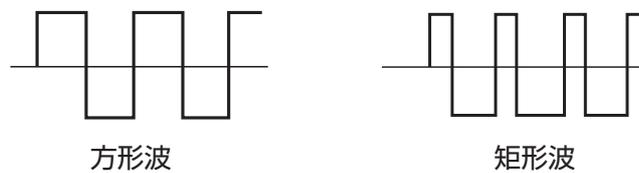
シングルエンド動作は、信号経路とグラウンドを 1 つしか使用しない一般的な方法です。図 7 に、シングルエンド信号と差動信号の両方を示します。



▶ 図 7. シングルエンド信号と差動信号。



▶ 図 8. 正弦波と減衰正弦波。



▶ 図 9. 方形波と矩形波。

### 基本波形

波形にはさまざまな形があります。ほとんどの電子測定では、次に示す波形のどれかを使用し、必要に応じてノイズや歪みを追加することもあります。

- ▶ 正弦波
- ▶ 方形波と矩形波
- ▶ のこぎり波と三角波
- ▶ ステップ波とパルス波
- ▶ 複雑な波形

### 正弦波

正弦波は、おそらく最もわかりやすい波形です。ほとんどの AC 電源は正弦波です。家庭用のコンセントからは、正弦波の電源が供給されます。また、電気や電子の初等教育では、通常、原理の説明に正弦波が使用されます。正弦波は、基本的な数学関数の演算結果で、正弦曲線を  $360^\circ$  にわたってグラフに表すと、正弦波のイメージが完成します。

減衰正弦波は、回路がインパルスで発振し、時間をかけて徐々に減衰する特殊なケースです。

図 8 に、正弦波と減衰正弦波信号の例を示します。

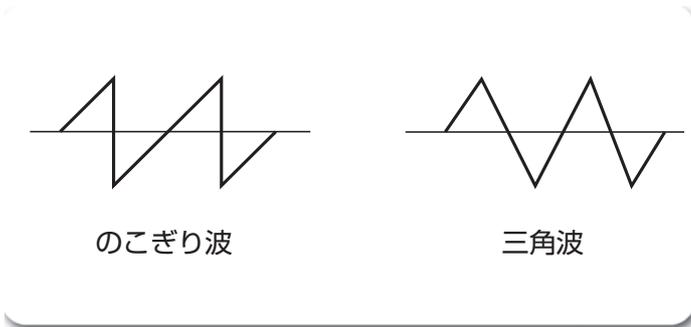
### 方形波および矩形波

方形波と矩形波は、デジタル電子機器の中核となる基本波形で、その他の用途にも使用されています。方形波は、2つの固定電圧レベル間を等間隔で切り替わる信号です。これは、2つの電圧レベル間的高速なトランジション（前に説明した立上り時間と立下り時間）を再現する必要がある増幅器のテストによく使用されます。方形波は、コンピュータ、無線通信機器、HDTV システムなどのデジタル・システム用のクロックとしても使用されます。

矩形波は、方形波と同様のスイッチング特性を持っていますが、前述の「デューティ・サイクル」で説明したように、そのハイとローの時間間隔が等しくありません。図 9 に、方形波と矩形波の例を示します。

## 信号発生器のすべて

### ▶ 入門書



▶ 図 10. のこぎり波と三角波。

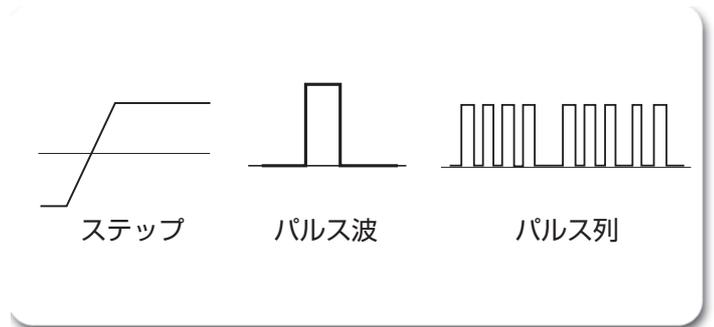
### のこぎり波と三角波

のこぎり波と三角波は、その名前の通り、非常によく似た幾何形状をしています。のこぎり波は、各サイクルでゆっくり均等にピークまで上り、その後、即座に落ち込みます。三角波は対称的な立上り時間と立下り時間を持っています。これらの波形は、アナログ・オシロスコープや TV などのシステム内で、電圧を制御するために使用されます。図 10 に、のこぎり波と三角波の例を示します。

### ステップ波とパルス波

「ステップ波」は、電源ボタンを押したときと同じように、電圧が急激に変化する波形です。

「パルス波」は矩形波と同類です。矩形波のように、2つの固定電圧レベル間で、上から下へ、または下から上へスイッチングすることによって生成されます。パルスは本質的にバイナリであるため、デジタル・システムで情報（データ）を搬送する基本的手段として利用できます。パル

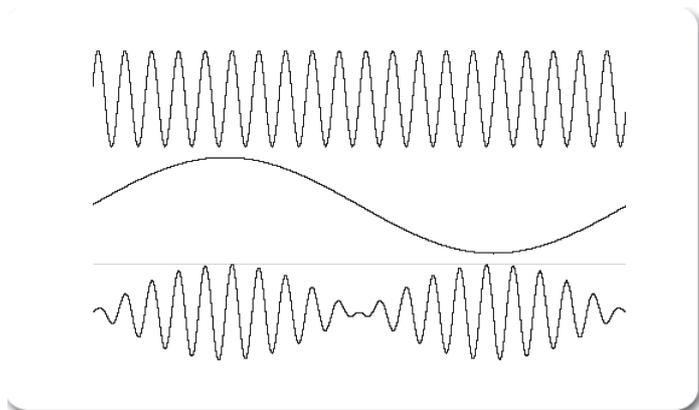


▶ 図 11. ステップ波、パルス波、パルス列。

スは、コンピュータ中を移動する 1 ビットの情報を表します。同時に移動するパルスが集まったものがパルス列（パルス・トレインやパルス・ストリームという表現もあります）です。パラレルまたはシリアルで送信されるパルス列の同期したグループがデジタル・パターンを構成します。図 11 に、ステップ波、パルス波、そしてパルス列の例を示します。

デジタル・データは、名目上はパルス波、矩形波、および方形波で構成されますが、実際のデジタル波形は、角が丸みを帯びていて、エッジは斜めになっています。

回路の異常が原因でパルスが発生することもあります。これらの不定期に発生するトランジェント信号のことを「グリッチ」と言います。デジタル・トラブルシューティングでは、グリッチ・パルスと、幅の狭い正常なデータ・パルスとを見分けられるかどうか重要です。そのテストのため、任意の位置にグリッチを印加してパルス信号を生成することのできる信号発生器もあります。



▶ 図 12. 振幅変調。

### 複雑な波形

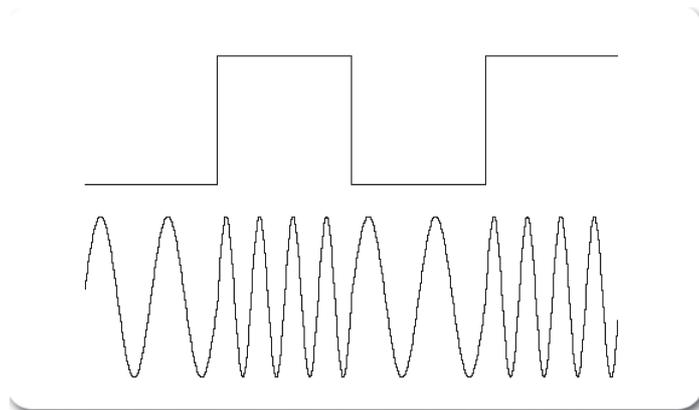
実際の電子システムでは、前述のような教科書通りの波形が現れることはめったにありません。特定のクロック信号やキャリア信号は純粋な形状ですが、その他のほとんどの波形では、分散したキャパシタンスやクロストークなど、実際の回路動作の副作用で偶発的に生じたなんらかの歪みをもったものや、意図的に変調が行われたものがあります。波形の中には、正弦波、方形波、ステップ波、パルス波の要素をすべて含むものさえあります。

複雑な波形には、次のようなものがあります。

- ▶ アナログ変調、デジタル変調、パルス幅変調、および直交変調信号
- ▶ デジタル・パターンとデジタル・フォーマット
- ▶ 擬似ランダム・ビットとワードのストリーム

### 信号変調

信号変調では、振幅、位相、周波数の変動により、低周波信号の情報が周波数が高い搬送波に組み込まれます。変調後の信号は、音声から映像、データに至るまで、どのようなものでも搬送できます。これらの波形の再現は、それ専用の機能を備えた信号発生器を使用しない限り、困難です。



▶ 図 13. 周波数シフト・キーイング (FSK) 変調。

**アナログ変調** – 振幅変調 (AM) と周波数変調 (FM) は、放送で広く使用されています。変調信号は、搬送波の振幅や周波数を変化させます。受信端では、復調回路が振幅や周波数の変化を解釈して搬送波から内容を抽出します。

位相変調 (PM) は、搬送波の周波数ではなく、位相を変調して内容を組み込みます。

図 12 にアナログ変調の例を示します。

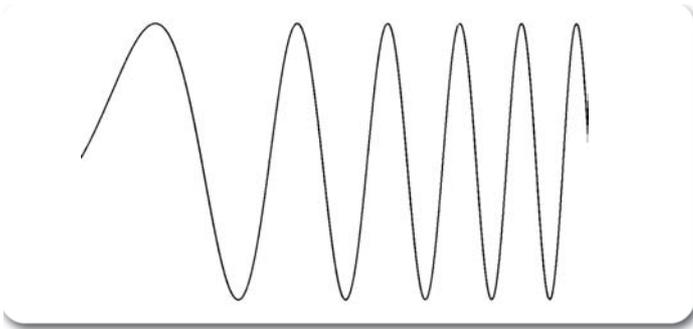
**デジタル変調** – デジタル変調は、他のデジタル技術と同様に、2つのステートでバイナリ・データを表現する信号を基本にしています。振幅シフト・キーイング (ASK) では、デジタル信号変調で搬送波が2つの振幅間でスイッチします。周波数シフト・キーイング (FSK) では、搬送波が2つの周波数 (中心周波数とオフセット周波数) 間でスイッチし、位相シフト・キーイング (PSK) では、搬送波が2つの位相間でスイッチします。PSKでは、「0」は前の信号と同じ位相の信号を送信することによって表され、「1」は逆位相の信号を送信することによって表されます。

パルス幅変調 (PWM) も、もう一つの一般的なデジタル変調方式で、デジタル・オーディオ・システムでよく使用されています。名前が示すように、パルス波形にのみ適用され、PWMでは、信号変調でパルスのアクティブなパルス幅 (前述のデューティ・サイクル) が変化します。

図 13 にデジタル変調の例を示します。

## 信号発生器のすべて

### ▶ 入門書



▶ 図 14. 正弦波の周波数掃引。

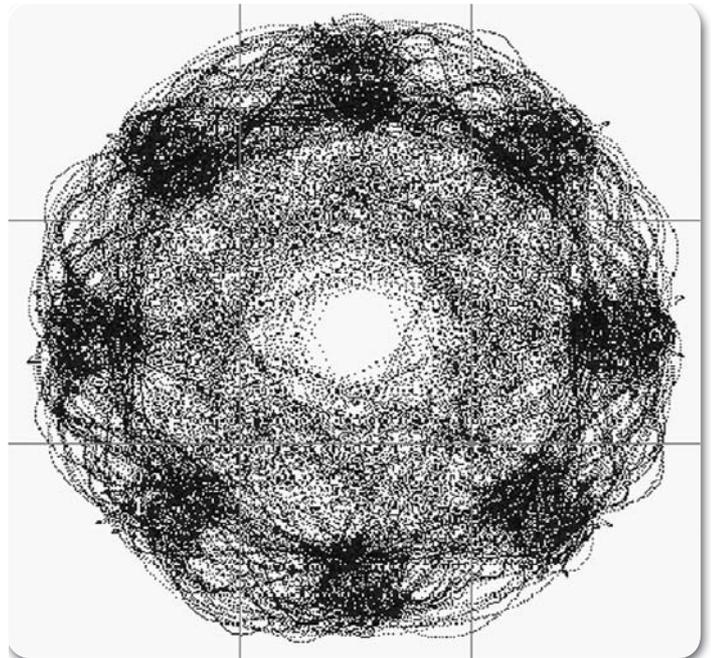
### 周波数掃引

電子デバイスの周波数特性測定には、時間の経過とともに周波数が変化する、「掃引」正弦波を必要とします。周波数は、直線的に変化するものと、対数的に変化するものがあります。上位機種のスキャンジェネレータには、スキャンシーケンスのスタート周波数、保持周波数、ストップ周波数、および関連する時間を選択できるものもあります。信号ジェネレータは、掃引に同期したトリガ信号を供給し、デバイスの出力応答を測定するオシロスコープをコントロールします。

**直交変調** - 現在のデジタル無線通信ネットワークは、直交 (IQ) 変調技術を基礎に構築されています。同相 (I) 波形と直交「Q」波形 (「I」波形に対して正確に  $90^\circ$  遅延された波形) の 2 つの搬送波が変調されて、4 ステートの情報が生成されます。2 つの搬送波は合成されて 1 つのチャンネルで送信され、受信端で分離、復調されます。IQ フォーマットは、他のアナログ変調やデジタル変調よりも、はるかに多くの情報を伝送できます。これにより、システムで使用できる有効帯域幅を増やすことができます。図 15 に、直交変調を示します。

### デジタル・パターンとデジタル・フォーマット

デジタル・パターンは、複数の同期したパルス列から構成されます。これらのパルス列は「ワード」を形成し、そのビット幅は、8、12、16、あるいはそれ以上といろいろあります。信号発生器の種類であるデジタル・パターン・ジェネレータは、パラレル出力からデジタル・バスにデータ・ワードを出力します。このパターン内のワードは、各サイクルで規則正しく送信され、各サイクル内の各ビットの動作は、選択した信号フォーマットによって決まります。そして、このフォーマットによって、データ・ストリームを構成するサイクル内のパルス幅が決まります。



▶ 図 15. 直交変調。

次に、最も一般的なフォーマットを簡単に説明します。最初の 3 つのフォーマットの説明では、サイクルが 2 進の「0」で始まるものと仮定しています。「0」は論理電圧レベルのローを意味します。

- ▶ **Non-Return-to-Zero (NRZ)** : サイクル内で有効なビットが発生すると、波形は「1」に切り替わり、次のサイクル境界までその値を維持します。
- ▶ **Delayed Non-Return-toZero (DNRZ)** : 基本的に NRZ と同じですが、指定された遅延時間が経過すると波形が「1」に切り替わるという点が異なります。
- ▶ **Return-to-Zero (RZ)** : 有効なビットが発生すると波形は「1」に切り替わりますが、その後同じサイクル内で「0」に戻ります。
- ▶ **Return-to-One (R1)** : 事実上、RZ の逆です。上記の他のフォーマットとは異なり、サイクルが「1」で始まるものと仮定します。有効なビットが発生すると「0」に切り替わり、サイクルの終了前に「1」に戻ります。

## ビット・ストリーム

擬似ランダム・ビット・ストリーム (PRBS) と擬似ランダム・ワード・ストリーム (PRWS) は、デジタル・コンピュータの本質的な限界、つまり、真の乱数を生成できないという欠点を補うためのものです。ランダム・イベントには、今でもデジタル・システムで便利な用途があります。たとえば、完全に「クリーン」なデジタル・ビデオ信号では、ラインにギザギザが生じたり、本来滑らかであるはずの表面に等高線状の段差が目立つことがあります。調整された量のノイズを追加することにより、基となる情報を劣化させずに、これらのギザギザや段差を目立たなくすることができます。

このランダム・ノイズを生成するために使用されているのが、乱数のようでありながら実際には予測可能な数学的パターンに従っている数列です。この「擬似乱数」の実体は、不規則に繰り返されるシーケンスの集まりであり、その結果が PRBS となります。擬似ランダム・ワード・ストリームは、信号発生器の平行出力から出力される複数の PRBS を定義します。

PRWS は、シリアライザやマルチプレクサのテストでよく使用されます。これらの要素は、PRWS 信号を擬似ランダム・ビットのシリアル・ストリームに再構成します。

## 信号発生器の種類

信号発生器には、大きく分けて、ミックスド信号発生器 (任意波形ジェネレータと任意波形/ファンクション・ジェネレータ) とロジック・ソース (パルス・ジェネレータまたはパターン・ジェネレータ) があり、あらゆる信号生成ニーズに対応しています。各信号発生器には、それぞれ独自の特長があり、おおよその適合用途があります。

ミックスド信号発生器は、アナログ特性を持つ波形を出力するように設計されています。たとえば、正弦波や三角波などの基本波形や、エッジ部分が丸みを帯びた歪んだ「方形」波を出力できます。汎用のミックスド信号発生器では、振幅、周波数、位相を始め、DC オフセット、立上り時間、立下り時間を設定できます。オーバシュートなどのアベレーションを作成することや、エッジのジッタ、変調などを印加することもできます。

本来、デジタル・ソースは、デジタル・システムを駆動することを目的としたものであり、その出力は 2 進パルス列です。デジタル専用の信号発生器であるため、正弦波や三角波は生成できません。デジタル・ソースの機能は、コンピュータ・バスのようなデジタル・バスのテストに最適化されています。これらの機能には、パターン開発を早めるソフトウェア・ツールを始め、各種ロジック・ファミリに適合するように設計されたプローブなどのハードウェア・ツールも含まれます。

先にも述べたように、現在のほとんどすべての高性能信号発生器は、ファンクション・ジェネレータから任意波形ジェネレータ、パターン・ジェネレータに至るまで、デジタル・アーキテクチャをベースにしており、柔軟な操作性と非常に優れた信号精度が得られます。

## 信号発生器のすべて

### ▶ 入門書

## アナログおよびミックスド信号発生器

### アナログおよびミックスド信号発生器の種類

#### 任意ジェネレータ

従来、波形生成には、専用の信号発生器が使用されて来ました。生成する波形に応じて、低歪みオーディオ正弦波ジェネレータや、数 GHz の RF 信号ジェネレータなどを個別に用意する必要がありました。現在、さまざまな信号発生器が市販されていますが、プロジェクトによっては適した信号発生器を見つけることができず、独自の信号発生器をカスタム設計したり、改良したりしているユーザも多くいます。しかし、計測器品質の信号ジェネレータを設計するのは非常に困難です。また、機器の設計という本来目的とは異なる作業に費やされる時間は、当然プロジェクト自体にとって高価な代償となります。

幸い、デジタル・サンプリング技術と信号処理技術の発達により、1 台だけで信号生成のほとんどすべてのニーズに対応できるソリューションが登場しました。それが、任意ジェネレータです。任意ジェネレータは、任意波形／ファンクション・ジェネレータ (AFG) と任意波形ジェネレータ (AWG) に分類できます。

#### 任意波形／ファンクション・ジェネレータ (AFG)

任意波形／ファンクション・ジェネレータ (AFG) は、幅広い信号生成ニーズに対応でき、事実、今日の業界に広く普及しています。一般的に、AFG は等価の AWG と比較すると、生成できる波形の種類では劣りますが、安定性に優れ、周波数変化に対する応答が速いという特長があります。DUT が正弦波と方形波の間で、あるいは 2 つの周波数間でほとんど瞬時に切り替わる能力を必要とする場合、任意波形／ファンクション・ジェネレータ (AFG) は最適なツールです。AFG のもう一つの利点は低コストで、AWG の汎用性が不要な用途では非常に魅力的です。

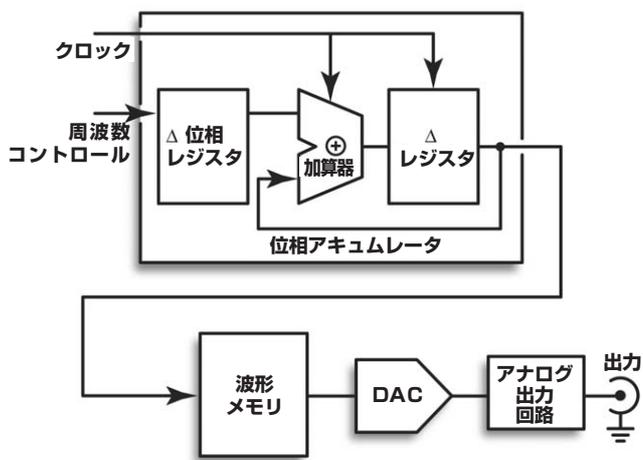
AFG は専用機として設計されていますが、AWG とほとんど同じ機能を備えています。AFG には、安定した標準波形 (特に重要な正弦波と方形波) を正確に、しかも迅速に生成できるという強みがあります。「迅速」とは、ある周波数から別の周波数にすばやく、きれいに変更できる能力です。

一般的な AFG であれば、次のような波形を生成することができます (機種によってはサポートしていない波形もあるかもしれません)。

- ▶ 正弦波
- ▶ 方形波
- ▶ 三角波
- ▶ 掃引波
- ▶ パルス波
- ▶ ランプ波
- ▶ 変調波
- ▶ ハーバーサイン波

もちろん、AWG でもこれらの波形は生成できます。しかし、最新の AFG には、出力信号の振幅、周波数、位相を簡単に設定できるという利点があります。さらに、多くの AFG には内部または外部の信号発生器から変調して、ある種の規格コンプライアンス・テストには欠かせない信号を生成する方法が用意されています。

従来の AFG は、アナログ・オシレータと信号処理を使用して出力信号を生成していました。最近の AFG は、DDS (Direct Digital Synthesis) 技術により、メモリからサンプルをクロック読み出しするレートを決定しています。



▶ 図 16. 任意波形／ファンクション・ジェネレータの簡略ブロック図。

DDS とは、単一のクロック周波数を使用して、機器の動作レンジ内の任意の周波数を発生させ、波形を合成する技術のことです。図 16 に、DDS 技術を採用した AFG の構造を簡単に示します。

位相アキュムレータ回路では、デルタ ( $\Delta$ ) 位相レジスタが、次のサイクルで出力信号が進む位相増分を示す命令を、周波数コントローラから受け取ります。最近の高性能 AFG では、位相分解能は  $2^{30}$  分の 1、つまり、およそ 1,000,000,000 分の 1 になります。

位相アキュムレータの出力は、AFG の波形メモリ部分のクロックとして機能します。その動作は AWG とほとんど同じですが、波形メモリには正弦波や方形波などの基本的な信号しかストアされていないという点で大きく異なります。アナログ出力回路は、基本的には固定周波数のロー・パス・フィルタで、AFG が出力する所定のプログラムされた周波数 (クロックの影響はありません) だけを保証します。

位相アキュムレータの周波数生成方法を理解するため、コントローラが 30 ビットの  $\Delta$  位相レジスタに 1 の値を送信する場面を考えてみましょう。位相アキュムレータの  $\Delta$  出力レジスタは、サイクルごとに  $360^\circ \div 2^{30}$  だけ進みます。これは、計測器が出力する 1 サイクルが  $360^\circ$  で表されるためです。したがって、 $\Delta$  位相レジスタの値が 1 の場合、AFG レンジで最小の周波数が生成されます。回路の周波数は、新しい値が  $\Delta$  位相レジスタに読み込まれるまでは、そのままになります。

値が 1 より大きい場合、より早く  $360^\circ$  まで進み、出力周波数が高くなります (異なるアプローチを採用する AFG もあります。その場合は、数サンプル飛ばして、メモリ内容を速く読み取ることにより、出力周波数を増加させます)。変化するのは周波数コントローラによって供給される位相値だけです。メイン・クロックの周波数は、変更する必要がありません。さらに、波形は波形サイクルの任意のポイントから開始できます。

## 信号発生器のすべて

### ▶ 入門書



▶ 図 17. 正弦波を表す一連のサンプル・ポイント（左）と、再現された正弦波（右）。

たとえば、サイクルの正に向かう部分のピークで始まる正弦波を生成する必要があるとします。簡単な計算により、このピークは  $90^\circ$  で発生することがわかります。したがって、次のようになります。

$$2^{30} \text{ 分の増加} = 360^\circ \text{ かつ、}$$

$$90^\circ = 360^\circ \div 4 \text{ なので}$$

$$90^\circ = 2^{30} \div 4$$

位相アキュムレータは  $(2^{30} \div 4)$  と等しい値を受け取ると、波形メモリに対して、正弦波の正のピーク電圧を含む位置から開始するよう指示します。

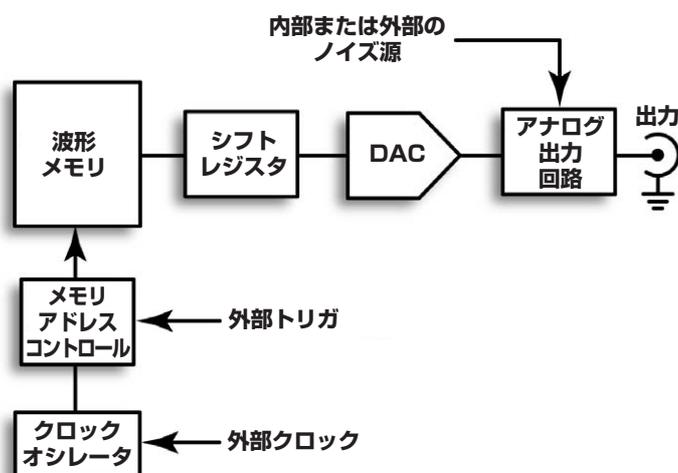
一般的な AFG では、メモリの事前書き込み部分に基本的な波形がいくつかストアされています。その中でも、多くのテスト用途に使用されているのが、正弦波と方形波です。任意波形はメモリの書き換え可能部分に保持されます。波形形状は、従来の AWG と同様、柔軟に定義することができます。しかし、DDS アーキテクチャでは、メモリ・セグメンテーションや波形シーケンス機能はサポートされていません。これらの先進機能が装備されているのは、高性能の AWG に限られます。

DDS ベースの構造では、優れた応答性が得られるため、周波数と位相の両方の変更をすばやく簡単にプログラムできます。この応答性はあらゆる種類の FM DUT、たとえばラジオや衛星通信システムのコンポーネントをテストする際に便利です。また、AFG の周波数レンジが十分な場合は、FSK や GSM のような周波数ホッピングのテストに最適な信号発生器となります。

AWG のように事実上すべての波形を生成できるとまではいきませんが、AFG は多くの研究所、修理工場、設計部門で必要とされる一般的なテスト信号を生成できます。さらに、優れた周波数俊敏性が得られます。もう一つ重要なことは、AFG は業務を遂行する上で非常に費用効果が高いことです。

### 任意波形ジェネレータ (AWG)

ディスク・ドライブ評価用のローレンツ・パルスで正確に形成されたデータ・ストリームや、GSM または CDMA 方式の携帯電話をテストするための複雑な変調 RF 信号が必要になった場合など任意波形ジェネレータ (AWG) は想像できる限りの全ての波形を出力できます。必要な波形の作成には、さまざまな方法、例えば、数式から「ドローイング」が使用できます。



▶ 図 18. 任意波形ジェネレータの簡略ブロック図。

基本的に、任意波形ジェネレータ (AWG) は、ストアされたデジタル・データに基づいて電圧レベルを変化させることにより波形を生成する、高機能なプレイバック・システムです。ブロック図は一見簡単そうに見えます。AWG の概念を簡単に説明すると、ストアされたデータをリアルタイムで読み出す CD プレーヤとよく似ています (AWG の場合は内蔵の波形メモリ、CD プレーヤではディスク自身)。

AWG を理解するには、まずデジタル・サンプリングの広範な概念を把握する必要があります。デジタル・サンプリングとは、その名の通り、サンプル・データ・ポイントを使用して信号を定義することです。これらのサンプルは、オシロスコープなどの計測器で波形を実際に取得したり、またはグラフィック・ツールや演算によって定義されたりします。図 17 (左) に一連のサンプル・ポイントを示します。すべてのポイントは、曲線のために間隔が異なって見えますが、一定の時間間隔でサンプリングされます。AWG では、サンプリングされた値は、高速のランダム・アクセス・メモリ (RAM) にストアされます。

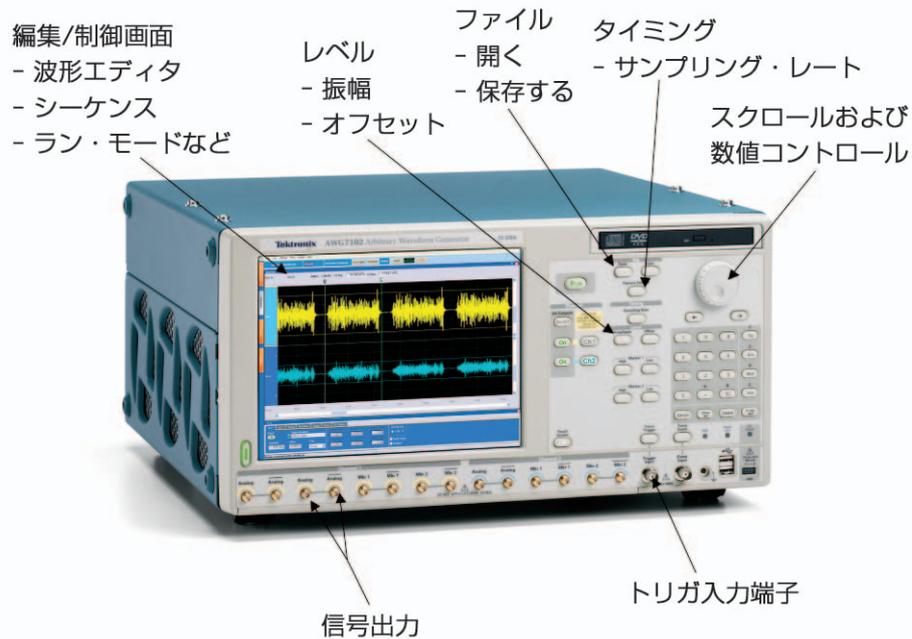
ストアされた情報をもとに、メモリ位置を読み直し、D/A コンバータ (DAC) 経由でデータ・ポイントを送出することで、いつでも信号を再構成できます。図 17 (右) にその結果を示します。ここで注目すべきは、AWG の出力回路は、ポイント間にフィルタをかけてドットをつなぎ、クリーンで途切れのない波形を生成しているということです。これらのドットは、DUT にとっては離散ポイントではなく、事実上、連続したアナログ波形と同じです。

図 18 に、これらの動作を実現する AWG の簡略化したブロック図を示します。

AWG は、どんな機器も真似のできない高い汎用性を実現しています。AWG はあらゆる波形を生成できる能力により、自動車のアンチロック・ブレーキ・システムのシミュレーションから、無線ネットワークのストレス・テストまで、さまざまな用途に対応できます。

## 信号発生器のすべて

### ▶ 入門書



▶ 図 19. 高性能ミックスド信号発生器：AWG7000 シリーズ任意波形ジェネレータ。

### ミックスド信号発生器のシステムと操作パネル

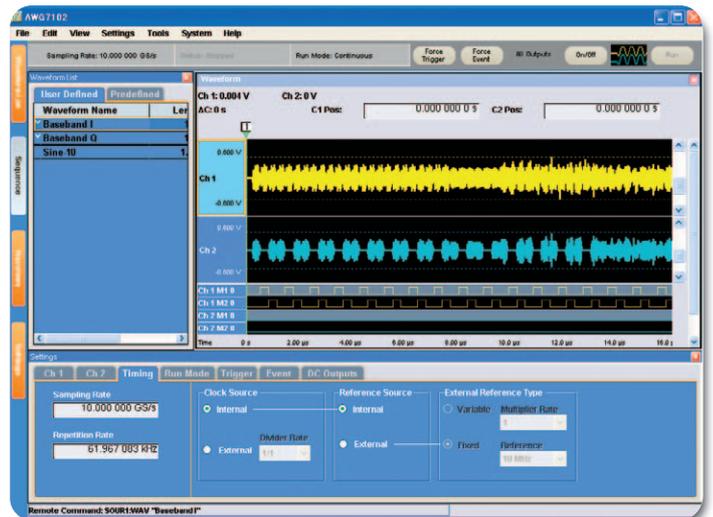
完全な測定ソリューションを形成する信号ジェネレータでは、多様な波形をスピーディに作成して妥協のない忠実な波形を出力できるよう、その操作パネルとサブシステムが設計されています。

最も基本的で、頻繁に設定を変更する必要がある信号パラメータは、前面パネルにある専用のボタンと汎用ノブまたはテン・キーで操作できます。より複雑な設定や、あまり頻繁に使用しない設定は、ディスプレイ画面のメニューで操作できます。

**レベル操作部**では、出力信号の振幅やオフセット・レベルを設定します。図 19 に示す信号発生器では、前面パネルの専用のボタンと汎用ノブまたはテン・キーにより、振幅とオフセットを簡単に設定できます。わずらわしいメニュー操作は必要ありません。

タイミング操作部では、サンプル・レートを制御して出力信号の周波数を設定します。また、必要な時間パラメータを簡単に設定できるハードウェアの専用ボタンもあります。

なお、上記のパラメータでは、ミックスド信号発生器が生成する波形の形状は制御できません。タッチ・パネルやマウスを使って興味のある部分を選択すると、シーケンス定義用のコントロールやデジタル出力の設定項目が表示されます（図 20 を参照）。このページでは、数値キーや汎用スクロール・ノブを使って空欄に入力することで設定が行えます。



▶ 図 20. ソフト・キーとメニュー選択を行うことができる AWG のユーザ・インターフェース。

## 信号発生器のすべて

### ▶ 入門書

### 性能に関する用語と注意事項

次に、ミックスド信号発生器の性能を表すパラメータについて簡単に説明します。信号発生器やその用途に関するカタログ、リファレンス・ブック、チュートリアルなど、参考文献をお読みになるときに参考にしてください。

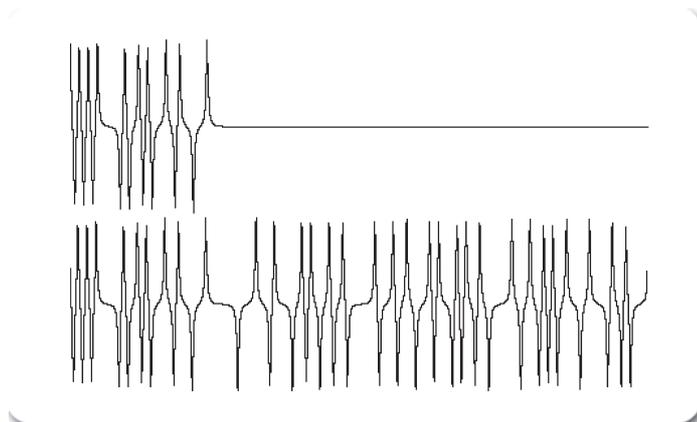
#### メモリ容量 (レコード長)

メモリ容量またはレコード長は、クロック周波数と密接な関係があります。メモリ容量は、ストアできるサンプルの最大数を決定します。すべての波形サンプル・ポイントは、メモリを占有します。各位置は、設定されたクロック周波数におけるサンプル間隔の時間値と同じとみなされます。たとえば、クロックが 100MHz で動作している場合、ストアされるサンプルは、10ns ごとの間隔になります。

波形を定義するために何ポイントのデータがストアできるかが決まるので、ほとんどの場面で信号の忠実度を決定する重要な役割を果たしています。特に複雑な波形では、メモリ容量は信号の詳細を正確に再現するために重要です。大容量メモリには次のような利点があります。

- ▶ 希望する波形のサイクルをより多くストアできます。そのうえでシーケンス機能を使用して各種の波形を柔軟に組み合わせ、ループ、パターン、その他を無限に作成することができます。
- ▶ 波形をより詳細に再現できます。複雑な波形では、パルスのエッジやトランジエントに高周波数情報を持たせることができます。これらの高速トランジションを補間するのは困難です。複雑な信号を忠実に再現するには、多数のデータ・ポイントでトランジションを構成する必要があります。

高性能のミックスド信号発生器は、大きなメモリ容量 (長いレコード長) と高いサンプル・レートをサポートしており、擬似ランダム・ビット・ストリームなどの複雑な波形をストアし、再現することができます。同様に、大きなメモリ容量を備えた高速の信号発生器は、非常に高速なデジタル・パルスやトランジエントを生成できます。



▶ 図 21. 十分なメモリ容量を使用すると、任意信号発生器は極めて複雑な波形を再現できます。

#### サンプル (クロック) レート

通常、サンプル・レートは、メガ・サンプル/秒またはギガ・サンプル/秒で指定され、機器が動作可能な最大クロック・レートまたはサンプル・レートを示します。サンプル・レートは、出力信号の周波数と忠実度に影響します。ナイキスト・サンプリング定理では、信号を正確に再現するには、サンプリング周波数 (クロック・レート) は、生成する信号の最も高いスペクトラム周波数成分の 2 倍以上でなければなりません。たとえば、1MHz の正弦波信号を生成するには、2 メガ・サンプル/秒 (MS/s) を超える周波数でサンプル・ポイントを生成する必要があります。この定理は通常、アキュイジション計測器の選択基準として扱われていますが、オシロスコープの場合と同様に、信号発生器の選択基準としても通用します。希望する信号を忠実に再現するには、ストア波形のポイント数は十分でなければなりません (周波数を再現するには、ナイキストの定理により、2 倍のサンプリング周波数が最低条件です。波形状を忠実に再現するには、4、8、16 倍などにより多くのサンプリング周波数が必要です)。

信号発生器は、これらのポイントを取得し、指定限度内の周波数でメモリから読み出すことができます。ストアされたポイントの集合がナイキスト定理を満足した正弦波を定義している場合、信号発生器は適切にフィルタし、正弦波を出力します。

信号発生器が生成できる波形の周波数は、簡単な数式で計算できます。メモリ内に1波形サイクルがストアされている計測器を例に説明します。

クロック周波数が 100MS/s、メモリ長またはレコード長が 4000 ワードとします。

この場合、次のようになります。

$$F_{\text{output}} = \text{クロック周波数} \div \text{メモリ長}$$

$$F_{\text{output}} = 100,000,000 \div 4000$$

$$F_{\text{output}} = 25,000\text{Hz (または 25kHz)}$$

図 22 に、この概念を示します。

前述のクロック周波数では、サンプルは約 10ns 間隔になります。これが波形の時間分解能（水平軸）です。振幅分解能（垂直軸）と混同しないよう注意する必要があります。

このプロセスを一歩進め、メモリに波形の 1 サイクルでなく、4 サイクルが含まれていると仮定します。

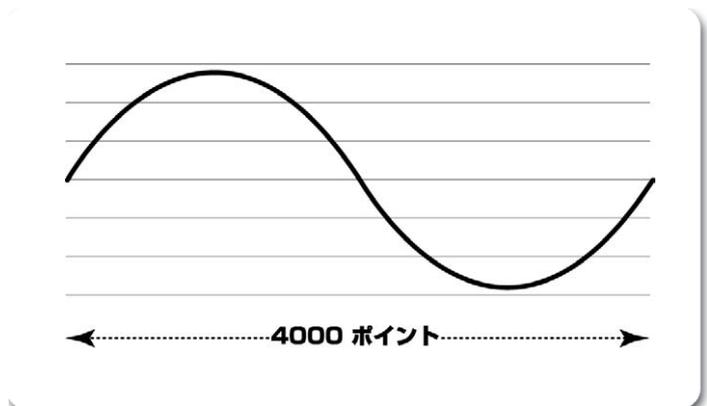
$$F_{\text{output}} = (\text{クロック周波数} \div \text{メモリ長}) \times (\text{メモリのサイクル数})$$

$$F_{\text{output}} = (100,000,000 \div 4000) \times (4)$$

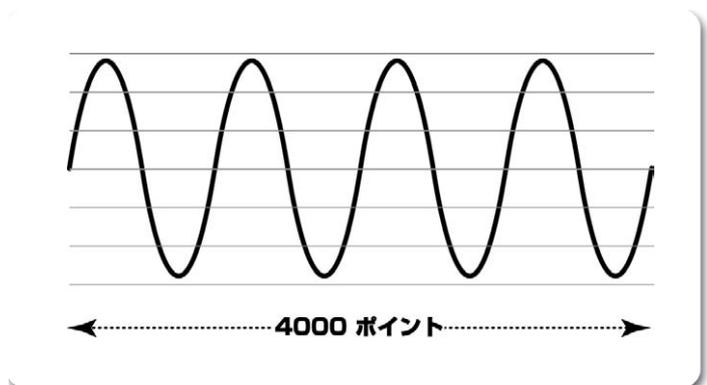
$$F_{\text{output}} = (25,000\text{Hz}) \times (4)$$

$$F_{\text{output}} = 100,000\text{Hz}$$

新しい周波数は 100kHz になります。図 23 にこの概念を示します。



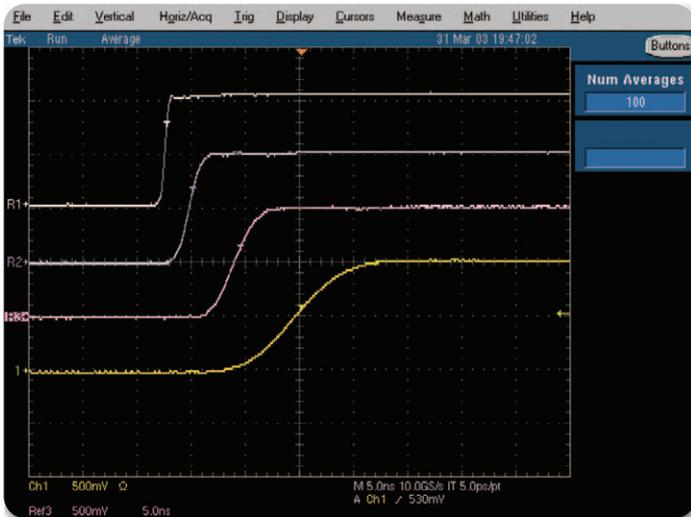
▶ 図 22. 1 サイクルで 4000 ポイントの波形は、クロック周波数が 100MHz の場合、25kHz の出力信号となります。



▶ 図 23. 4 サイクルで 4000 ポイントの波形は、クロック周波数が 100MHz の場合、100kHz の出力信号になります。

## 信号発生器のすべて

### ▶ 入門書



▶ 図 24. 周波数帯域と立上り時間の関係。立上り時間が高速な信号を出力するには十分に高い周波数帯域が必要です。

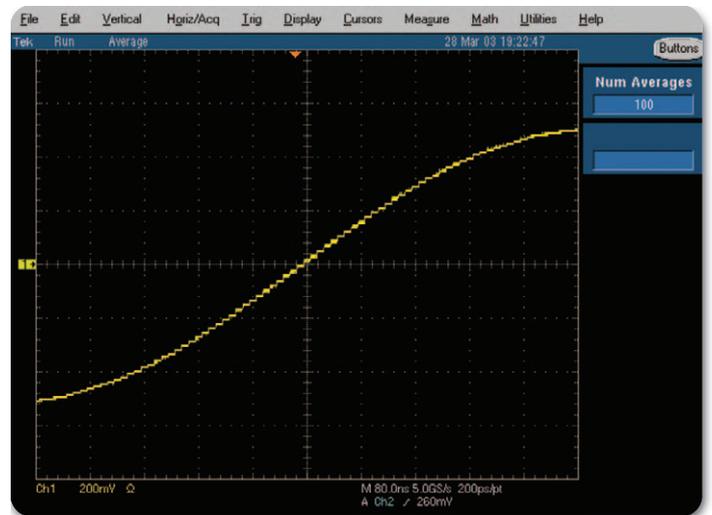
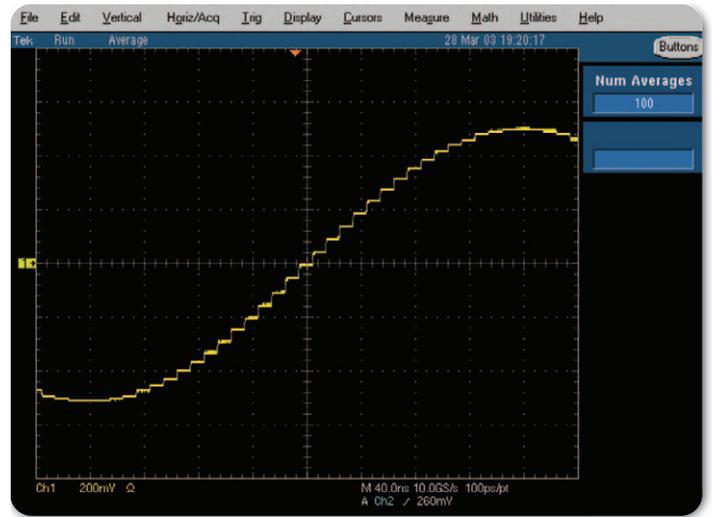
### 周波数帯域

計測器の周波数帯域は、サンプル・レートと無関係なアナログ用語です。信号発生器の出力回路が十分なアナログ帯域を備えていなければ、そのサンプル・レートでサポートできる最高周波数を扱うことはできません。言い換えると、信号の性能を劣化させずに、メモリからクロックで読み出した最高周波数と最小トランジション時間を持つ信号を通過させるには、十分な周波数帯域が必要です。図 24 に示すオシロスコープの画面には、適切な周波数帯域の重要性が示されています。一番上の波形は十分な周波数帯域を備えた信号発生器で出力した信号で、立上り時間の早いステップ波が得られますが、他の波形は周波数帯域が不足しているため、ステップ波の立上り時間は遅くなります。

### 垂直軸（振幅）分解能

ミックスド信号発生器の場合、垂直軸分解能は計測器が搭載している DA コンバータのバイナリ・ワード・サイズ（ビット数）に関係し、ビット数が多いほど高分解能になります。D/A コンバータの垂直軸分解能によって、再現する波形の振幅精度と歪みが決まります。分解能が不十分な DA コンバータは量子化誤差を助長し、不完全な波形を生成する原因になります。

ビット数は多いほど良い結果が得られますが、AWG の場合、高周波機器の分解能は一般的に 8 または 10 ビッ



▶ 図 25. 垂直軸分解能が低い場合の波形（上）と、高い場合の波形（下）。垂直分解能は、再現される波形の振幅精度を決定します。

トで、汎用計測器の 12 または 14 ビットより低い値になっています。分解能が 10 ビットの AWG では、計測器の電圧レンジ全体のサンプル・レベルは 1024 です。たとえば、この 10 ビット AWG のトータル電圧レンジが  $2V_{p-p}$  の場合、アーキテクチャの外部要因（出力アンプのゲインやオフセットなど）の制約を受けないと仮定すると、各サンプルのステップはおおよそ 2mV（外部アッテネータなしで出力できる最小ステップ）になります。

### 水平軸（タイミング）分解能

水平軸分解能は、波形の生成に使用できる最小の時間ステップを表します。一般的に、次の計算式で求められます。

$$T = 1/F$$

Tは時間分解能（秒単位）で、Fはサンプリング周波数です。

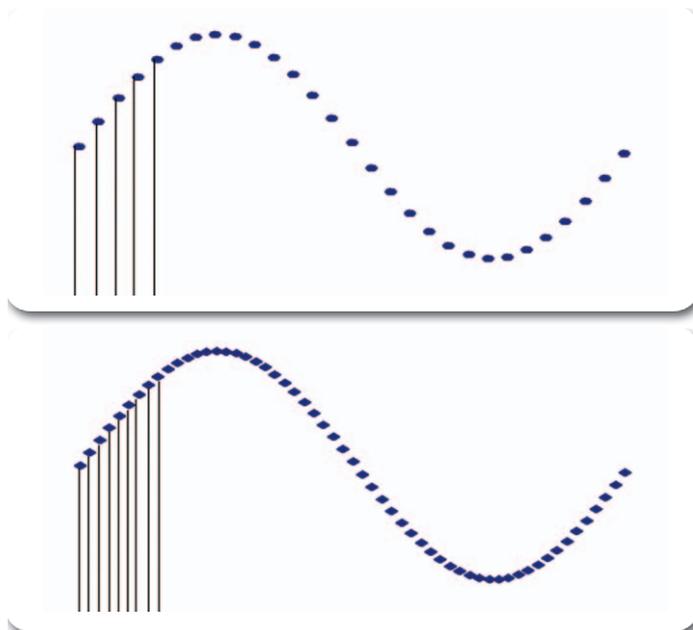
この定義によると、最大クロック・レートが100MHzの信号発生器の時間分解能は10nsになります。つまり、このミックスド信号発生器から出力される波形は、10ns間隔で定義されているということになります。

計測器の中には、出力波形の有効な時間分解能を活用できるツールが用意されているものもあります。これらのツールは分解能を向上するものではありませんが、ピコ秒レンジのステップで出力波形のエッジを移動することができます。

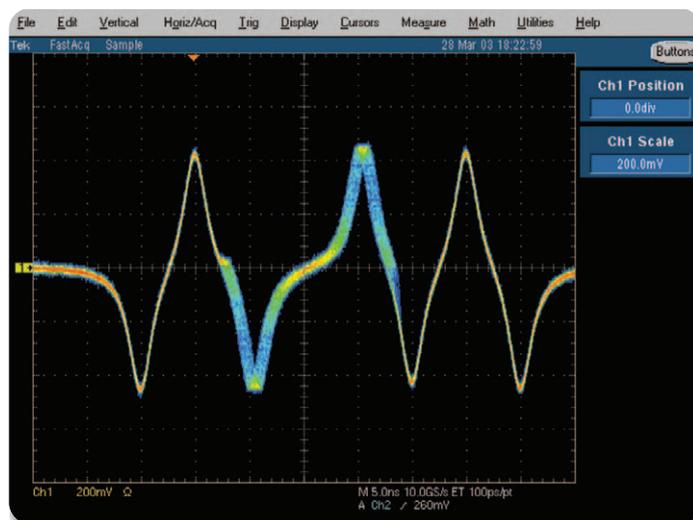
### シフト／ローテート

シフト／ローテート機能は、波形の特定のエッジを左右、またはプログラムされた中心値に近づく方向あるいは離れる方向にシフトします。シフト量がサンプリング間隔より小さい場合、シフトした値を導き出すために、オリジナル波形はデータ補間を使用して再サンプリングされます。

シフト／ローテートを使用すると、ジッタ状況の作成や、計測器の分解能を超える細かなエッジ配置の変更が可能になります。ここで再びクロックが100MHzの信号発生器を例に考えてみましょう。ジッタの効果をシミュレートしようとして10nsステップで波形のエッジをシフトするのは無意味です。それは、実際のジッタがそれより速いピコ秒単位で動作するからです。シフト／ローテートでは、実際のジッタ現象により近い数ピコ秒ずつのエッジ移動が可能です。



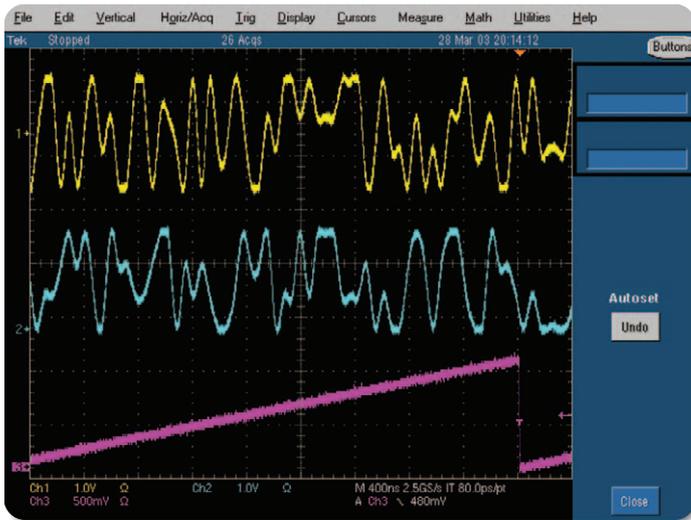
▶ 図 26. 水平軸分解能が低い場合の波形（上）と、高い場合の波形（下）。水平軸分解能またはタイミング分解能とは、エッジやサイクル時間、パルス幅を変更できる最小の時間ステップのことです。



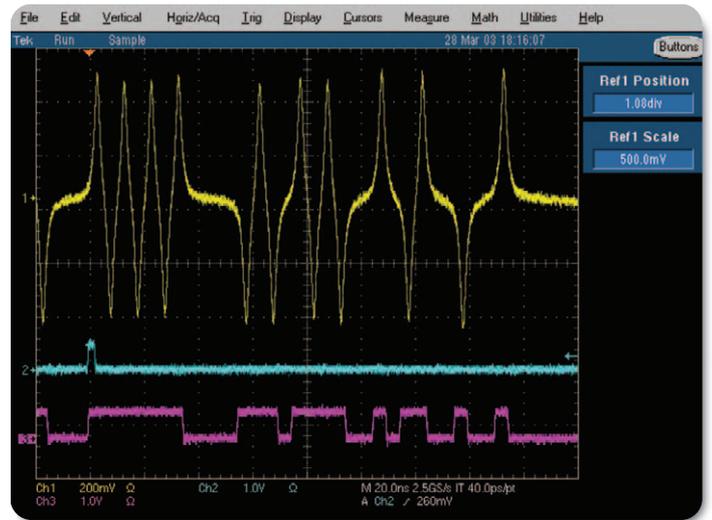
▶ 図 27. シフト／ローテート。

## 信号発生器のすべて

### ▶ 入門書



▶ 図 28. 複数の出力チャンネル。



▶ 図 29. マーカ出力。

### 出力チャンネル

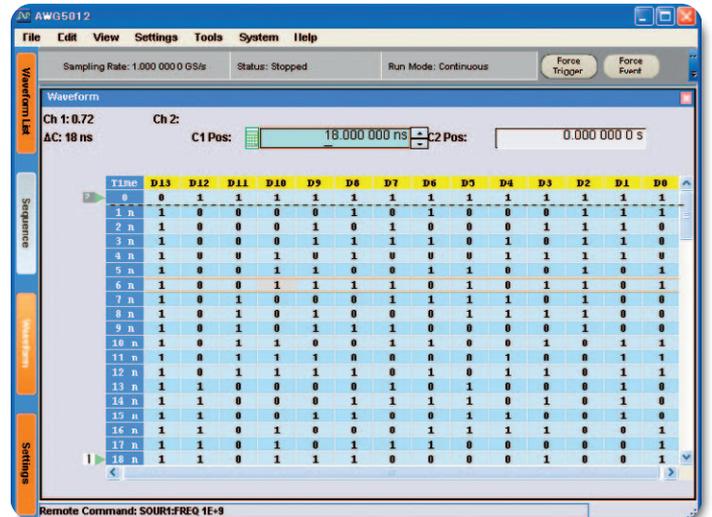
多くのアプリケーションでは、信号発生器に複数チャンネルの出力を必要とします。たとえば、自動車のアンチロック・ブレーキ・システムをテストするには、明らかに4つの信号が必要となります。生体物理研究のアプリケーションでは、人体内部で生成される各種の電気信号をシミュレートするため、複数の信号が必要となります。また、複雑なIQ変調を行う通信機器では、2つの位相に対し別個の信号が必要となります。

こうしたニーズに応えるため、さまざまな出力チャンネル構成を備えたAWGが出現しました。AWGの中には、フル周波数帯域のアナログ信号を4チャンネルまで出力できるものがあります。その他、ミックスド信号テスト用に2チャンネルのアナログ出力と、16チャンネルの高速デジタル出力の両方を備えているものもあります。後者のAWGでは、デバイスのアナログ・バス、データ・バス、およびアドレス・バスの信号を1台で生成することができます。

### デジタル出力

AWGの中には、アナログ出力とは別にデジタル出力を備えているものがあります。これらの出力は、マーカ出力とパラレル・データ出力の2種類に分類されます。

マーカ出力は、メインのアナログ出力信号と同期したバイナリ信号を供給します。通常、マーカを使用し、特定の波形メ



▶ 図 30. パラレル・デジタル出力。

モリ位置（サンプル・ポイント）と同期したパルスを出力できます。マーカ・パルスを使用すると、DUTがミックスド信号発生器からアナログ信号を受け取ると同時に、DUTのデジタル部分を同期させることができます。また、DUTの出力側にあるアキュジション計測器にマーカでトリガをかけることもできます。マーカ出力は、一般的にはメインの波形メモリから独立したメモリからサンプリング出力されます。

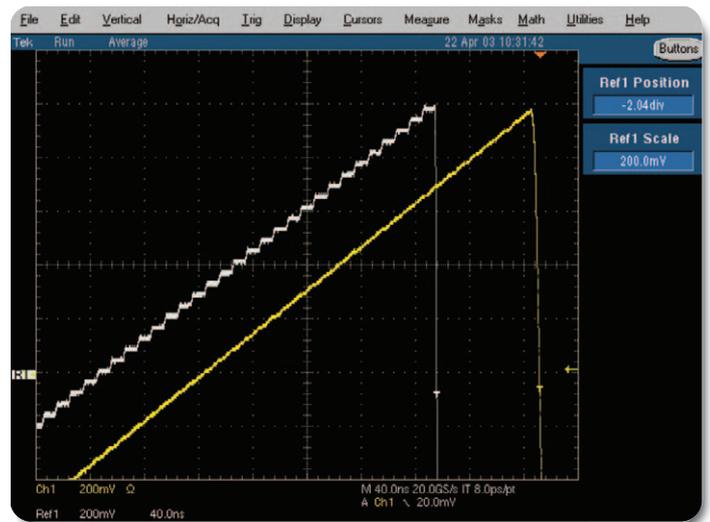
パラレル・デジタル出力は、ソースのメイン・アナログ出力と同じメモリからデジタル・データを出力します（図 30 を参照）。特定の波形サンプル値がアナログ出力に存在する場合、それに相当するデジタル値がパラレル・デジタル出力にも存在します。このデジタル情報は、D/A コンバータをテストするときに比較データとして使用できます。あるいは、デジタル出力をアナログ出力と独立してプログラムすることもできます。

### フィルタリング

基本波形を定義したならば、フィルタリングやシーケンスなどにより、基本波形を変更または拡張できます。

フィルタリングを使用すると、選択した帯域の周波数成分を信号から除去できます。たとえば、A/D コンバータ（ADC）をテストする際、信号発生器から供給するアナログ入力信号に、コンバータのクロック周波数の 1/2 以上の周波数成分がないことを確認する必要があります。こうすることにより、DUT 出力での不必要なエイリアシング歪みを防止でき、テスト結果の信頼性を高められます。エイリアシングとは、折り返し歪みが観測する周波数レンジに混入することです。DUT からエイリアス信号が出ている場合、意味のある測定結果は得られません。

こうした歪みを排除する信頼できる方法の 1 つとして、急勾配のローパス・フィルタを波形に適用し、指定ポイントより低い周波数を通過させ、カットオフ周波数より高い周波数成分を大幅に減衰させることが挙げられます。フィルタは、方形波や三角波などの波形の形状を変えるという目的で使用することもできます。このようにして、既存の波形を変更するほうが、新しい波形を作成するよりも簡単なことがあります。以前はこのような結果を実現するために、信号ジェネレータと外部フィルタを使用していました。幸い、現在の高性能信号発生器の多くには、制御可能なフィルタが内蔵されています。



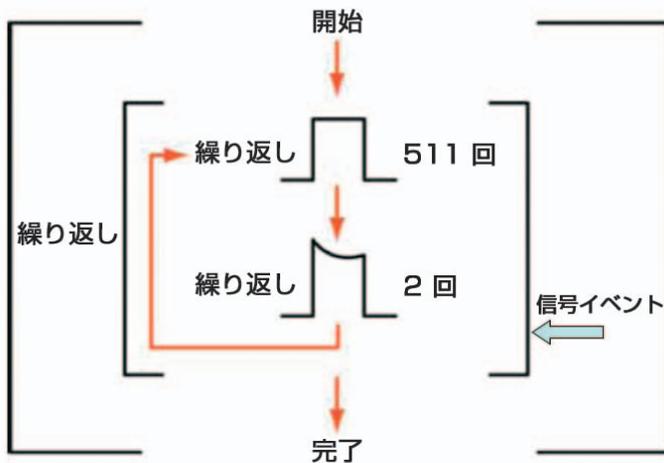
▶ 図 31. フィルタリングを使用する前と使用した後の波形。リファレンス 1（上）はフィルタリングを使用する前のランプ波形、チャンネル 1（下）はフィルタリングを使用した後のランプ波形です。

### シーケンス機能

DUT の完全な動作テストを行うために、長い波形ファイルを作成する必要が生じることがよくあります。波形の一部が繰り返される場合、波形シーケンス機能によって、面倒な波形プログラミング作業を大幅に減らすことができます。シーケンス機能を使用することにより、信号発生器の波形メモリに膨大な波形サイクルを「仮想的に」ストアできるというわけです。波形シーケンスは、コンピュータの世界と同様のループやジャンプなどの命令を備えています。これらの命令は、波形メモリとは別のシーケンス・メモリに常駐しており、波形メモリの指定セグメントを繰り返すよう指示します。外部イベントやその他の制御メカニズムで分岐するプログラマブル・リピート・カウンタは、動作サイクルの数と発生順序を決定します。シーケンス・コントローラを使用すると、ほとんど無制限の長さの波形を生成できます。

## 信号発生器のすべて

### ▶ 入門書



▶ 図 32. AWG の波形メモリ容量は、ループと繰り返しで拡張できます。

非常に簡単な例を挙げるために、4000 ワードのメモリで、メモリの半分（2000 ワード）に歪みのないパルスが、残りの半分に歪みのあるパルスがロードされている場合を想定します。メモリ内容の基本的な繰り返ししかできないとなると、信号発生器は停止を命じられるまで、2つのパルスをひたすら繰り返すしかできません。しかし、波形シーケンス機能ですべてが変わります。

たとえば、歪みのあるパルスを 511 サイクルごとに連続して 2 回出現させる必要がある場合、歪みのないパルスを 511 回繰り返した後、歪みのあるパルスにジャンプしてそれを 2 回繰り返すというシーケンスを定義し、これをループで繰り返し実行すればよいのです。図 32 にこの概念を示します。

ループの繰り返しは、無制限または指定値に設定したり、外部イベント入力を介して制御できます。すでに説明した、ストアされる波形サイクルの数と時間分解能との間のトレードオフについて考慮すると、シーケンス機能は、個々の波形の分解能を劣化させずに出力することができる柔軟性の高い機能といえます。

ここで、シーケンスにした波形セグメントは、その前の波形セグメントと同じ振幅レベルで継続する必要があることに注意してください。言い換えると、正弦波セグメントの最後のサンプル値が 1.2V であった場合、シーケンス内の次のセグメントの開始値も 1.2V でなければなりません。この値が異なると、DAC が急に新しい値に変わろうとしたときに、好ましくないグリッチが発生する可能性があります。

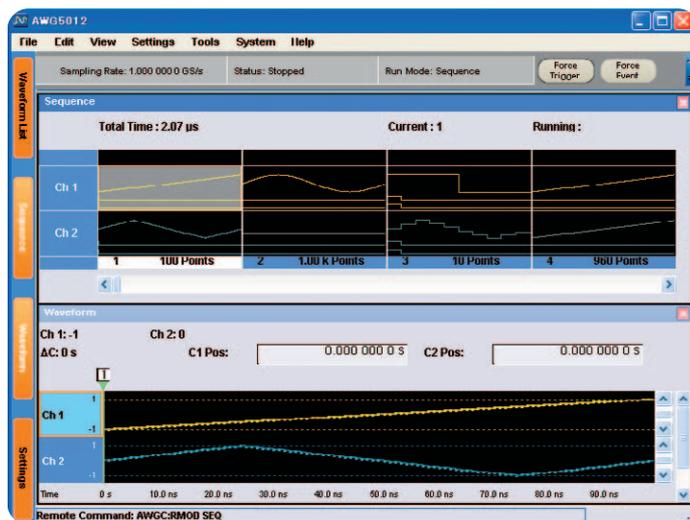
この例は非常に基本的なものですが、不規則なパターンによって生ずるエラーを検出するための必要な機能を示しています。一例として、通信回路のシンボル間干渉があります。シンボル間干渉は、あるサイクルの信号のステートが後続の信号に影響を及ぼすという現象です。これによる歪みははなはだしいと、信号の値が変わってしまうことさえあります。波形シーケンスを使用すると、数日または数週間にもわたる長期のストレス・テストを実行できます。

### 統合エディタ

形状は維持しながらも、先に進むにつれて振幅が変化するセグメントが必要だとします。この場合、すぐに思いつくのが、波形を再計算するか、オフラインの波形エディタを使用して波形を再描画するという方法です。たしかにそれでも振幅の変化を再現することはできます。しかし、このようなアプローチでは時間がかかりすぎます。より良い方法は、波形メモリの時間と振幅の両方を修正できる統合編集ツールを使用することです。

現在のミックスド信号発生器には、波形作成作業を簡略化できる、次のような編集ツールが用意されています。

- ▶ **グラフィック・エディタ** - 波形を作成し、その形状をグラフィックで確認することができます。データ・ポイントはコンパイルされ、波形メモリにストアされます。
- ▶ **シーケンス・エディタ** - コンピュータと同様のプログラミング制御構造（ジャンプ、ループなど）を使用して、保存されている波形の発生順序をシーケンスという形で定義することができます。



▶ 図 33. グラフィック・エディタとシーケンス・エディタ。この2つが組み合わされていることで、波形を柔軟に作成することができます。

## 信号発生器のすべて

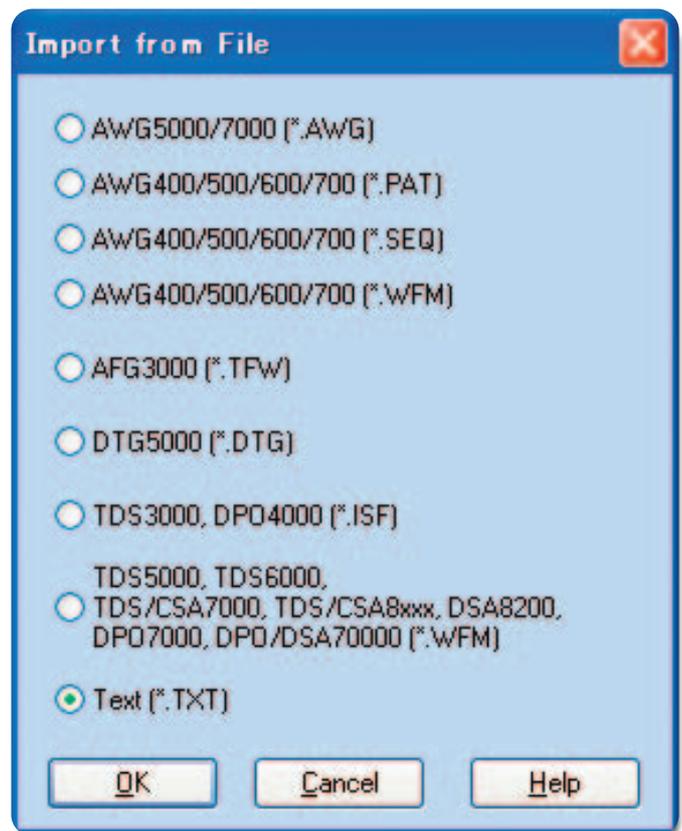
### ▶ 入門書

#### データのインポート機能

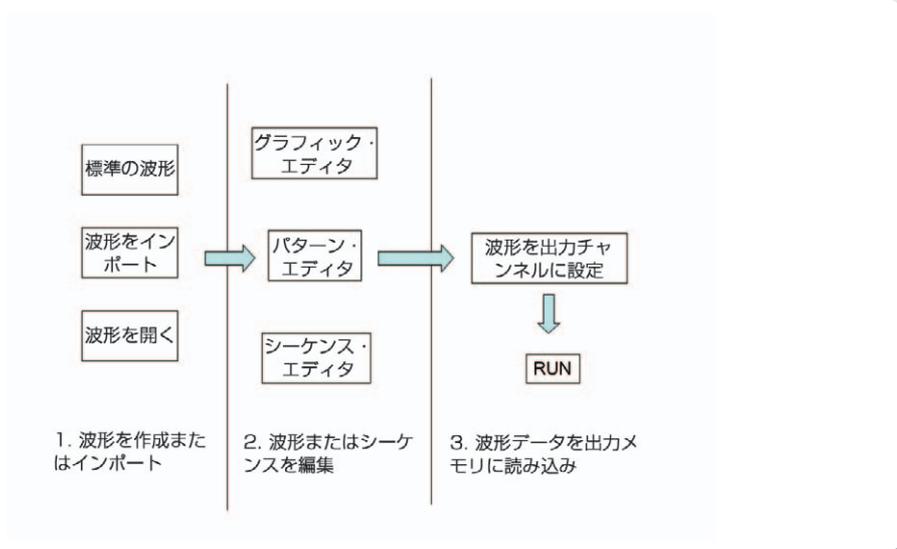
データ・インポート機能を使用すると、外部の信号発生器で作成された波形ファイルを利用して信号を生成することができます。

たとえば、最新のデジタル・ストレージ・オシロスコープで取り込んだ波形は、ミックスド信号発生器に簡単に転送できます。これにより、1 台の「理想的」なデバイスから取り込んだ信号を基準として使用し、そのデバイスの量産品を検査することができます。インポートした波形は、メモリにストアされている波形と同様に、編集ツールを使用して操作することができます。

また、シミュレータや他の EDA ソフトウェアで作成した波形も取り込むことができます。EDA データを取り込み、ストアして、修正を加えることができるため、初期の設計プロトタイプの開発を早めることができます。



▶ 図 34. データ・インポート機能。



▶ 図 35. AWG を使用した波形作成のステップ。

### ミックスド信号発生器による波形作成

現在のミックスド信号発生器、特に AWG には、波形を生成、編集するための機能、ツールが充実しています。また、特定のアプリケーションにそのまま使用できる波形が用意されている信号発生器もあります。図 35 に、AWG を使用して信号を生成する手順（ステップ）を示します。

一度作成した波形ファイルは、消さずに保存しておくことができます。波形（または波形のセグメント）は、当初の目的とした作業が完了した後で、別の使い道が出てくる可能性があります。そこで、AWG には波形ファイルとシーケンスをいつまでも保存しておくことのできるローカル・ハード・ディスクが装備されています。最初のステップでは、標準の波形関数で波形を生成するか、他の計測器またはシミュレーション・ソフトウェアから波形をインポートします。

波形の編集（または作成）のステップでは、用意されているユーザ・フレンドリなエディタが役に立ちます。波形エディタでは、基本となる「生」の波形セグメントに対して、数学演算やカット・アンド・ペーストなどのさまざまな方法で修正を加えることができます。

パターン・エディタは、デジタル・データ波形の修正に最適です。AWG のパターン・エディタでは、特定のビットだけを対象にタイミングや振幅のパラメータを変更することができます。本来、デジタル処理を意図しているはずのデジタル・ジェネレータでも、ここまではできません。

サイン関数など簡単な関数波形は内蔵のエディタで生成できます。また、カット・アンド・ペースト編集により、複雑な波形の作成を簡略化できます。

## 信号発生器のすべて

### ▶ 入門書

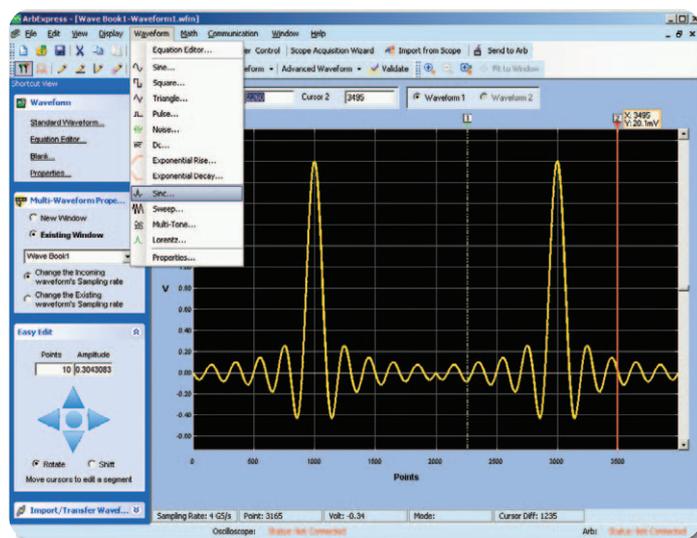
AWG をセットアップする最後のステップは、生成した波形データを波形メモリにロードすることです。「ロード」操作（実際にはカット&ペースト操作）により、波形が AWG の波形メモリに読みこまれ、ここで多重化され、DAC を通してアナログ形式で出力されます。

AWG から波形を出力するには、基本的なステップがあります。前述したように、シーケンス・エディタを使えば、波形ファイルを連結して一つのシーケンスにし、ほぼ無制限の長さとおある程度の複雑さを持つ単一のストリームを出力できます。

### ArbExpress による波形作成

ArbExpress などのソフトウェア・パッケージを使用すると、波形のインポート、作成、編集が簡単になります。ArbExpress は、AWG および AFG 用の波形作成および編集ツールです。この Microsoft Windows (PC) ベースのアプリケーションを使用すると、当社オシロスコープから波形を取り込むことや、標準の波形ライブラリから波形を作成することができます。

スコープ・アキュイジション・ウィザードを使用すると、オシロスコープとの接続が簡単に行え、使用可能なチャンネルとメモリ位置から、データ・ソースを簡単に選択できます。波形は、全体をインポートすることもできれば、カーソルで抽出したセグメントのみをインポートすることもできます。波形は、使用する信号ジェネレータの時間分解能に一致させるように、リサンプリングすることも可能です。



▶ 図 36. PC 用の ArbExpress による任意波形の作成と編集。

ArbExpress では、ポイント描画ツールまたは数値データの表入力を通して、標準波形を基にした波形を自由に定義することもできます。波形を作成したあと、カーソルと編集ツールを使用して、簡単に異常を加えることができます。セグメントまたは完全な波形を時間軸または振幅軸でシフトすることも可能です。この機能により、簡単に実環境の信号を生成できます。

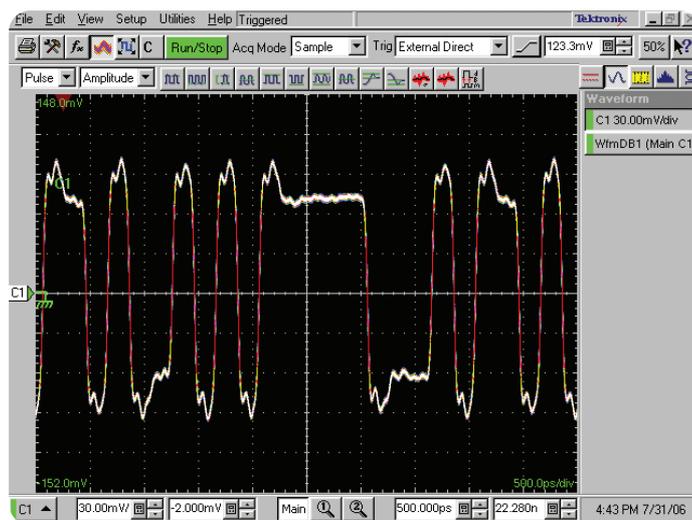
## AWG のアプリケーションの傾向

### プリアンファシス/ディアンファシス信号の生成

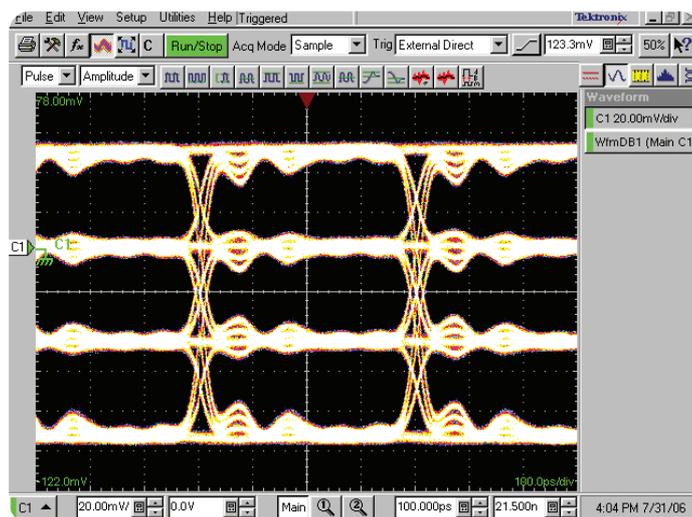
高速化の一途をたどる伝送速度に対応し、損失の大きい伝送路の周波数特性を補正するため、プリアンファシス/ディアンファシス技術が広く使われるようになってきています。PCI Express などのシリアル・データ規格においても、コンプライアンス・テストの項目にプリアンファシス/ディアンファシスのテストが含まれています。プリアンファシスの基本原理は、同じ値のビットがいくつか連続する場合、先頭ビットの電圧を後続ビットよりも大きくする（強調する）というものです。これにより、伝送ラインの周波数特性が補正され、受信側における信号忠実度が高くなります。高い品質で直接出力することができ、複数のチャンネルやパワー・コンバイナを介した面倒な信号生成は、もう必要ありません。

### マルチレベルの信号生成

シリアル・インタフェースに対する要件も厳しくなる一方です。より高速なデータ・レートが求められ、ケーブルや回路の性能はもはや理論的な限界近くまできています。転送速度を上げずにデータ・レートを上げる技術の 1 つにマルチレベル信号があります。これは 2 つのレベル（値）を持つ標準のバイナリ信号とは異なり、3 つ以上のレベル（値）を持つ信号のことです。複数レベルの不連続な振幅を持つ信号、という言い方もできます。一般には、パルス振幅変調（PAM）と言います。たとえば、4PAM 信号、すなわち 4 つの異なる振幅を持つ信号であれば、同じ転送速度でもデータ・レートは 4 倍になります（図 38 を参照）。



▶ 図 37. 5Gbps のプリアンファシス/ディアンファシス信号。



▶ 図 38. 20Gbps、4PAM 信号。

## 信号発生器のすべて

### ▶ 入門書

#### 広帯域 RF 信号の生成

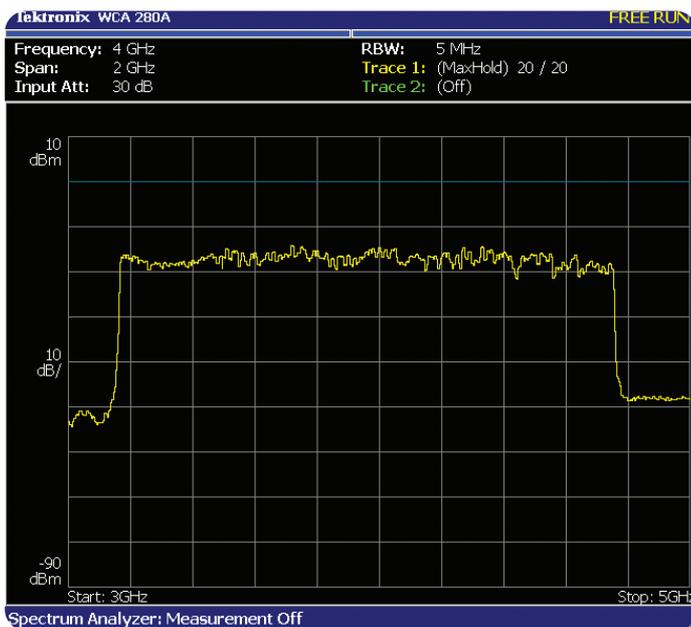
RF 信号の領域では（ワイヤレス・マウスから衛星画像受信に至るまで）、十分なサンプル・レートと分解能を持ち、どんなに複雑な RF 信号でも検証することのできるテスト機器が必要です。最新のデジタル RF 技術を採用したレーダや UWB などの無線分野では、既存のテスト機器では対応しきれないケースもあります。AWG は、キャリア周波数 5GHz まで、周波数帯域 5.8GHz までの RF 信号を直接生成し、D/A コンバータ経由で出力することができます。IF 信号または RF 信号を直接生成できるため、I/Q 変調によって波形品質が低下する心配はありません。また、I/Q 変調を使った従来の信号生成とは異なり、面倒な調整の必要もありません（図 39 を参照）。

#### 無線 I/Q および IF 信号の生成

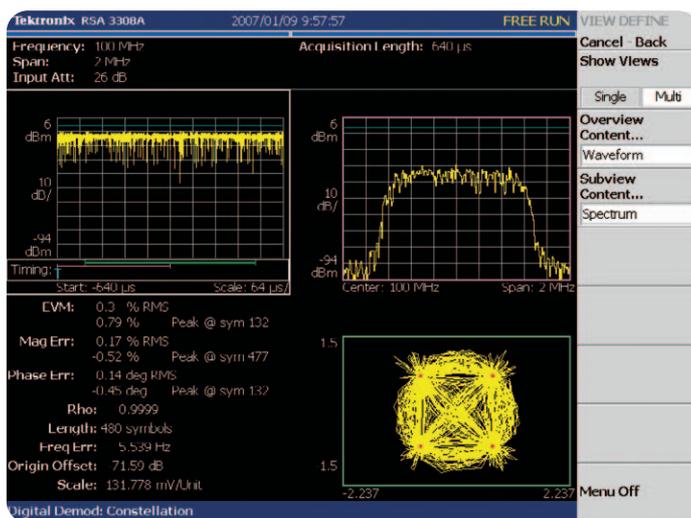
デジタル RF 技術により、無線ネットワークの容量、性能は著しく向上しています。最新のデジタル変調、広帯域変調信号を発生できる十分な性能を持つ当社の任意波形ジェネレータは、デジタル RF 技術の開発、製品の設計・検証をサポートします。

最新の AWG は、14 ビットの垂直分解能で十分なダイナミック・レンジと SFDR を実現し、狭帯域の IQ アプリケーションから広帯域の IF アプリケーションまで幅広いニーズに対応することができます。

AWG はアナログ IQ/IF 信号だけでなく、デジタル・データ IQ/IF を出力することもできます。WLAN/WiMax で利用される複数のアンテナを用いた空間多重による MIMO (Multiple Input Multiple Output) システムは、信頼性の高い、高速データ・レート通信のための最新技術です。最新の AWG は最大で 4 つのアナログ出力チャンネルを持ち（2 台の AWG で 8 チャンネル）、同期した MIMO 信号を出力することができます（図 40 を参照）。



▶ 図 39. UWB (MBOA) 3 バンド (480Mbps 1795 MAC バイト、96 シンボル・ペイロード)。



▶ 図 40. EVM / コンスタレーション測定。

## ロジック信号発生器

### ロジック信号発生器の種類

ロジック信号発生器は、デジタル・テストに適した専用のツールであり、特定の情報内容とタイミング性能を持つ、長く連続的なバイナリ・データ・ストリームを必要とするデジタル・デバイスを駆動するために必要な信号を生成します。ロジック信号発生器には、パルス・パターン・ジェネレータとデータ・タイミング・ジェネレータの2種類があります。

#### パルス・パターン・ジェネレータ (PPG)

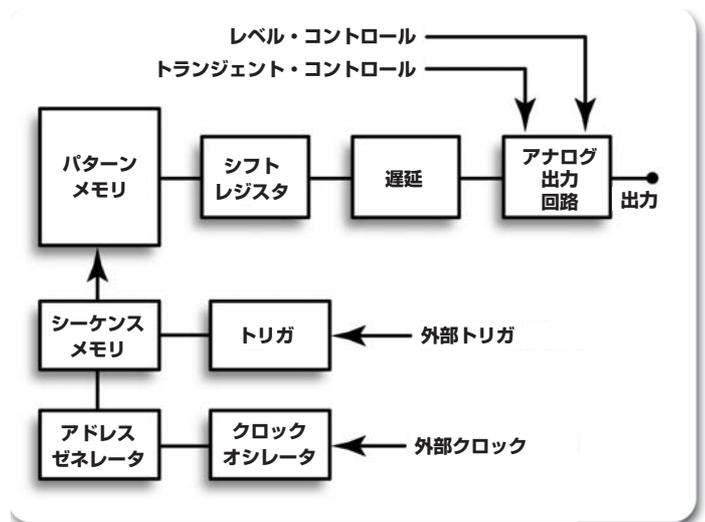
パルス・パターン・ジェネレータは、少ない出力チャンネルから、通常は非常に高い周波数の方形波またはパルスを生成します。ストリームが変調されていない限り、通常パルスには情報内容（データ）は入りません。しかし、高機能パルス・ジェネレータは、高い周波数と高速の立上り時間を備えているため、高速デジタル機器をテストする理想的なツールです。

#### データ・タイミング・ジェネレータ (DTG)

AWG および AFG がアナログの形状と性能を持つ波形を生成することを主な目的としているのに対して、データ・タイミング・ジェネレータは、大量のバイナリ信号を生成することを目的としています。データ・タイミング・ジェネレータは、パターン・ジェネレータあるいはデータ・ジェネレータとも呼ばれ、コンピュータ・バス、マイクロプロセッサなど、デジタル・コンポーネントのテストに必要な、1と0のストリームを生成します。

設計部門では、データ・タイミング・ジェネレータは、デジタル・デバイスをテストするために不可欠な信号発生器です。この計測器は広い意味で、新しく設計した回路の機能テストやデバッグ、そして以前に設計した回路のエラー解析に役立ちます。タイミングと振幅のマーzin評価をサポートする便利なツールでもあります。

製品開発サイクルの初期段階では、未完成のシステム・コンポーネントの代わりに DTG を使用することもできます。



▶ 図 41. PPG あるいは DTG の簡易ブロック図。

たとえば、信号を供給するプロセッサがまだ出来上がっていない場合、DTG をプログラミングして新開発のバス回路に割り込みとデータを送信するといった使い方が考えられます。また、DTG は、メモリ・バスにアドレスを供給したり、正弦波に相当するデジタル波形を D/A コンバータに供給するという目的にも使用できます。

DTG には、並外れて長いパターンや時折発生するエラーをデータ・ストリームに埋め込む能力があるため、軍や航空宇宙の標準規格に対する適合性を保証する長期間の信頼性テストにも使用できます。さらに、DUT からの外部イベントで制御できるシーケンス機能を持っているため、要求の厳しい性能評価の用途においても、より高い柔軟性を実現しています。

DTG は、ASIC や FPGA などの半導体デバイス、あるいはハード・ディスク・ドライブの書き込み回路や DVD などの回転メディアのテストにも適しています。同様に、CCD イメージ・センサや LCD 表示ドライバ/コントローラのテストにも役立ちます。DTG は、DUT を駆動するのに複雑なデジタル・ビット・ストリームを発生することで、効果的なソリューションを提供します。

## 信号発生器のすべて

### ▶ 入門書

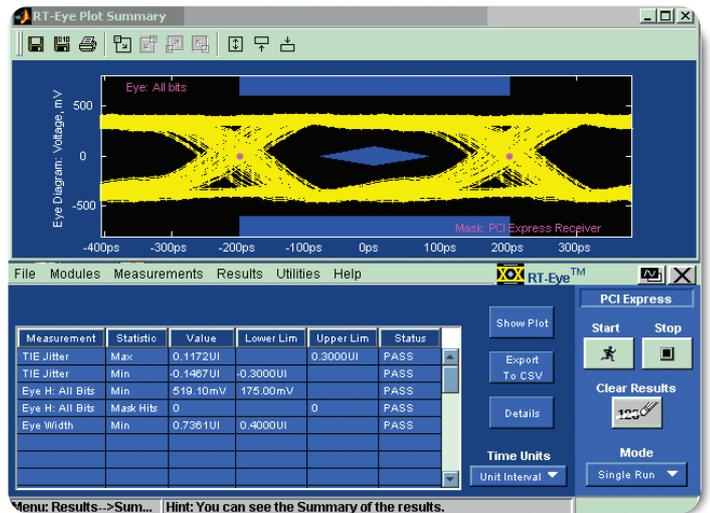
DTG の回路には、AWG や AFG と同様に、アドレス・ジェネレータ、波形（またはパターン）メモリ、シフト・レジスタなどが含まれていますが、D/A コンバータは含まれていません。デジタル・テストでは常にレベルが変化するアナログ波形は必要ないので、パターン・ジェネレータでは D/A コンバータは必要ないのです。DTG にはアナログ出力回路がありますが、この回路は、パターン全体に適用される電圧とエッジのパラメータを設定することを目的としたものです。ほとんどの DTG には、パターン用の論理 1 と 0 の電圧値を設定する機能が用意されています。

DTG には、ジッタとタイミング・テストをサポートするために設計された、いくつかのデジタル機能が備わっています。特別な遅延回路が、エッジ位置の微調整を実現しています。

遅延回路は、エッジ位置をピコ秒のオーダーで細かく移動することができます。最新の DTG では、前面パネルの専用ノブを装備しているものがあります。これにより、すべてのエッジまたは選択されたエッジを 5ns あるいはそれ以上の範囲で、0.2ps ステップで移動することができます。これらの微細なタイミング変化は、公称の中心点付近でパルス・エッジを不規則に移動させることにより、典型的なジッタ現象をモデル化できます。クロックに対するエッジ・タイミングを変更し、その効果を観察することにより、ジッタ許容範囲のテストを行うことができます。

現在の最新鋭の DTG では、このジッタをパターン全体に適用できるのはもちろん、特定のエッジをピンポイントで指定できるマスキング機能を使用して、特定のパルスだけに適用することもできます。図 42 に示す波形は、パターン・ジェネレータでジッタ効果を付加して出力した信号を、デジタル・フォスファ・オシロスコープ (DPO) で取り込んだものです。

最近の DTG にはこれ以外にも、重要なジッタ・テストに柔軟に対応できる機能も備わっています。たとえば、外部アナログ変調信号でエッジ移動量（ピコ秒）とエッジのスルー・レートの両方を制御できる機種もあります。これだけ多くのジッタ変数を自由に変更できるので、DUT に広範なストレスを加えることができます。



▶ 図 42. DTG は、タイミング・シフト機能を使用して、ジッタをシミュレートできます。

セットアップ／ホールド時間違反などのタイミング問題のテストでは、遅延回路もまた同様に重要な役割を果たします。ほとんどのクロック制御デバイスでは、データ信号はクロック・パルスの出現前に数ナノ秒（セットアップ時間）存在し、クロック・エッジの後に数ナノ秒間（ホールド時間）有効である必要があります。遅延回路は、こうした一連の条件を容易に実現できます。テストでは、クロック・エッジを一定に維持しながら、入力データ信号のクロック・エッジとトレーリング・エッジを、それぞれ一度に数分の 1 ナノ秒移動します。DUT から出力された信号を、オシロスコープあるいはロジック・アナライザで取り込みます。DUT が入力状態と一致した有効なデータを送出し始めたときの、データのリーディング・エッジの位置がセットアップ時間です。このアプローチは、予測不可能な DUT 出力のメタステーブル条件を検出するためにも使用できます。

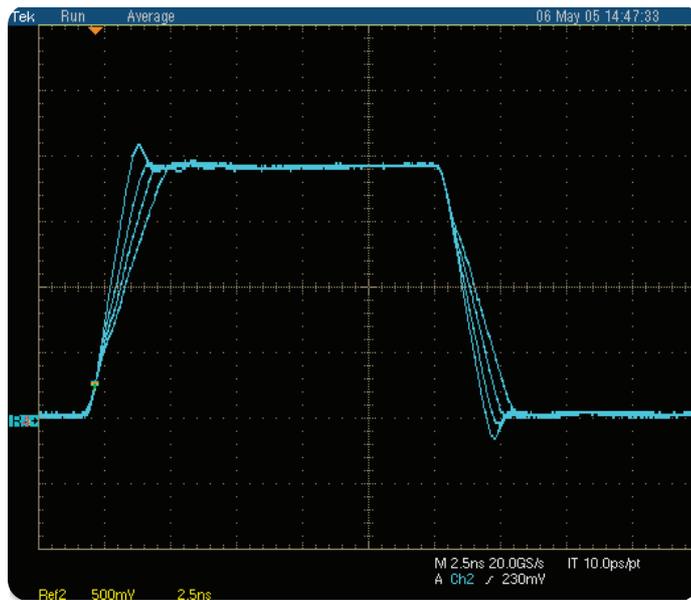


▶ 図 43. 電圧変動をプログラムしたパターン・ジェネレータの出力信号。単一の電圧レベルがパターン全体に適用されます。

DTG の機能には、フィルタリング、変調などの信号処理操作は含まれていませんが、出力信号を操作するツールがいくつか用意されています。デジタル設計上の問題は、ジッタやタイミング違反など純粋なデジタル上の問題に限定されていないため、これらの機能が重要となります。設計ミスの中には、異常な電圧レベルや立上り時間の遅いエッジなど、アナログ現象の結果によるものもあります。パターン・ジェネレータは、この両方をシミュレートできる必要があります。

駆動信号の電圧変動による影響をテストすることは、主要なストレス・テスト項目です。デジタル DUT をさまざまな電圧レベル、特にデバイスの論理しきい値より低いレベルで動作テストすることにより、デバイスの性能と信頼性を全体的に予測できます。間欠的（かつ追跡が困難な）エラーが発生する DUT は、電圧が下がるとまず間違いなく「ハード」エラーを起こします。

図 43 は、いくつかの離散した論理レベルを生成するように、DTG をプログラムした場合の効果を示します。ここには、いくつかの命令の実行結果を累積したものが表示されていますが、実際には命令は、単一の電圧レベルをパターン全体に適用します。



▶ 図 44. 立上り時間をプログラムしたパターン・ジェネレータの出力信号。

エッジのトランジション時間や立上り時間も、デジタル設計で生ずる問題の別の原因になることがよくあります。エッジ・トランジションが遅いパルスは、時間内に次のデバイスをトリガして、正確にデータの送受を行うことができません。遅いエッジは競合条件だけでなく、間欠的なエラーを引き起こす、もう一つの原因になることがよく知られています。累積した多数の設計要因、特に分布容量やインダクタンスは、送信側から受信側に移動する間にパルスの立上り時間を劣化させる可能性があります。このため、エンジニアは、その回路が一定範囲の立上り時間を確実に保持できるように工夫します。電圧変動と同様に、パルス・エッジ・レートの低速化も、ストレスとマージン・テストの中に含まれています。DTG の出力にトランジェント・タイム・コンバータを接続することにより、エッジ・レートを変化させることができます。図 44 に、プログラマブル・スルー・レート機能の効果を示します。

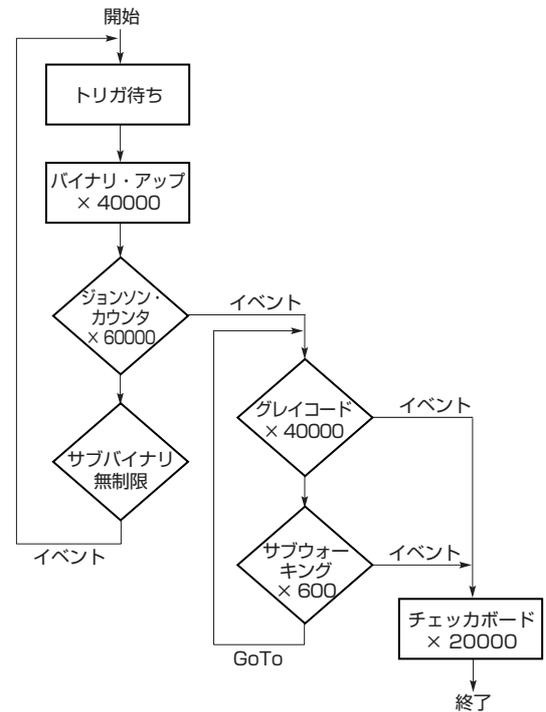
## 信号発生器のすべて

### ▶ 入門書

DTG はデジタル測定アプリケーションに特化しており、高機能シーケンサ、複数出力、各種のパターン・データ・ソース、独特の表示など、AWG や AFG には見られない独自の機能が充実しています。

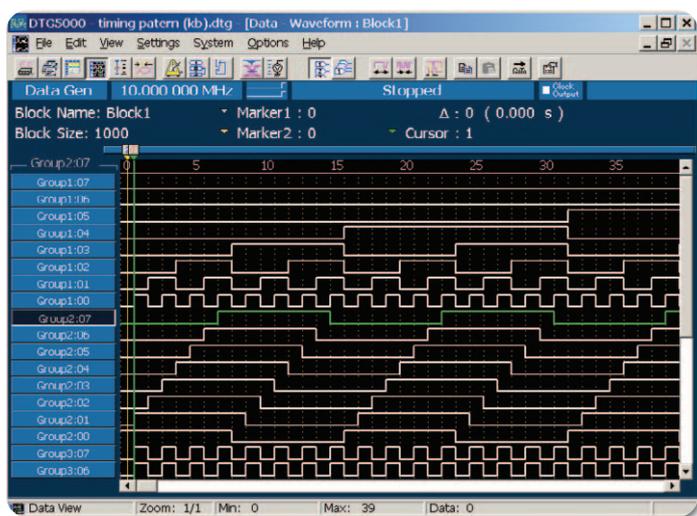
DTG には、デジタル・デバイスのテストに必要な数百万ものパターン・ワード (ベクトル) をストアできるほど大きな容量のメモリは内蔵されていません。そのため、パターン・ジェネレータには、データとパターン生成に不可欠な、高性能のシーケンサ機能が搭載されています。DTG は非常に長い複雑なパターンを送出し、外部イベント (パターン・ジェネレータのシーケンサ内で分岐実行を促す DUT 出力条件など) に応答する必要があります。DTG のパターン・メモリ容量は最大でも 640 万ビット前後といったところですが、AWG と同様に、短いパターン・セグメントをループすることにより、非常に長いデータ・ストリームを生成することができます。また、外部イベントやトリガを待ち、一連のリピート・カウントや条件ジャンプを実行できます。さらに、DTG のシーケンサには、多重レベルのループ・ネスティングや分岐条件が用意されています。シーケンサは通常のプログラミング手法で制御できるツールで、考えられるほとんどすべてのデジタル・デバイスのアドレス、データ、クロック、そしてコントロールを生成します。DTG のシーケンサには、パターン長を無制限に拡張する独自の機能が備わっています。図 42 に、少数の短い命令とパターン・セグメントで、何百万ラインに渡るパターン・データを生成するフローを示します。

DTG の多チャンネル出力もまた、デジタル設計用途には適切です。AWG や AFG には 2 または 4 チャンネルの出力しかありませんが、パターン・ジェネレータには、8、32、さらには百数十チャンネルの出力があり、多チャンネルを必要とする一般的なデジタル・デバイスのデータやアドレス入力をサポートできます。複雑なデジタル・パターンの手入力



▶ 図 45. ループや条件ジャンプを使った DTG のシーケンス・フロー。

は途方もなく単調でエラーを起こしやすいために、最近の DTG はロジック・アナライザやオシロスコープ、シミュレータ、さらにはスプレッドシートからもデータを入力できる機能を備えています。さらに、デジタル・データは、通常、設計プロセスのさまざまなシミュレーションや検証ステップからも入力することができます。



▶ 図 46. マルチチャンネル DTG のバス・タイミング表示。

DTG の画面は、AWG のように信号振幅と時間の関係を詳細に表示するよりも、同時に多チャンネルのパターン・データを詳細に表示する必要があります。マーカ機能やスクロール機能など、短時間で目的のデータを探し出して表示する機能も求められます。図 46 に、マルチチャンネル・パターン・ジェネレータの表示例を示します。

最後に、DTG は電圧精度や立上り時間性能、エッジ・ポジションなどを含む厳しいパルス・エッジ特性を必要とするテストによく使用されます。残念ながら、高品質の信号を計測器の前面パネルにあるコネクタから供給するだけでは不十分です。計測器から 1m 以上離れたテスト・フィクスチャに、ケーブルやコネクタを経由して信号を伝送する必



▶ 図 47. DG2020A 型パターン・ジェネレータと外部信号インタフェース「ポッド」。

要があることもよくあります。このような条件でケーブルやコネクタを経由した場合、信号タイミングやエッジ細部は著しく劣化します。最近のパターン・ジェネレータでは、外部信号インタフェースを使用してこの問題を解決しています。このインタフェースは、信号をバッファして、計測器の性能を保ったまま信号を DUT まで届けます。図 47 に、信号インタフェースを装備した DG2020A 型パターン・ジェネレータを示します。このインタフェースは、ケーブル・キャパシタンスによる立上り時間の劣化を最小限に抑え、ローカル電流を十分に供給して、「ロー・ダウン」なしで DUT 入力を駆動します。

## 信号発生器のすべて

### ▶ 入門書

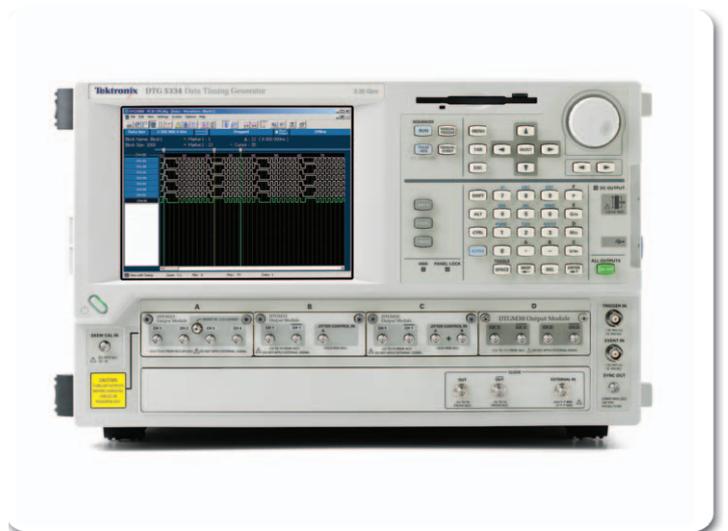
#### ロジック信号発生器のシステムと操作パネル

図 45 に、高性能ロジック信号発生器である当社 DTG5334 型データ・タイミング・ジェネレータを示します。

ロジック信号発生器は、ミックスド信号発生器のように、メニュー・ベースの操作の他に、前面パネルにダイレクト・アクセスのボタンがあり、タイミングやレベルなどの共通の設定をすばやく行うことができます。最新のロジック信号発生器は、デジタルのニーズに対応した専用の使いやすい機能と、類似の AWG と明らかに異なる拡張パターン開発ツールを備えています。

図 48 に示す**タイミング・コントロール画面**は、Windows ベースのアーキテクチャを使用しています。その他の機種では、独自の各種インターフェースを使用しています。Windows 環境には、ネットワークや周辺機器、USB などの I/O バスと簡単に接続できる利点があります。DTG ユーザ・インターフェースは、パターン・シーケンス作成、レベル設定、一般的なデータ入力を行うための表示画面です。ロジック信号発生器には、大画面の外部モニタに接続できる VGA 出力が用意されているものもあります。

また多くの機種では、頻繁に使用する必要のある機能（データ値、タイミング、振幅値の設定など）については、前面パネルの専用の**ショートカット・ボタン**でアクセスできるようにになっています。このボタンを使用すると、わずらわしいメニュー操作なしで値を設定でき、時間を節約できます。



▶ 図 48. 高性能ロジック信号発生器の DTG5334 型データ・タイミング・ジェネレータ。

**Run/Stop Sequence** ボタンを押すと、ストアされたシーケンスの動作を開始できます。さらに条件が整えば、メイン出力コネクタからパターン・データの送出手続きが開始されます。通常、パターン・データ出力開始の条件は、**Manual Trigger** ボタンまたは **External Trigger** 入力によってトリガが発生し、しかも **Output On/Off** ボタンが有効になっていることです。Output On/Off ボタンは、テスト・プログラムを開発時に出力信号を遮断して、接続された DUT にデータが送信されないようにするために使用します。

**Menu/Navigation キー、スクロール・ノブ、数値キーパッド**は、プログラム開発に使用します。Menu/Navigation キーはメニュー操作に、スクロール・ノブとキーパッドはタイミング値やバイナリ・データなどの数値データ入力に使用します。

モジュラ形式は、最近のロジック・ファミリとバス・アーキテクチャの多様な電氣的要件に対応できる有効なソリューションです。モジュールは特定のロジック・ファミリに応じてインピーダンス、電流、電圧などのパラメータを最適化でき、所定の範囲で最高の精度を確保できます。さらに、モジュラ形式は不要のモジュールを省いてコストを節約できます。計測器本体には、最小で 4 チャンネル、最大で 32 チャンネルの出力を実装できます。

前面パネル以外に、後部パネルにも重要な同期出力があり、業界標準の 10MHz クロックとシステム・クロック信号（ロジック信号発生器の現在の動作周波数）、メイン・クロックの整数倍で信号を送出するフェイズ・ロック・ループ出力が含まれています。これらすべての信号を使用して、アキュジション計測器、DUT 自身、さらには他の信号発生器とも同期できます。前面パネルにある Sync Output も、日常的な同期出力発生に使用できます。

### 性能に関する用語と注意事項

デジタル信号発生器の性能パラメータは、その多くがアナログ信号発生器の AWG や AFG と共通しています。

### データ・レート

データ・レートは、デジタル信号発生器がバイナリ情報のフル・サイクルを出力できるレートを示します。サイクル内の実際のデータ・ビットによっては、ステートが変更される場合も、変更されない場合もあります。サイクルの境界間の時間によって、メガビット／秒またはギガビット／秒のデータ・レートが決まります。

### パターン長

AWG のメモリ容量と同様に、パターン長によって、パターン生成のためにストアできるデータの最大量が決まります。メモリ容量が大きいほど、より多くのパターンをストアできます。デジタル信号発生器は、シーケンス機能でパターン・ワードを組み合わせてほぼ無制限のデータ・パターンを生成できます。

### 垂直軸（振幅）分解能

垂直軸（振幅）分解能とは、信号発生器内でプログラミングして電圧を可変できる最小ステップのことです。デジタル・コンテキストでは、この数値は対象のデバイス・ファミリに応じてセットアップするロジック・レベルに関係します。公称では「固定」になっていますが、このレベルは一定範囲内で修正して、電圧低下テストのようなストレス・テストを行うことができます。垂直軸分解能によって、この電圧変更の最小ステップが決まります。

### 水平軸（タイミング）分解能

水平軸（タイミング）分解能とは、エッジ、サイクル時間、パルス幅などを変更できる最小時間間隔のことです。

## 信号発生器のすべて

### ▶ 入門書

#### 出力チャンネル

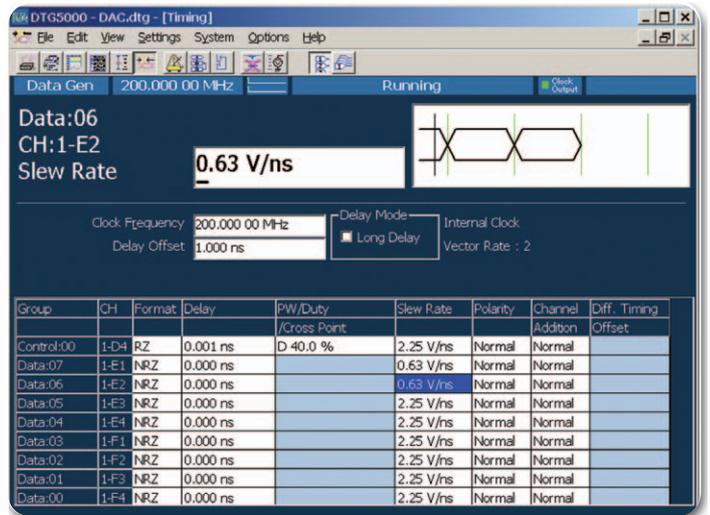
デジタル・パターン・ソースは、アナログ信号発生器とは異なり、一般的に多くの DUT 入力を一度に駆動します。単一のデジタル・コンポーネントまたはバスでは、信号発生器から 8 または 16 チャンネル以上の出力が必要になります。計測器には、これらの信号を 1 つのグループにまとめ、多くの信号を 1 つのものとして操作できるチャンネル・グルーピング機能が必要です。一般的な例としては、アドレス信号に対応する全てのチャンネルをあるグループに、データ信号のすべてのチャンネルを別のグループに、そして書き込み許可信号をさらに別のグループに割り当てることあげられます。このフォーマットを使用すると、ストレス・テストの場合と同様に、すべてのアドレス・ラインの電圧を一度に下げることができます。

#### シーケンス機能

シーケンス機能は、デジタル・パターン生成の基本となる機能です。ジャンプやループなどのコンピュータと同様の命令を使用して、別々に定義されている多くのパターン・データ・ブロックを自在に組み合わせることができます。ブロックとは、長さを指定して (512 サイクルなど) 繰り返し使用することのできるセグメントのことです。これにより、デジタル・デバイスの完全な動作テストに必要な膨大な量のデジタル・パターンを作成できます。

#### 統合エディタ

デジタル・パターンの編集には、編集ツールが必要です。高性能デジタル信号発生器の一部には、編集機能 (エディタ) が組み込まれていて、外部のコンピュータとエディタを必要としないものもあります。このエディタでは、画面上で波形

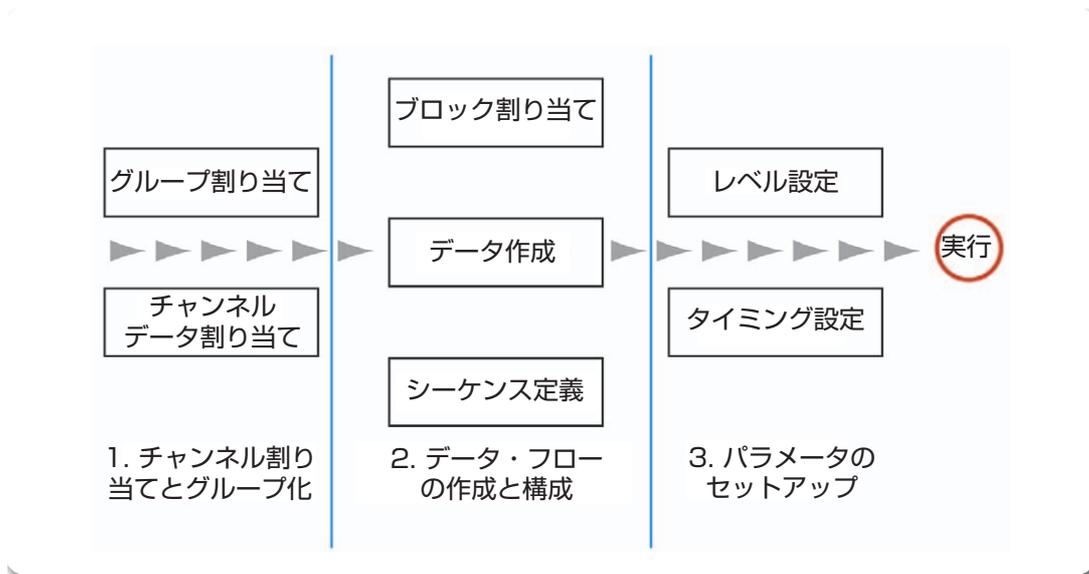


▶ 図 49. DTG ユーザ・インタフェース Timing メニュー

を確認しながら、クロックとデータ・ストリームの両方をセットアップすることができます。一方、スプレッドシート形式のテーブル・エディタでは、カット・アンド・ペースト機能でパターンを編集できます。

#### データのインポート機能

現在のデジタル・パターン・ソースは、EDA システムや他の計測器からデジタル・パターンをインポートできます。これは、特にプロトタイプ検証用のパターンを開発する必要性をなくし、大幅に時間を節約できるため、設計検証の有益な補助手段となります。



▶ 図 50. ロジック信号発生器で、デジタル・パターンを作成する際のステップ。

### ロジック信号発生器を使用した波形生成

デジタル・パターンとして使用する「波形」を生成するには、アナログ分野とは異なる手順が必要です。高性能のロジック信号発生器の場合、このプロセスは同様な信号のグループ定義、クロックおよびデータ・パターンの適用、およびロジック・レベルの設定からなります。

図 49 に、DTG5000 シリーズの電圧編集画面を示します。図 50 には、ロジック信号発生器によるデジタル・パターン信号の作成手順をフロー・チャート形式で示します。

デジタル・デバイスのニーズに合わせるために、ロジック信号発生器では、デバイスの入力ピンと適合するデータ・チャンネルをグループ化することができます。この方法により、計測器内部のメモリにストアされている情報を、選択された出力チャンネルに配信できます。ほとんどのデジタル DUT には、クロック、アドレス、およびデータ・ピンの 3 グループがあり、これらをロジック信号発生器のチャンネル・グループにマッピングできます。このアーキテクチャにより、ピン・グループ全体の電圧や遅延などの値を、1 つずつではなく、一度に変更できるようになります。

次のステップは、シーケンスを構成する「パターン・ブロック」の作成です。ブロックとは、長さを指定した（1024 ビットなどの）パターン・セグメントのことです。通常のアプローチは、テスト・シーケンスの進行に合わせて、各種の組合せができる一群のブロックを作成することです。

適切な数のブロックを定義したら、ブロックをデータで満たす必要があります。一部のロジック信号発生器には、「Walking Ones」、「Checkboard」、「Grey Code」など、標準的なフォーマットで定義されたパターンのライブラリが用意されています。これらの各種パターンを含むブロックを交互に入れ替えると、膨大な数のデジタル・パターンで DUT にストレスをかけることができます。内蔵のシーケンス・エディタがこの作業の役に立ちます。ブロックの順番、繰り返し回数、ジャンプや Go To ステートメントなどの条件分岐の命令をテーブルに埋めるだけで、簡単にシーケンスをプログラムできます。

デジタル・パターン作成の最後のステップは、DUT に適用するロジック電圧とタイミング条件の指定です。現在、世界には多くの異なるロジック・デバイス・ファミリがあり、それに伴いドライブ・レベルにも多くの異なる要件があります。幸い、最新のデジタル信号発生器には、これらのニーズに合わせたプリセットが用意されています。もちろん、ユーザが設定をプログラミングすることもできます。その他の変数として、終端インピーダンスと終端した電圧、データ・フォーマット（RZ、NRZ など）、クロック周波数、エッジ遅延などがあります。これらのデータについても、シンプルなテーブルで入力することができます。

## 信号発生器のすべて

### ▶ 入門書

## まとめ

多くのエンジニアは、トラブルシューティングや設計の検証を単なる「測定」作業にとらえ、オシロスコープやロジック・アナライザを用意さえすればいいと条件反射的に考える傾向にあります。しかし、これらのアキュイジション計測器だけでは不十分です。DUT を駆動するための機器、つまり信号発生器も必要です。

アキュイジション計測器と信号発生器を組み合わせることで初めて、DUT を複雑な実際の信号で駆動して出力結果を取り込むことのできる完全なソリューションになります。オシロスコープは、業界標準のアキュイジション計測器です。しかし、信号発生器がなければ、デバイスへの入力信号を制御することができないばかりか、デバイスからの出力信号も無意味なものになってしまいます。

また、信号発生器がなければ、マージン・テストと性能評価も行えません。オシロスコープやロジック・アナライザに信号発生器を組み合わせることで、信号に意図的なストレスを与えてその結果をオシロスコープで結果を測定することや、デジタル・エラー発生時のデータをロジック・アナライザで取り込んで設計の耐久性を探ることができます。

ディスク・ドライブ設計からテレコム機器のコンプライアンス・テストに至るまでの用途では、信号発生器とアキュイジション計測器が連動することで、完全な測定ソリューションとして機能します。

## 用語集

**A/D コンバータ (アナログ/デジタル変換器)** – 連続的なアナログ信号を、その大きさに比例した離散バイナリ (デジタル) 値に変換するデジタル電子部品。

**D/A コンバータ (デジタル/アナログ変換器)** – 離散したバイナリ値を電気信号に変換するデジタル電子部品。

**DC 確度** – 設定電圧と実際の出力電圧との差。

**DDS (Direct Digital Synthesizer) 技術** – 1 つのクロック周波数で計測器の動作範囲内の周波数を発生させて波形を合成する技術。クロックで制御して信号発生器のメモリから出力するサンプルのレートを決定します。

**DNRZ (Delayed Non-Return-to-Zero)** – 一般的なデジタル・パターンで、あるサイクル内で有効なビットが発生した場合、指定された遅延時間が経過した後に、波形は「1」に切り替わり、次のサイクル境界までその値を維持します。サイクルは 2 進の「0」で始まるものと仮定しています。

**GHz** – 周波数の単位で、1,000,000,000Hz に相当します。

**kHz** – 周波数の単位で、1,000Hz に相当します。

**MHz** – 周波数の単位で、1,000,000Hz のことです。

**MS/s** – サンプル・レートの単位で、1MS/s は、1 秒あたり 100 万サンプルを表します。

**NRZ (Non-Return-to-Zero)** – 一般的なデジタル・パターン・フォーマットで、そのサイクル内で有効なビットが発生すると、波形は「1」に切り替わり、次のサイクル境界までその値を維持します。サイクルは 2 進値の「0」で始まるものと仮定しています。

**R1 (Return-to-One)** – 一般的なデジタル・パターンのフォーマットで、サイクルが 2 進値の「1」で始まると仮定した場合、有効なビットが存在するときに波形は「0」に切り替わり、その後同一のサイクル内で「1」に戻ります。RZ の逆です。

**RZ (Return-to-Zero)** – 一般的なデジタル・パターンのフォーマットで、サイクルが 2 進値の「0」で始まると仮定した場合、有効なビットが存在するときに波形は「1」に切り替わり、その後同一のサイクル内で「0」に戻ります。

**アジリティ** – ある周波数から別の周波数に、瞬時にきちんと切り替わることが出来る能力。

**アナログ信号** – 電圧が連続して変化する信号。

**アベレーション** – 波形のオーバershootまたはアンダershoot。

**位相** – 1 サイクルの各ポイント、単位は度 (°) で表します。

**位相シフト** – 相似した 2 信号間のタイミング差または位相差。遅延とも呼ばれます。

**位相シフト・キーイング (PSK)** – デジタル変調の一種で、搬送波が 2 位相間で切り替わります。

**位相変調 (PM)** – アナログ変調の一種で、位相の変動によって、周波数が低い信号の情報を、周波数が高い搬送波信号に重畳します。通常、放送通信で使用されます。

**イベント入力** – 信号発生器のシーケンス機能との組合せで使用されます。イベント入力信号 (TTL ロジック信号) を受け取ると、信号発生器は指定された波形またはパターンにジャンプします (イベント動作はトリガ動作に似ていますが、信号発生器は、サンプリングを停止してトリガ信号を待つものに対して、サンプリングを動作させながらイベント信号を待ちます)。

**エイリアシング** – 信号が持つ最高周波数の 2 倍以上の周波数でサンプリングはなかった場合、信号の一部の周波数成分が折り返して歪みが生ずること。

## 信号発生器のすべて

### ▶ 入門書

**オフセット** – AC 値と DC 値の両方を含む信号の DC 成分。回路グランド信号の振幅の中心との間の電圧差。

**オフセット・レベル** – 波形のゼロまたはグランド・レベルからの垂直変位 (V)。

**カーソル** – アクイジション・システムにおいて画面上で波形に合わせて正確な測定を行うマーカ。信号発生器では、カーソルを使用して波形を変更する範囲を選択できます。

**擬似ランダム・ビット・ストリーム (PRBS)** – ランダムに繰り返される数字の列から構成される 1 組のシーケンス。乱数のように見えますが、実際は予測可能な数学的パターンにしたがいます。デジタル・システムでランダム・ノイズを作成するために使用されます。

**擬似ランダム・ワード・ストリーム (PRWS)** – 複数の擬似ランダム・ビット・ストリームから構成されるワード・ストリームで、信号発生器の平行出力から送出されます。シリアルライザやマルチプレクサのテストによく使用されます。

**極性** – ゼロまたはグランド・レベルを基準にして電流が流れる方向。通常、波形開始方向の正または負を指します。

**矩形波** – 方形波と同様のスイッチング特性を持つ波形で、ハイとローの時間長が等しくないものも含まれます。

**グラフィック・エディタ** – 信号発生器に組み込まれているツール。これを使用すると、グラフィック表示される波形を見ながら信号を編集できます。編集した結果のデータ・ポイントはコンパイルされ、波形メモリにストアされます。

**グリッチ** – 回路または波形内で間欠的に発生する高速の異常信号。

**クロック・ジェネレータ** – 矩形波だけを出力できる信号発生器。主にクロック信号源として使用されます。

**クロック・レート** – 「サンプル・レート」の項を参照。

**検証** – コンポーネント、デバイス、またはシステムが予測どおりに動作し、業界規格に準拠しているか判断する信号発生器の一般的な用途。

**減衰** – あるポイントから次のポイントへ信号を伝送する間に信号が弱くなること。

**減衰正弦波** – 回路がインパルスで発振し、時間とともに徐々に振幅が減少して静止する正弦波の一種。

**コンプリメンタリ出力** – 2 つの信号経路を使用して、形状と振幅が同じで、位相が  $180^\circ$  ずれている信号を出力します。

**差動出力** – 2 つの信号経路を使用して、振幅が同じで、位相が  $180^\circ$  ずれた同一の信号を伝送する出力。振幅は、グランドに対してではなく、お互いを基準として測定されます。

**三角波** – 電圧が対称的な立上り時間と立下り時間を示す波形。

**サンプル・レート** – アナログ/ミックスド信号発生器が波形ポイントを出力するレート。通常、メガ・サンプル/秒、またはギガ・サンプル/秒で表示されます。クロック・レートまたはサンプリング周波数とも呼ばれます。

**サンプリング** – 電圧値を表す波形データ列からデータ・ポイントを順番に取り出して D/A 変換するプロセス。アクイジション・システムにおいては、アナログ信号をデジタル化するプロセス。

**サンプル・ポイント** – 電圧値を表す波形データ列、またはデータ・ポイント。

**シーケンス・エディタ** – 信号発生器の統合ツールの一つで、波形メモリの指定セグメントを繰り返したり発生順番を決定したりするためのプログラミングを行えます。シーケンス機能には、コンピュータに類似した命令（ジャンプやループ）が含まれ、波形メモリにストアされたセグメントを繰り返したり順番を変更したりしてパターンを発生できます。

**シーケンス・リピート・カウンタ** – シーケンス・プロセスで使用される制御メカニズムで、波形セグメントの発生サイクル数を決定します。

**シーケンス機能** – 信号発生器の内蔵メモリ内に複数の波形セグメントをストアし、シーケンス・エディタで編集する命令にしたがってそれらを繰り返したり発生順番を決定したりできるプログラミング機能。これにより、信号発生器はほぼ無制限の長さの波形を作成することも可能です。

**時間分解能** – 「水平軸分解能」の項を参照。

**ジッタ** – サイクルや周波数が不安定になる異常の一種。

**シフト/ローテート** – アナログ/ミックスド信号発生器が備えている機能の一つ。波形の指定されたエッジを左右、またはプログラムされた中心値に近づく方向あるいは離れる方向にシフトすることで、ジッタ作成や計測器の分解能を超える微少なエッジ移動が行えます。

**シミュレーション** – 波形を出力するために信号発生器で使用されている手法で、別のデバイスのテストに使用するデバイスの出力を模倣します。

**周期** – 波形が 1 サイクル終わるのに要する時間。周期は周波数の逆数。

**周波数** – 信号が 1 秒間に繰り返す回数で、Hz（1 秒あたりのサイクル数）で表します。周波数 = 周期の逆数です。

**周波数帯域** – 周波数範囲。通常は -3dB で制限されます。

**周波数偏移変調 (FSK)** – デジタル変調の一種で、搬送波が 2 つの周波数（中心周波数とオフセット周波数）間で切り替わります。

**周波数変調 (FM)** – アナログ変調の一種で、信号の振幅変動を搬送波の周波数変動にして情報を搬送波に重畳する方法です。通常、音声や映像の放送に使用されます。

**出力信号** – メモリにロードされた波形やパターン、実行コマンドを含むシーケンス・ファイルによって発生される信号。前面パネルのコネクタから出力されます。

**シングルエンド出力** – 1 つの信号経路でグランドを基準にした信号を伝送する出力。

**信号発生器** – 信号を生成して試験回路に送りこむテスト装置。試験回路の出力はオシロスコープやロジック・アナライザで読み込みます。信号ジェネレータとも呼ばれます。

**信号忠実度** – 信号の正確な再現性のことで、信号ジェネレータまたはアキュジション計測器のシステムと性能によって決まります。

## 信号発生器のすべて

### ▶ 入門書

**振幅** – 数量の大きさ、または信号の強さ。通常エレクトロニクス分野では、振幅は電圧や電力を意味します。

**振幅シフト・キーイング (ASK)** – デジタル変調の一種で、デジタル変調信号により、出力周波数が 2 つの振幅間で切り替わります。

**振幅分解能** – 「垂直軸分解能」の項を参照。

**振幅変調 (AM)** – アナログ変調の一種で、振幅を変動することによって、低い周波数の信号の情報を高い周波数の搬送波信号に重畳します。通常、放送通信で使用されます。

**シンボル間干渉** – 前のサイクルの信号ステートの影響によって、次のサイクルの信号に歪みや変化が生じること。

**垂直システム** – 信号発生器内で出力信号の振幅やオフセット・レベルを定義します。

**垂直軸分解能** – 信号発生器でプログラミングできる電圧変化の最小ステップ。計測器の D/A コンバータの 2 進ワード幅（ビット数）で、再現される波形の振幅精度と歪みを定義します。

**水平軸分解能** – 波形の生成に使用できる最小の時間間隔。エッジ、サイクル時間、パルス幅をその分量だけ変更できる時間の最小間隔です。

**水平システム** – 信号発生器内の水平軸を制御するシステム。サンプル・レートを制御することにより、出力信号の周波数を定義します。

**数式エディタ** – 変数や演算子を入力できる ArbExpress 内の統合演算ツール。

**スクリーン** – 波形やパターンが表示されるディスプレイ画面、表示領域。

**ステップ波** – 電圧が突然変化する波形。

**スプリアス・フリー・ダイナミック・レンジ (SFDR)** – 信号発生器で出力できる最大信号レベルと、その信号にともなう最大のスプリアスまたはノイズとの比率。

**スロープ** – グラフや画面上に表示される線で、垂直軸の距離と水平軸の距離の比率で表します。正のスロープは左から右へ上り、負のスロープは左から右へ下がります。

**正弦波** – 数学的に定義された一般的なサイン曲線波形。

**掃引ジェネレータ** – 指定された時間周期にわたって、正弦波などの信号の周波数を変化させることのできるファンクション・ジェネレータ。

**掃引正弦波** – 正弦波の一種で、一定時間かけて周波数が増加または減少します。

**タイミング・エディタ** – ロジック信号発生器の統合ツールで、画面に波形をグラフィック表示しながらクロックとデータ・ストリームの両方を編集できます。

**代用** – 波形を作成するために信号発生器で使用されている手法で、定義済みの信号を作成、変更し、使用できない回路から出力される信号の代わりに使用します。

**立上り時間** – パルス・エッジがその現在のレベルと反対のステートにトランジションするのに要する時間。立上り時間の場合はロー・レベルからハイ・レベル、立下がり時間の場合はハイ・レベルからロー・レベルへのトランジションに要する時間です。

**立下り時間** – パルス・エッジがその現在のレベルとは反対のステートにトランジションするのに要する時間。立上り時間の場合はロー・レベルからハイ・レベル、立下がり時間の場合はハイ・レベルからロー・レベルへのトランジションに要する時間です。

**遅延** – 相似した 2 つの信号間のタイミングのずれ。位相シフトとも呼ばれます。

**直交 (IQ) 変調技術** – 変調の一種で、同相 (I) 波形と直交 (Q) 波形の 2 つの搬送波が、1 つのチャンネルを通じて結合、送信され、受信側で分離・復調されます。現在の無線通信ネットワークで使用されます。

**データ・パターン・ジェネレータ** – 信号発生器の一種で、単一または複数のデジタル・パターン・ストリームを生成します。パターン・ジェネレータ、あるいはデータ・ジェネレータとも呼ばれます。

**データ・レート** – デジタル信号発生器やトランスミッタがバイナリの 1 または 0 を送出するレートで、通常メガビット/秒またはギガビット/秒で表されます。

**テーブル・エディタ** – ロジック信号発生器の統合ツールで、使いなれたスプレッドシート形式で、一般的なカット・アンド・ペーストなどを用いてパターンを編集します。

**デジタル・パターン** – 同期化した複数のパルス列。8、12、16、またはそれ以上のビット幅を持つデータの「ワード」で構成されます。

**デジタル信号** – 離散した 2 進数で表現される電圧サンプルの信号。

**デジタル波形ジェネレータ** – デジタル・パターンを出力する信号発生器の一種で、ロジック信号発生器とも呼ばれます。

**デューティ・サイクル** – ハイとローの時間間隔の長さが等しくないパルスの正の時間と 1 サイクルの時間の比率。

**電圧** – 2 点間の電位差で、V で表します。

**統合エディタ** – 信号発生器に組み込まれている複数の編集ツール。これを使用すると、波形の時間と振幅の両方を簡単に編集・変更できます。

**トランスデューサ** – 音声、圧力、歪み、輝度などの特定の物理量を電気信号に変換するデバイス。

**トリガ** – 信号発生器に指定信号の出力開始を知らせる外部信号または前面パネルのボタン。

**トリガ・システム** – 計測器が信号を出力し始める条件を信号発生器内で定義します。計測器が連続モードで動作していないことを前提にしています。

**トリガ・レベル** – 計測器の動作を開始するために、外部トリガ入力信号で必要とされる最小入力値 (+V または -V)。

**ナイキスト・サンプリング定理** – 信号を正確に再現するためのサンプリング周波数またはクロック・レートは、サンプリングされる信号の最高周波数成分の少なくとも 2 倍でなければならないと規定している定理。

**ナノ秒 (ns)** – 時間の単位で、0.000000001 秒に相当します。

**波** – 時間の経過と共に繰り返されるパターン。一般的な波には、正弦波、方形波、矩形波、のこぎり波、三角波、ステップ波、パルス波、周期波、非周期波、同期波、非同期波などがあります。

**任意** – 信号ジェネレータにあらかじめ用意されている標準波形ではなく、個別の希望やニーズに合わせて定義される波形。

**任意波形/ファンクション・ジェネレータ (AFG)** – アナログ/ミックスド信号発生器の一種で、安定した標準的な形状の波形を生成します。

**任意波形ジェネレータ (AWG)** – アナログ/ミックスド信号発生器の一種で、メモリ上で作成された任意のアナログ信号を出力できます。ストアされたデジタル・データ (AC 信号の絶えず変化する電圧レベルを記述したもの) に基づいて波形を発生する高機能の信号再生システムです。

**ノイズ** – 電気回路が自身で生成する、不要な電圧または電流。

**のこぎり波** – 電圧が各サイクルでゆっくりと均等にピークまで上り、その後で即座に落ち込む波形。のこぎりの歯に似ていることから「のこぎり波」と呼ばれています。

**波形** – 波の動きと時間変化をグラフィックで表示したものです。

**波形ポイント** – 信号のある時点における電圧を表すデジタル値、サンプル・ポイントとも呼ばれ、メモリにストアされます。

## 信号発生器のすべて

### ▶ 入門書

**パターン** – 「デジタル・パターン」の項を参照。

**パターン・エディタ** – 信号発生器の統合編集ツール。パターンの時間と振幅の両方を編集、変更することができます。

**パターン・ジェネレータ** – ロジック信号発生器の一種で、多数のチャンネルのデジタル・パターンを生成します。データ・ジェネレータとも呼ばれます。

**パターン長** – 信号レコード作成に使用される波形ポイント数で、パターンを生成するために、ロジック信号発生器でストアできる最大データ量（時間と等価）を決定します。

**パラレル・デジタル出力** – デジタル出力の一種で、信号発生器のメイン・アナログ出力と同じメモリからデジタル・データを出力します。メモリには、アナログ出力上に存在する波形サンプル値と等しいデジタル値をストアできます。

**パルス** – 一般的な波形で、急峻な立上りエッジと幅、そして急峻な立下りエッジを持ちます。

**パルス・タイミング・ジェネレータ** – パルス・ジェネレータに類似しており、遅延やチャンネル間のスキューなどのパルス・タイミング制御が追加されています。出力信号電圧および立上り時間のパラメータ制御も用意されています。

**パルス・パターン・ジェネレータ** – ロジック信号発生器の一種で、少数の出力チャンネルから方形波またはパルスの列を、通常は非常に高周波で生成できます。パルス・ジェネレータとも呼ばれます。

**パルス幅** – パルスが低い電圧から高い電圧まで移った後、再び低い電圧に戻るまでの時間の長さで、通常は最高電圧の50%で測定されます。

**パルス幅変調 (PWM)** – デジタル変調の一種で、変調信号により、パルスのパルス幅を変化させる変調方式。パルス波形にのみ適用可能。通常はデジタル・オーディオ・システムで使用されます。

**パルス列** – 伝送されるパルスの集まり。

**ピーク ( $V_p$ )** – ゼロ基準点からの最大電圧レベル。

**ピーク・ツー・ピーク ( $V_{p-p}$ )** – 信号の最大ポイントから最小ポイントまでの電圧差。

**被測定デバイス (DUT)** – 測定対象のデバイス。被測定ユニット (UUT) と同義。

**被測定ユニット (UUT)** – 測定対象のユニット。被測定デバイス (DUT) と同義。

**評価** – コンポーネントやデバイス、システムの動作や性能限度を決定すること。これは、信号発生器の一般的な用途であり、ストレス・テストやマージン・テストもその一環として行われます。

**ファンクション・ジェネレータ (FG)** – 信号発生器の一種で、正弦波や矩形波などの基本的な関数波形を出力します。

**フィルタリング** – AWG のフィルタの多くは、信号発生器が信号から選択された周波数帯域を除去するプロセス。DUT 出力内の不要なエイリアシング歪みを防止するために使用します。

**複製** – 信号発生器で発生する波形を生成する手法の一つ。オシロスコープで取りこんだ既存の信号を信号発生器に転送し出力します。

**フラットネス** – 正弦波を出力したときに、出力周波数によってレベルが変化する度合い。

**ブロック** – 1024 ポイントのような選択した長さのデータ長あるいはパターン長。アナログ信号発生器やロジック信号発生器のシーケンス出力を構成します。

**変調** – 信号情報を、搬送波信号に重畳するプロセス。

**変調信号** – 振幅、位相、周波数の変動によって、情報が重畳された高い周波数の搬送波信号。

**方形波** – 一般的な関数波形の一種で、パルスの繰り返しで構成されます。等間隔で 2 つの固定された電圧レベル間をスイッチングします。

**ボルト (V)** – 電位差の単位。

**マーカ** – メイン出力と別にある信号発生器の補助出力。DUT のトリガ信号やシリアル・デジタル・パターン出力として使用できます。

**マーカ出力** – メイン・アナログ出力信号に同期したバイナリ信号を供給するデジタル出力の一種で、一般的には波形メモリと別のメモリからサンプル出力されます。

**マージン・テスト** – コンポーネントやデバイス、システムに、ジッタやタイミング違反などのストレスをかけて動作限度を決定する一般的な信号発生器の用途。ストレス・テストとも呼ばれます。

**マイクロ秒 ( $\mu\text{s}$ )** – 時間の単位で、0.000001 秒に相当します。

**ミックスド信号発生器** – 任意波形ジェネレータ、任意波形／ファンクション・ジェネレータなどの信号発生器の一種で、アナログ波形とデジタル・パターンの両方を出力します。

**ミリ秒 (ms)** – 時間の単位で、0.001 秒に相当します。

**メモリ容量** – 信号レコードを作成するために使用される波形ワード数で、アナログ／ミックスド信号発生器でストアできる最大の波形データ量（時間と等価）を決定します。

**歪み** – 実際の回路で分散キャパシタンスやクロストークなどによって生じます。

**ランプ** – 一定の割合で変化する電圧レベルのトランジション。

**レコード長** – 信号のレコードを作成するのに使用される波形ポイント数。アナログ／ミックスド信号発生器では波形メモリ容量を、ロジック信号発生器ではパターン・メモリ容量を指します。

**連続モード** – 信号発生器の動作モード。出力は、波形やシーケンスの先頭から即座に開始し、電源がオフになるか動作を意図的に停止するまで繰り返し出力されます。

**ロジック・アナライザ** – 多数のデジタル信号のロジック・ステートを、時間軸に対する変化で表示する計測器。デジタル・データを解析し、ソフトウェア実時間実行やデータ・フロー値、ステート・シーケンス値などのデータを表示できます。

**ロジック信号発生器** – デジタル・パターンを出力する信号発生器の一種で、パルス・ジェネレータ、パターン・ジェネレータなどがあります。

**当社が発行しているその他の入門書は次の通りです。**

- 任意波形ジェネレータを使用した無線信号の生成
- 設計エンジニアのためのトランスミッタ/レシーバ測定ガイド
- 価値が高まる任意波形ジェネレータ
- 信号生成手法について
- リアルタイム・スペクトラム・アナライザ入門
- DVB-T および DVB-H における RF 測定
- SDRAM メモリ入門
- タイミング解析入門
- シグナル・インテグリティ入門
- デジタル回路設計のためのシグナル・インテグリティ検証ガイド
- 設計者の手引き：設計検証をより簡単に
- デジタル・シリアル解析：システム検証の概要
- PCI Express へのソリューション
- 入門書：シリアル・データ・コンプライアンスと検証測定
- 高速差動データ・シグナリングと測定
- 入門書：高速インターコネクト、特性評価、測定に基づいたモデリング
- SD&HD デジタル・ビデオ計測入門

**www.tektronix.co.jp**

- オシロスコープ
- ロジック・アナライザ
- 信号発生器
- 通信測定機器
- ビデオ測定機器
- プローブ
- アクセサリ
- 校正、その他のサービス・プログラム
- 他の計測機器

**Tektronix お問い合わせ先：**

- アメリカ 1 (800) 426-2200
  - イタリア +39 (02) 25086 1
  - インド (91) 80-22275577
  - イギリス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
  - スイス +41 52 675 3777
  - スウェーデン 020 08 80371
  - スペイン (+34) 901 988 054
  - 大韓民国 82 (2) 528-5299
  - 台湾 886 (2) 2722-9622
  - 中央ヨーロッパおよびギリシャ +41 52 675 3777
  - 中華人民共和国 86 (10) 6235 1230
  - 中東アジア/北アフリカ +41 52 675 3777
  - 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
  - デンマーク +45 80 88 1401
  - ドイツ +49 (221) 94 77 400
  - 東南アジア諸国/オーストラリア (65) 6356 3900
  - 南部諸国および ISE 諸国 +41 52 675 3777
  - 日本 81 (3) 6714-3010
  - ノルウェー 800 16098
  - バルカン半島/イスラエル/アフリカフィンランド +41 52 675 3777
  - ブラジルおよび南米 (11) 4066-9400
  - フランス +33 (0) 1 69 86 81 81
  - ベルギー 07 81 60166
  - ポーランド +41 52 675 3777
  - ポルトガル 80 08 12370
  - 香港 (852) 2585-6688
  - 南アフリカ +27 11 254 8360
  - メキシコ、中米およびカリブ海諸国 52 (55) 5424700
  - ルクセンブルグ +44 (0) 1344 392400
  - ロシアおよび CIS 諸国 +7 (495) 7484900
  - その他の地域からのお問い合わせ 1 (503) 627-7111
- Updated 15 September 2006

**詳細情報**

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、アプリケーション・ノート、テクニカル・ブリーフなどをご用意しています。当社ホームページ ([www.tektronix.co.jp](http://www.tektronix.co.jp)) または [www.tektronix.com](http://www.tektronix.com) をご参照ください。



Copyright © 2007, Tektronix. All rights reserved. Tektronix 製品は、米国およびその他の国の特許（出願を含む）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 および TEK は Tektronix, Inc. の登録商標です。参照されているその他のすべての商品名は、該当する各会社が保有するサービス・マーク、商標、または登録商標です。

2/07 HB/PGI

76Z-16672-4

**Tektronix**  
Enabling Innovation

**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](http://www.tektronix.co.jp)  
お客様コールセンター [ccc.jp@tektronix.com](mailto:ccc.jp@tektronix.com)