

シリアル・デジタル信号の物理レイヤ・テスト方法



HDTV方式への移行をスムーズに進めるには、システム設備導入の初期段階での基本的な技術的検証が重要です。適正に機器を設置するには、HD-SDI信号の高速データ転送に適したケーブルを選択することが不可欠です。ケーブルの変形（クリンピング）不良やねじれ、屈曲などのストレスがないように注意して敷設すれば、HD-SDI信号をポイントAからポイントBへ適切に伝送することが可能になります。ケーブル敷設中に簡易テストや測定を行い、接続部の性能および機器の動作が仕様どおりであることを確認することも重要です。アイ・パターン表示およびジッタ測定機能を装備した波形モニタは、HDおよびSD-SDI信号に生じる物理レイヤの問題を解決するのに最適なツールです。

ケーブル

それぞれのケーブルにはそれぞれの物理的な特性があり、デジタル信号はその特性に従ってある一定の長さのケーブルで伝送されます。ケーブルの製造メーカーは、HDおよびSD-SDI信号をケーブル伝送するための推奨最大距離の仕様を公開しています。

表1に、標準的なケーブルのSD（270Mbps）およびHD（1.5Gbps）双方のデータ転送速度に対するケーブルの推奨伝送距離を示します。

シリアル・デジタル信号の物理レイヤ・テスト方法

▶ アプリケーション・ノート

ケーブル・タイプ	HD-SDI推奨ケーブル長 (m)	SD-SDI推奨ケーブル長 (m)
Belden 8281	79	305
Belden 1694A	113	415
Belden 1855A	64	229
Belden 1505A	91	338
Image 1000	117	404
Canare L-5CFB	100	368

▶ 表1：標準的なケーブルと推奨ケーブル長

使用するケーブル・タイプを以下の説明にしたがって決定し、ケーブルを適切に敷設します。

- ▶ ケーブルの使用温度範囲がケーブルの敷設環境に適合していること。
- ▶ 使用されるBNCコネクタ・タイプがケーブルの物理サイズに適合していること。
- ▶ ケーブルの許容曲げ半径および最大許容張力は、ケーブルの太さにより異なるため、ケーブルを曲げたり引っ張ったりするときに注意すること。
- ▶ ケーブルを束ねるときには、ケーブルの質量やケーブルを束ねる強さにも注意し、ケーブルを束を重ねたり、強く束ねすぎたりして、ケーブルにストレスを加えないように注意すること。
- ▶ ケーブル線路に沿って固定する際に使用する機械的な固定具は、ケーブルに適したものを使用すること。

ケーブルを適切に敷設するには、ケーブルの取扱いに細心の注意を払わなければなりません。HD-SDI信号では、SD-SDI信号に比較してより多くの注意が必要です。ケーブルへのストレスは物理的に判断できませんが、ケーブル敷設の方法に問題があると、システムの信号品質マージンに必ず影響を及ぼしてしまいます。作業者がケーブルの上で作業したり、ケーブル上をカートが往来するとケーブルの形状がゆがんでしまい、見た目には損傷がなくてもケーブルの伝送特性に問題を引き起こします。ケーブルがドラムに巻かれていないときは、ケーブルがもつれないようにすることが大切です。ケーブルにもつれがあると、信号伝送時に反射を起こしてしまいます。ケーブル敷設中、さまざまなダクトや線路を通ってくるケーブルを、引っ張り出さなければなりません。ケーブルを引っ張るときは、ゆっくりと着実な方法で行わなければなりません。ケーブルを一気に引っ張ったり、最大許容張力を超えた力で引っ張ると、ケーブルが伸びてゆがみます。ケーブルの損傷を目視で確認できなくても、ケーブルの物理特性が変化し、結果的にケーブルの性能を劣化させてしまいます。また、摩擦を減らすために使用する潤滑油は、ケーブルの外被材料に適合するものを使用します。

時々ケーブル経路の変更を迫られ、特定の物体に沿ってケーブルを曲げなければならないときがあります。各ケーブルは、タイプ別にケーブル直径の約10倍程度の（許容曲げ半径）までであれば曲げても大丈夫です。この許容曲げ半径より小さい半径でケーブルを曲げてしまうと、ケーブルに再度圧力がかかり、ストレスによりケーブル特性を物理的に変えてしまいます。ケーブルを90°曲げると、信号の物理的経路を約9m追加することと同じこととなります。

何本かのケーブルをラックの中で1つに束ね、ケーブル・サポート・トレイに収納します。ケーブルの1つの束はとても重く、ケーブル同士で圧力をかけ合うので、ケーブルがゆがんでしまう場合があります。ケーブルをゆがめてしまう可能性があるため、設置する際に20cm以上のたるみがあってはなりません。システム・インテグレータは、通常ケーブルを束ねるときにJ字型フックまたはケーブル・タイを使用します。

通常、束ねたケーブルが少し動く程度にケーブル・タイが締まっているのが良い状態です。ケーブル・タイやJ字型フックを取りつける間隔も重要です。きちんと整理するために、ほとんどの場合はケーブル・タイやJ字型フックを同じ間隔で付けます。このような付け方では、システム内で特定の波長でリターン・ロス劣化が累積して波形の変形を発生させる恐れがあります¹。

したがって、ケーブル・タイは不等間隔に置き、ケーブル・タイの締め付け程度はバンドル内でケーブルが動くぐらいが適当です。

ケーブルを機器に接続するとき、ケーブルの束や機器の特定の入力までのケーブルに屈曲があると、ケーブルやコネクタにストレスを与えてしまいます。そのままにしておくと、コンダクタ（導線）とコネクタ間で接触不良を起こすため、ケーブルを機器に接続するときには注意してください。システム・インテグレータは、曲げ半径や別のケーブル質量がケーブルやコネクタにストレスを与えていないか確認する必要があります。ケーブルのゆがみを抑え、元の物理形状を保つ対策をしっかりと施すと、ケーブル特性どおりの性能を発揮させることができます。

1 参考文献：Belden社のStephen H. Lampen、Martin J. Van Der BurgtおよびCarl W. Dole氏らの執筆による「High-Definition Cabling and Return Loss」を参照

ストレス・テスト

徐々に劣化する傾向があるアナログ・システムとは異なり、デジタル・システムでは問題が発生するまではエラーなしで動作する傾向があります。今まで、SDI信号の許容限界（ヘッドルーム）を測定するインサーブ・テストは存在せず、システム動作を評価するためには、アウトオブサービス・テストで行わなければなりませんでした。ストレス・テストとは、障害が発生するまで、デジタル信号の1つ以上のパラメータに変化を加えることです。デジタル・システムの許容限界は、障害を引き起こすために必要な変化の総量を測定することで求められます。

システムにストレスを与える最も直接的な方法は、エラーが発生するまでケーブルを延長して試みることです。この方法は、関連のシリアル・デジタル・ビデオ規格（SMPTE 259MまたはSMPTE 292M）の仕様からみても適当です。ビデオはデジタル・データ・ストリームとしてエンコードされますが、SDI信号は本質的にはアナログ信号で、振幅減衰や位相シフトのようなアナログ歪みの影響を受けます。

この歪みを補正するには、アダプティブ・ケーブル・イコライザが受信装置の一部として組み込まれていなければなりません。このような受信装置は、振幅減衰と周波数特性の性能低下によって発生した信号損失および位相シフトを補正します。システムまでのケーブル長を追加して延長することにより、受信装置の特性、特に自動イコライザ・レンジおよび耐雑音性能を評価できます。

実験結果から、実際の動作状態を代表しているケーブル長テストが最も有効なストレス・テストと言えます。以下の章で説明するSDIチェック・フィールド信号と併用して使用する場合、特にその傾向がはっきりします。

振幅や立上り時間を変化させたり、ノイズやジッタを信号に付加することでも、テストを行えます。受信装置の性能をストレス・テストするために、振幅変化やジッタを加える方法は、機器の評価や受入テストには有効ですが、システムの動作検証テストにはあまり効果的ではありません。

（送信端で信号振幅を測定すること、およびシステム内のさまざまなポイントでジッタを測定することは、ストレス・テストとしてではなく動作テストの検証に重要です。）適正な範囲内であればノイズを付加したり、または立上り時間を変化させてもデジタル・システムに大きな影響を与えることはなく、ストレス・テストとしてはあまり重要ではありません。

ケーブル延長によるストレス・テスト

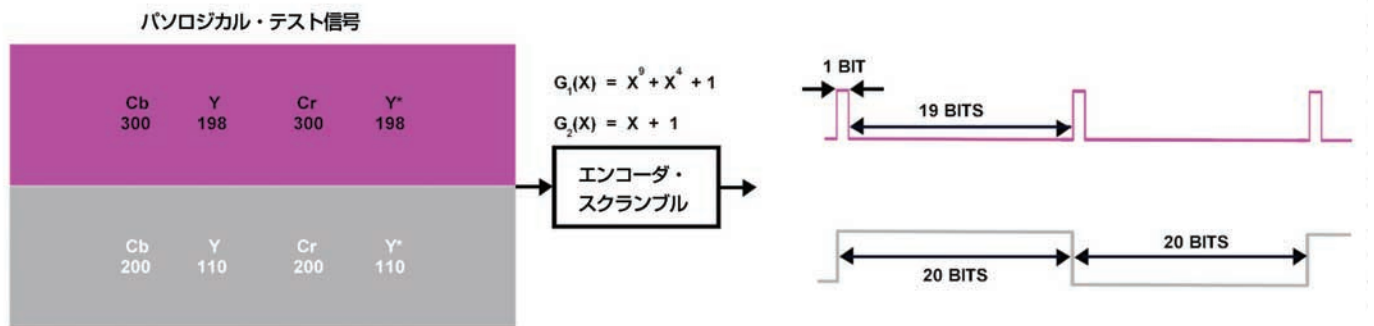
システムの許容限界を規定するための経験的手法は、システムの各リンクまでのケーブルを延長して、システム動作を確認することです。ケーブル延長によるストレス・テストは、実際と同軸ケーブルまたはケーブル・シミュレータを使用して行います。当社のSD-SDIシステム用のTSG601型には、50mのケーブル・シミュレータが装備されています。TG2000型をプラットフォームとするHD-SDIアプリケーション用のHDST1型モジュールには、振幅、ジッタおよびデューティ・サイクルなどさまざまなHD-SDIストレス・テスト用パラメータ変更機能と20mおよび100mのケーブル・シミュレータが用意されています。

適正な許容限界を検証するために、システムに追加するケーブル長は幾分任意に決定されています。SD-SDIシステムに関しては、日本のARIB標準規格団体は、内部テストの結果、ストレス・ケーブル長を40mとしています（ARIB技術資料TR-B16）。前述のTSG601型では、50mのケーブル・シミュレータがSDアプリケーションで使用されます。HDシステムでは、上記ARIBは、ストレス・ケーブル長を20mとしています。したがって、妥当な経験的手法としてシステムの許容限界を検証するには、HDシステムでは各リンクにおいてケーブル長を20m延長し、またSD（標準解像度）システムではケーブル長を40~50m延長すればよいと覚えておくことと便利です。

測定すべき重要なパラメータは、エラーの開始ポイントを確認することです。このポイントは、クラッシュ・ポイント（Crash Point）と呼ばれています。同じ場所でエラー測定を行った場合、エラー曲線の屈曲の鋭さが測定の質を表します。そして、アイ・パターン表示やジッタ表示機能を備えた計測器を使用することにより、物理レイヤ測定の品質を高めることができます。

シリアル・デジタル信号の物理レイヤ・テスト方法

▶ アプリケーション・ノート



▶ 図1：SDIチェック・フィールド（パノロジカル）テスト信号

SDIチェック・フィールド

SDIチェック・フィールド（別名「パノロジカル・テスト信号」として知られています）は、フルフィールド・テスト信号なのでアウト・オブ・サービスのテストで使用します。これはシリアル・デジタル・システムに使用する少々処理しづらい信号ですが、非常に重要なテストに使用されています。SDIチェック・フィールドは2つの部分に分かれており、スクランプリング後、低周波エネルギーが最高のデータ・パターンをその2つの部分に作り出すように規定されています。低周波エネルギーのインターバルは、統計的に1フレームに約1回の割合で発生します。

SDIチェック・フィールドの1つの成分は、イコライザの動作テストに使用され、1個の「1」の後に19個の「0」（または1個の「0」の後に19個の「1」）が連続するスクランブルされたNRZI（Non-Return to Zero Inverted）シーケンスを発生します。これはスクランブラが特定の初期状態になると1フィールドに約1回シングル・ラインの至るところで発生し、これが発生するとライン全体に残留してEAVパケットで終了します。

このシーケンスは高いDC成分を生成し、信号を処理する機器および伝送システムのアナログ能力にストレスを与えます。テスト信号のこの部分は、図1で示すようにルミネンス信号の設定値が198h、クロミナンス信号の設定値は両方とも300hになっており、ピクチャ表示の上側にマゼンタ色で表示されます。

SDIチェック・フィールドの別の部分は、一時的なラインでPLL（フェーズ・ロック・ループ）性能を検査するために設計されたもので、「1」が20個連続した後に「0」が20個連続するスクランブルされたNRZIで構成された特別な信号です。このためクロック再生に必要なゼロ・クロスの数が最小になります。テスト信号のこの部分は、ルミネンス信号の設定値が110h、クロミナンス信号の設定値は両方とも200hになっており、ピクチャ表示の下側にグレーで表示されます。

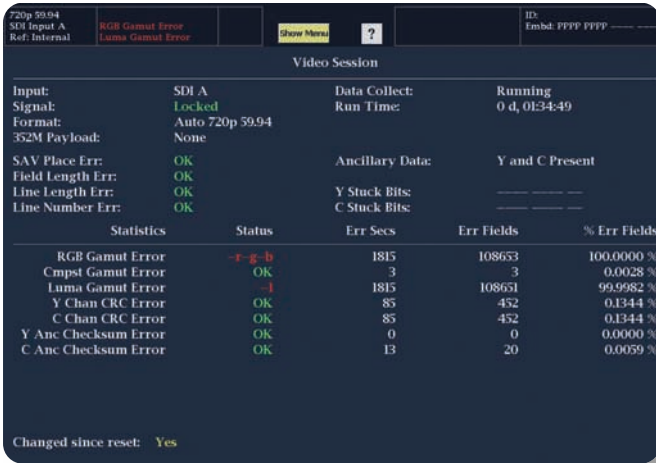
一部のテスト信号発生器は、マゼンタ色ではなく緑色のピクチャ表示を使い、別のデジタル値を使用しています。受信装置は、エラーを発生することなくSDIチェック・フィールド・テスト信号を処理する必要があります。SDIチェック・フィールドはコンポーネント・デジタルに完全に適合した信号ですが、コンポジット信号仕様には適合していません。SDIチェック・フィールドは、SDに関してSMPTE推奨規格のRP178、HDはRP198で規定されています。

CRCエラー・テスト

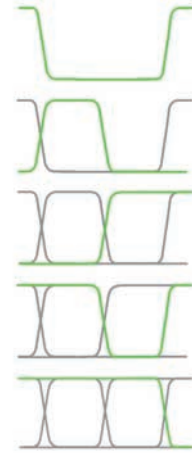
CRC（Cyclic Redundancy Check；巡回冗長検査）を使用すると、データが到着しない場合にもオペレータにエラー情報を通知したり、外部アラームを駆動して警告音を鳴らすことができます。HDフォーマットでは独自のCRCペアがクロミナンス信号およびルミネンス信号成分に別々の値でビデオ・ライン毎に存在し、SDフォーマットではオプション扱いですがフィールド毎に挿入できます。送信側でCRCが計算されて、信号データに挿入されたものが、受信側では新たに計算したCRCと比較照合されます。

SDフォーマットでは、CRC値は垂直インターバル期間のスイッチ・ポイント直前に挿入されます。SMPTE RP165は、SDビデオ・フォーマットのデータ・エラーの検出や処理に適用するオプションな使用方法を規定しています。

16ビットのCRCワードは1フィールドに1回生成されて、フルフィールドおよびアクティブ・ピクチャ・データとして別々にチェックされます。フルフィールド・チェックでは、垂直インターバル・スイッチング（525に9-11ラインまたは625に5-7ラインのライン規格）のためにリザーブされているラインを除き、送信されたデータすべてをカバーします。アクティブ・ピクチャ・データは、SAVとEAVを含まないアクティブビデオ・データ・ワード期間だけカバーします。アクティブ・ビデオのハーフラインはアクティブ・ピクチャ・チェックに含みません。デジタル・モニタはCRC値とCRCエラーのアラームの両方を表示できます。



▶ 図2：HD SDI信号のCRCエラーを表しているステータス表示例



▶ 図4：アイ・ダイアグラムの展開



▶ 図3：WFM7100型波形モニタのアイ・パターン表示例

受信装置がデータを適正に復元できなくなった場合、ピクチャ・モニタ上には画素情報がドロップアウトして白黒ノイズ (Sparkle Effect) が現れるので容易に劣化に気づきます。信号がさらに劣化して行くと、画像がフリーズしたりまたは黒になりますが、その前に全部または一部分のラインが画像表示からドロップアウトするようになります。この時点で信号伝送はデジタル・クリフを迎えたことになります。このような状況を予防するには、物理レイヤをモニタして良好な状態を維持する必要があります。

アイ・パターンおよびジッタのモニタリング

WFM7100型 (図3)・WFM6100型波形モニタは当社の最新式の計測器で、SDI信号の物理レイヤを監視できます。WFM7100型ではHDおよびSDデジタル信号をモニタでき、WFM6100型ではSDデジタル信号をモニタできます。どちらの機種もオプションでアイ・パターン測定機能を追加できるため、ユーザはSDI信号のアイ・ダイアグラムを見ることが可能です。エンジニアはアイ・ダイアグラムを使用してシリアル・データ信号を解析し、問題を突き止めることができます。アイ・パターン表示の特性を理解すると、SDI信号経路内の問題解決に役立ちます。

アイ・パターンは、データを転送するアナログ信号をオシロスコープ表示したものです。信号の「high」と「low」は、エラーのないクロックやリアルタイム・データを生成する受信装置によって問題なく検出できます。

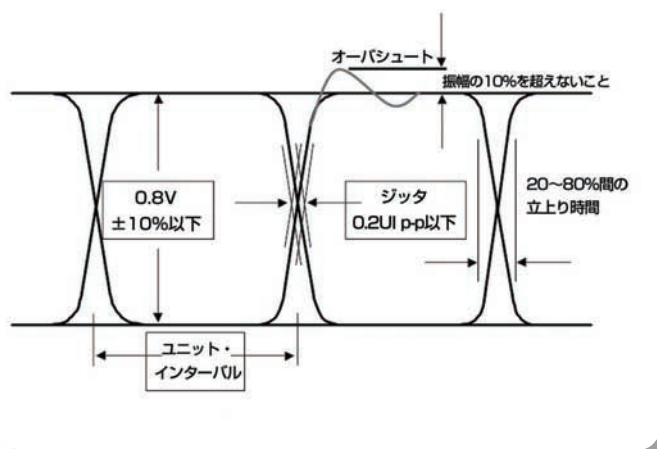
アイ・ダイアグラムを作成するために、計測機器は基準クロック信号を使って等価時間サンプリング・セグメントを構成します。この基準クロックは、波形モニタ内のデータ信号から再生されます。計測器はこのデータ・ストリームを等価時間でサンプリングし、これらのサンプルのセグメントを取得し、図4に示すようにサンプル・データのセグメントを十分オーバーレイしてアイ・ダイアグラムを再構築します。

HDフォーマットに対応するCRCはSMPTE 292Mに規定されており、EAVおよびライン番号ワードの後に位置しています。そのため、CRCチェックはラインごとに行われます。WVRシリーズまたはWFM7000シリーズ・WFM6100型などの波形モニタは、図2に示すようなビデオ・セッションのステータス表示内にこのデータを表示し、フィールドベースごとにエラー数を報告します。ユーザは、伝送経路から受信したエラー数をモニタできます。

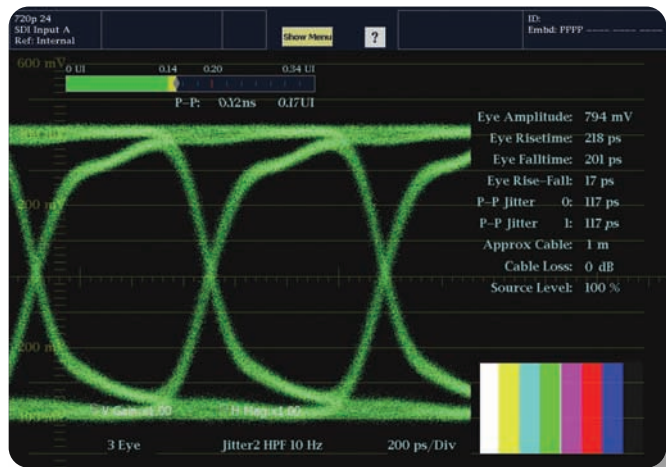
理想的な環境下で、計測器は伝送経路にエラーがないときはゼロ・エラーを表示します。エラー数が増加し始めると、ユーザはそのエラー増加に注意を払わなければなりません。1時間毎または1分毎にエラーが増加する場合、システムの状態が急激に悪化して障害が発生するデジタル・クリフ (Digital Cliff) に近づいていることを示しています。エンジニアは伝送経路を調査して、システムがデジタル・クリフに到達する前にエラー原因を特定しなければなりません。この問題を解決することはかなりむずかしいことです。

シリアル・デジタル信号の物理レイヤ・テスト方法

▶ アプリケーション・ノート



▶ 図5：アイ・パターンの基本測定仕様



▶ 図6：アイ・パターンの自動測定例

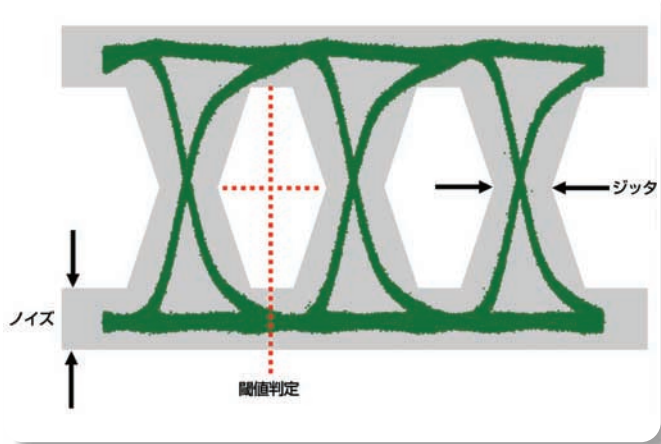
	SD	HD
振幅	800mV±10%以内	800mV±10%以内
オーバーシュート	振幅の10%を超えないこと	振幅の10%を超えないこと
立上り／立下り時間	0.4ns以上で1.50ns以下の範囲 (時間差は0.5ns以下)	270psを超えないこと (時間差は100ps以下)
ジッタ・タイミング (HPF: 10Hz)	0.2UI (740ps) 以下	1.0UI以下 (1.485Gbps時673.4ps) (1.4835Gbps時674ps)
ジッタ・アラインメント	HPF (1kHz) で0.2UI (740ps) 以下	HPF (100kHz) で0.2UI (135ps) 以下

▶ 表2：アイ・パターンの基本仕様

アイ・パターン表示で測定できる基本パラメータには、信号振幅、オーバーシュート、立上り時間および立下り時間があります。ジッタに関しても、クロック・リカバリ帯域幅が適正に設定されれば、アイ・パターン表示で測定できます。

SMPTE規格 (SMPTE 259M、292MおよびRP184) には、これらのパラメータ仕様および機器の送信端での振幅が定義されています。これらの仕様は、表2および図5に取りまとめてあります。テスト中の被測定機器と計測器の間は、短くて高品質なケーブル (通常1m) を使用することをお勧めします。短いケーブルを使うと、ノイズや周波数のロールオフはごくわずかしが発生しないので無視できます。また、ストレスのないカラー・バーのテスト信号発生器を用意する必要があります。

隣接した2つのトランジション間の時間は、クロック周波数の逆数であるユニット・インターバル (UI) として定義されています。ユニット・インターバルは、デジタル・コンポーネント 525/625 (SMPTE 259M) フォーマットでは3.7ns、またHDフォーマット (SMPTE 292M) では673.4ps (1.485Gbps) または674ps (1.4835Gbps) です。波形モニタのアイ・パターン表示を見ながらカーソルを使用すれば、計測値を確認することができます。この場合1つの問題として挙げられることは、サンプリング・プロセスと信号内のノイズが原因でさまざまなポイントで測定できてしまうため、測定場所を特定するのが困難であることです。最新の波形モニタは自動測定機能によって、高い再現性を実現しています。WFM7100型・WFM6100型の場合は、オプションPHY型によって図6で示すような自動測定機能を追加することができます。



▶ 図7: アイ・パターンの閾値判定

シリアル受信装置は、アイ・パターンの中央部で信号の閾値判定（図7）が「high」または「low」になっているかを判別して、送信されたシリアル・データ・ビットを検出します。短いケーブルで送信装置と受信装置を接続した場合は、アダプティブ・ケーブル・イコライザはシステムでほとんど影響しません。アイ・パターン表示では、クロス・オーバー・ポイント間で最大距離になることを「オープン」と呼びます。信号にノイズやジッタがある場合は伝送路を経由しながら増加するので、アイ開口部が狭くなります。SDI信号の伝送路のケーブルを延長すると信号減衰や周波数のロールオフが発生するので、これらの損失を補正するために、受信装置内にアダプティブ・ケーブル・イコライザを装備する必要があります。

受信装置によっては、各トランジション後の一定時間に固定されていることがありますが、通常受信装置はクロックやデータをリカバリするためにアイ・パターン中央部の最も適切な閾値判定ポイントを選択します。アイ開口部を閉じるような影響がある場合は、受信された信号の有用性は期待できません。順方向誤り訂正（Forward Error Correction）機能を持つ一般的な通信システムでは、イコライゼーション機能やエラー訂正機能を使用することにより、ほぼ閉じたアイ・パターンでも正確なデータ・リカバリが可能ですが、順方向誤り訂正機能を使用しないで、シリアル・デジタル・ビデオを適正に伝送するために非常に低いエラー・レートのインタフェースを使用する場合は、受信装置のイコライゼーション後に大きくてクリーンなアイ開口部が得られる必要があります。これはアイ開口部を閉じるエラー・プロセスのランダム性に起因して、頻度は少ないが許容できないエラーを引き起こすことがあるという統計的な理由に基づいています。また、SDIイコライザは同軸ケーブルの損失だけを調整し、直線性歪みに対しては補正しません。

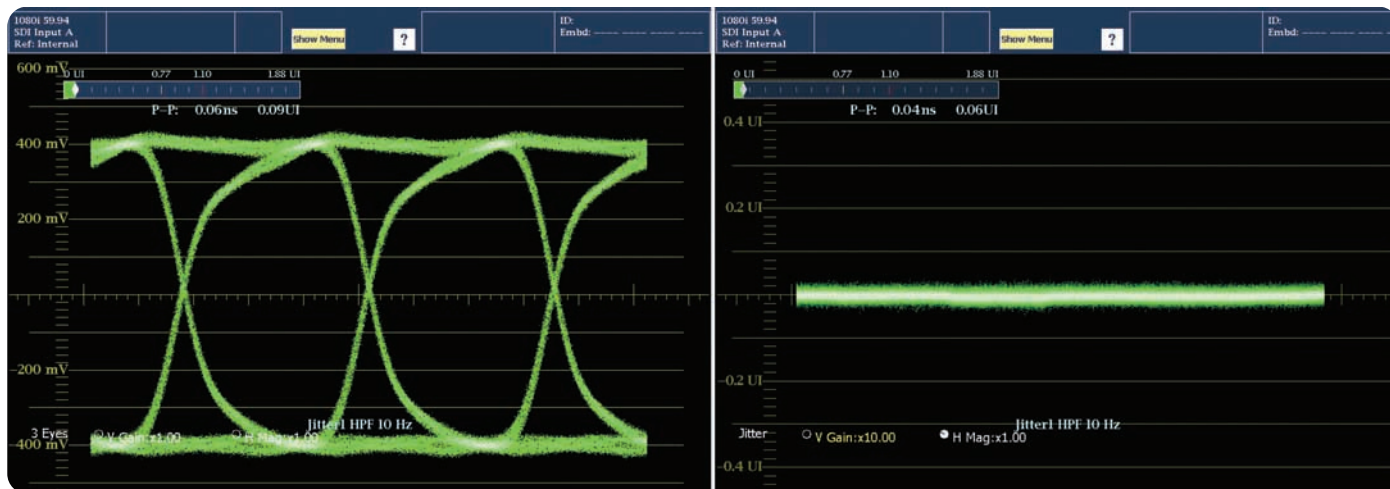
ジッタ測定

理想的な場合、SDI信号のトランジション間の時間間隔は、ユニット・インターバルの整数の倍数に等しくなります。しかし実際のシステムではSDI信号のトランジションは、時間とともに理想的な位置とずれてきます。このずれは、タイム・インターバル・エラー（TIE）と呼ばれ、通常ジッタと言われているものです。このタイミングのずれは、さまざまな周波数、振幅および位相関連歪みによって引き起こされます。（ジッタに関連する詳細情報は、当社のアプリケーション・ノート「Understanding Jitter Measurements for Serial Digital Signal」（英文：2BW-18906-0）を参照ください。）

当社の波形モニタは、HDおよびSD-SDI信号のピーク・トゥー・ピーク時のビデオ・ジッタを自動的に測定するために、位相復調（Phase Demodulation）手法を採用しています。波形モニタは、一般のSDI受信装置がデコードする信号に相当するイコライズされたSDI信号に含まれるジッタを測定します。ビデオ・データには分離されたクロックがないため、サンプリング・クロックはデータ・トランジションを検出することによって再生する必要があります。想定したクロック周波数の周辺のエネルギーを直接再生することにより、入力信号でリアルタイムにロックされた広帯域発振器を駆動させることが可能になります。これにより、平均化されて低い周波数帯域幅特性を有する位相同期信号を発振します。この発振器出力はその後、位相復調器で比較されます。そして計測器に内蔵された位相検出器はリアルタイムで復調されたジッタ信号を生成して、ジッタ波形を表示します。このジッタ表示は、ビデオ信号のラインおよびフィールド周波数レートに関連付けることができると、ユーザは高域フィルタの帯域幅を選択して復調表示を行うことができます。

シリアル・デジタル信号の物理レイヤ・テスト方法

▶ アプリケーション・ノート



▶ 図8: (a) HD SDIのアイ・パターン表示、および (b) ジッタ波形表示例 (短いケーブル (1m) を使用)

SMPT E RP184で規定されているように、ジッタ・タイプには2つの定義があります。

タイミング・ジッタ

タイミング・ジッタとは、ある規定周波数 (代表的には10Hz、あるいはそれ以下) より高いレートで発生する信号トランジション位置の変移のことです。この規定周波数 (10Hz) 以下で発生する変化は「ワнда」と呼ばれます。

アライメント・ジッタ

アライメント・ジッタとは、信号自体から再生されたクロックのジッタに対する信号トランジション位置の変移のことです。クロック抽出プロセスの帯域幅により、アライメント・ジッタにおける低域の周波数リミットを規定しています。この周波数リミットはSDシステムでは1kHz、HDシステムの場合は100kHzです。

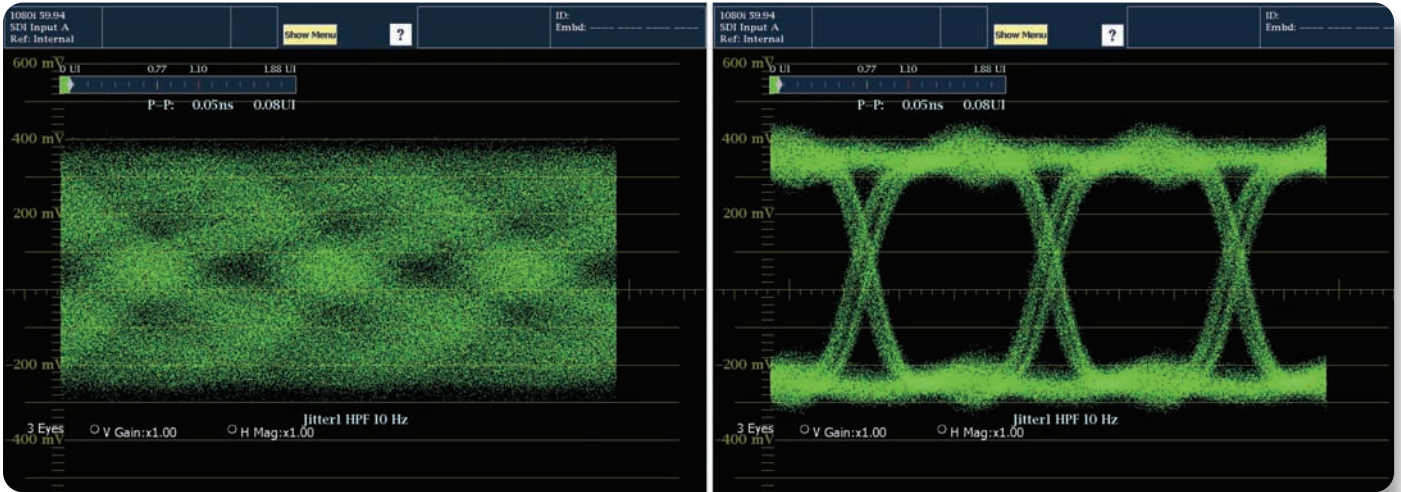
許容できるタイミング・ジッタ値としては、SD信号 (デジタル成分525と625に対して740ps) では0.2UI、デジタルHDフォーマットの場合は1.0UI (673.4または674ps) と規定されています。アライメント・ジッタに関しては、SDシステムでは1kHz周波数まで、またHDシステムでは100kHz周波数まで、0.2UIが許容されます。

デジタル・ビデオ・システムでは、上記の仕様を超えても正常に動作しますが、特定のポイントでは不具合が生じる恐れがあります。この障害ポイントが発生する原因を特定することは困難です。したがって、デジタルSDI信号の正常動作を保持することやシステムでデジタル・クリフ現象の発生を防ぐことは極めて重要なことです。

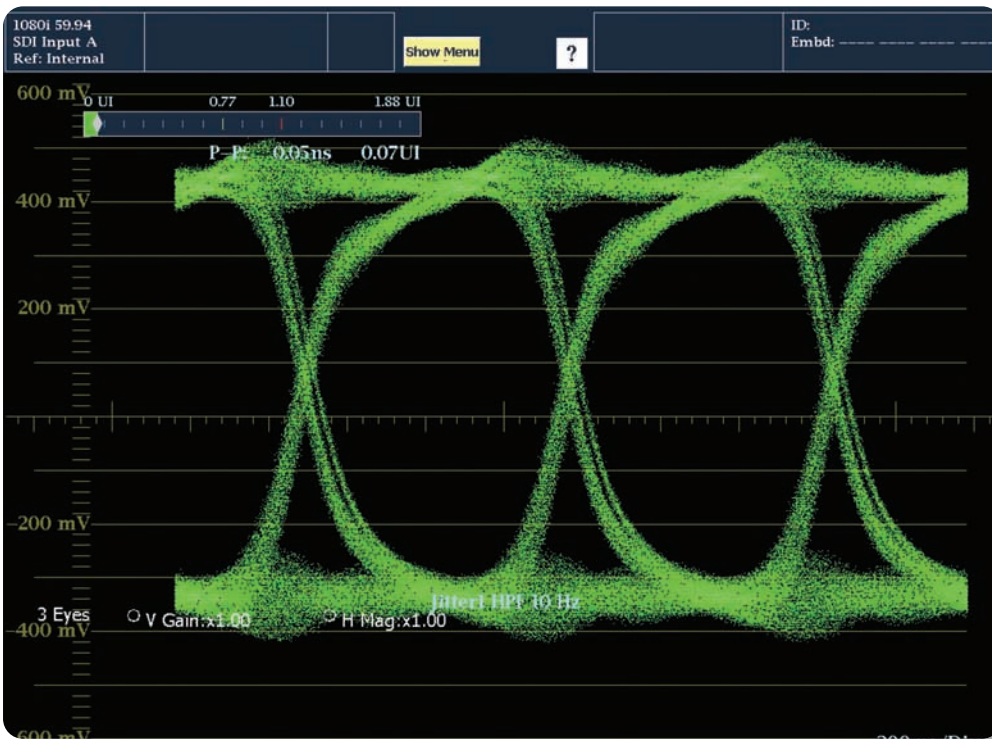
SDI物理レイヤの問題解決

信号振幅は、ノイズに関係しているので重要です。さらに信号が入力されている時に、受信装置は残留しているクロック周波数の半分のエネルギーを基にして必要な高域の補正量 (イコライゼーション) を推定します。送信側の振幅が正しくないと、受信側でも正しくないイコライゼーションを適用してしまい、信号に歪みが生じます。立上り時間の測定は、ECL論理デバイスに適切な20~80%ポイントで行います。立上り時間が正しくないと、リングングやオーバシュートなどの信号歪みが生じ、遅過ぎる場合はアイ・パターンのデータ・サンプリングに関する劣化が増えることとなります。また、オーバシュートは不正な立上り時間による結果で、受信または送信側でのインピーダンス不整合や、リターン・ロスの劣化によっても引き起こされます。

波形モニタのアイ・パターン表示やジッタ表示機能を使用して詳細に解析することにより、エンジニアはSDI信号の伝送に関する問題を解決することができます。図8aに、短いケーブル (1m) で接続したテスト信号発生器からのHD-SDI信号を示します。アイ・パターン表示上で電圧や時間の測定カーソルを使用することで、手動測定することができます。もう1つの方法として、自動測定機能が装備されている計測器があります。この場合、アイ・パターン表示を拡大表示に切替えると、その信号はSMPT E 292の送信端振幅仕様の範囲内で検証することとなります。ジッタ表示を水平ライン・レートにして、垂直レンジを拡大すると水平ライン表示全体に渡って分布するランダム・ノイズを監視できます。図8bに表示されているのは、基本的にシステムのノイズ・フロアです。



▶ 図9：(a) 開口率が劣化したアイ・パターン表示、および(b) 同一信号のイコライズされたアイ・パターン表示



▶ 図10：不適正な終端によるアイ・パターン表示例

テスト信号発生器と計測器間にBelden 8281ケーブルを40m延長すると、高周波領域で振幅減衰が発生して、信号の立ち上がり／立ち下り時間が長くなります。このケーブル損失はアイ開口率を狭め、図9aに示すようにアイ・パターン表示でははっきりしなくなり、まだ信号を正確にデコードできません。WFM7100型・WFM6100型のEqualized Eyeモードを使用すると、ユーザは図9bで示すように（等化後の）アイ開口の度合いを確認できます。Equalized Eye表示は、アダプティブ・ケーブル・イコライザ機能を持つ受信装置がデコードする信号の状態を示します。

HD-SDIシステム内では、信号が高いクロック・レートであるため、適正に終端することがとても重要になります。不適正な終端を行うと、全エネルギーは受信側の終端器または機器によって吸収されなくなってしまいます。この残留エネルギーはケーブルに沿って反射し、歪んだ波形を作り出します。これらの反射は信号内にリングングを生成して、ユーザは図10が示すようにオーバーシュートやアンダシュートとして観察できます。

シリアル・デジタル信号の物理レイヤ・テスト方法

▶ アプリケーション・ノート



▶ 図11：ジッタ・メータ・バー表示

この場合、SDIの送信元の機器には、完全にはアイソレートされていない出力が2つある例を示します。1つは終端されていないので、これをモニタに接続して適正に終端した場合でも、他の出力信号側で反射を起こして影響がでてしまいます。対策としては、未接続の出力を適正に終端すると是正できます。この終端エラーは、受信される信号に問題を引き起こさないことに注意してください。しかし、この歪みは信号経路にそれとは異なる劣化を発生させて、アイ開口率を狭め、信号からのクロックとデータをリカバリーする受信装置の能力を低下させます。

これまで、ケーブルや適正でない終端が原因で起こる代表的な不具合について説明してきました。これらの問題は、ケーブル設置上にいろいろ制限がある場合に発生しやすくなります。通常、物理的なケーブルによって引き起こされる信号歪みは、システムのジッタを大きく増加させることはありません。通常は動作中の機器（あるいはアクティブ装置）が、システム内のアイ・パターン表示に対してジッタやその他の不具合を発生する要因になります。

ジッタには2つの種類があります。

ランダム・ジッタ（Random Jitter）は機器の熱雑音（Thermal Noise）または散弾雑音（Shot Noise）により引き起こされるため、すべてのシステムに存在します。ランダム・ジッタは、無限のガウス分布で表すことができます。したがって、ジッタのRMS（二乗平均平方根）値は、ジッタ振幅の普遍的尺度として使用できます。

しかし、エラーを引き起こす原因がジッタ・ピークであるため、ガウス分布の性質によりエラーの発生が低い確率であってもピーク・トゥー・ピーク時のジッタは重要で定量化する必要があります。

デタミニスティック・ジッタ（Deterministic Jitter）には周期的な性質があり、ジッタは最大ピーク間で変移する特徴があります。デタミニスティック・ジッタは一般的に測定時間に依存しないため、ランダム・ジッタよりシステム内のジッタを簡単に明らかにできます。デタミニスティック・ジッタは動作中の機器から発生し、以下の多くの条件でシステムに取込まれます。

- ▶ 電源のスイッチを切替えると、電源のスイッチング周波数、または主電源の周波数50/60Hzと関係する周期的なデタミニスティック・ジッタを引き起こします。
- ▶ トランジションの立上り／立下り時間の違いは、システム内にデューティ・サイクル・ジッタを発生させる可能性があります。
- ▶ ビデオ信号を処理している機器は、ライン・レートとフィールド・レートに関する周期的なジッタを発生させる可能性があります。たとえば、ビデオ基準信号にGENロックされる機器はマスタ・クロックを変化させます。ラインやフィールドの周波数に関するこれらのジッタ成分は、SDI出力へ伝達されます。
- ▶ 機器内でパラレル・シリアル変換プロセスを実行すると、ワード関連ジッタをSDI出力で発生させます。
- ▶ ケーブルの周波数応答特性が送信されるデータに依存するジッタを発生させる場合があります。

SDI信号内のジッタはトランジションが発生する時間を変化させ、図7で示すようにすべてのトランジション・ポイントを拡大します。このジッタはアイ・パターン表示のアイ開口率を狭めたり、閉じたりするため、閾値判定をよりむずかしくしています。手でカーソル機能を使用したりあるいはアイ・パターン表示による自動測定機能を使用して、アイ・パターン表示内の1つのジッタのユニット・インターバルを測定することができます。まれにしか発生しないジッタ・イベントの輝度は低いのでSDI信号内で繰返すトランジションと比較して観察することがむずかしいため、このようなジッタ・イベントをアイ・パターン表示内で測定するのは困難です。



▶ 図12：電源周波数60Hzのジッタ波形表示例

WFM7100型・WFM6100型のオプションEYE型を使用すると、ジッタの読み取り値がアイ・パターン表示画面上に追加されます。この読み取り値は、測定値をユニット・インターバルと時間の両方で表示されます。操作環境としては、SDI信号がジッタの閾値を超えたことを示す色による警告がジッタ・メータ・バーに簡単表示されます。この閾値は、ユーザが指定することができます。このバー表示には、ユーザ指定の閾値の前後の値が表示されるよう設定してあります。バー表示全体にはユーザ指定の閾値の170%が表示され、図11に示したとおり、ジッタ値が増加するにつれ、バー表示が緑色から黄色に、そして最後には赤色に変化します。ジッタ値が閾値の70%の場合は、バー表示の色は緑色から黄色に変化します。測定値が閾値の100%になると、バー表示の色は黄色から赤色に変化します。この機能により、ユーザはSDI信号の潜在的な問題を簡単に目視で確認したり、システムのジッタ特性を瞬時に観測できるようになります。ジッタの読み取り値は、どのジッタ・フィルタを使用するかによって変わるため、適切なフィルタを選択すれば、タイミング・ジッタおよびアラメント・ジッタの測定が可能になります。

WFM7100型・WFM6100型のオプションPHY型に装備されているジッタ波形表示機能を利用すると、アイ・パターン表示およびジッタ読み取り機能よりも詳しく信号内のジッタ問題を調査することができます。ジッタ波形は、ビデオ・レートに関して1ライン、2ライン、1フィールド、2フィールド表示のいずれかで表示できます。

システム内のジッタを調べる際には、2フィールド表示を選択してディスプレイのゲインを上げます。どんなシステムにもわずかなジッタは含まれているものの、表示パターンは水平なラインでなければなりません。ゲインを10倍まで高めると、図8bに示したとおり、測定システムの内部ノイズやノイズ・フロアが表示されます。これは事実上ランダムな要素で、ビデオ信号と相関性はありません。

信号内に電源ハムがある場合、電源周波数のジッタ波形表示に周波数偏差が加わります。これにより、図12に示すとおり、電源周波数のジッタ表示パターンに周期的に垂直方向の乱れが生じます。WFM7100型・WFM6100型はさまざまな帯域のフィルタを備えており、信号内のジッタ周波数を分離させるのに有用です。100Hzのフィルタを選択すると、相関性のある垂直方向のラインや周波数の高い部分を弱めることなく、ジッタ波形画面に表示された電源周波数の垂直方向の変化を低減できます。

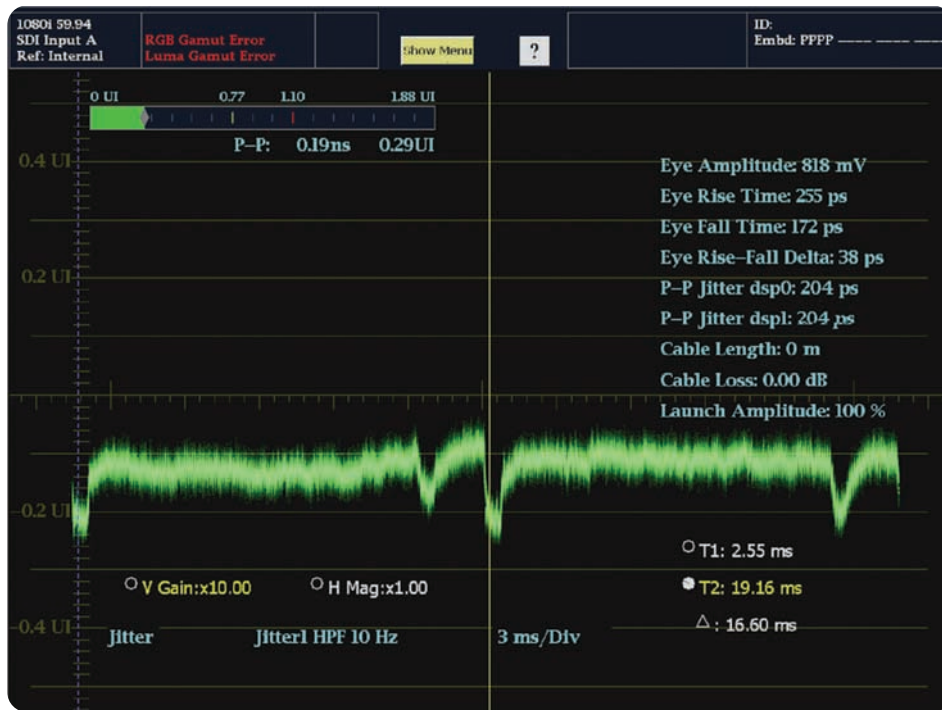
ジッタ読み取り機能では、ユニット・インターバルと時間の両方の単位で測定されます。計測機器内の設定により、測定値が閾値を上回った場合にジッタ検出計の色が赤色に変わるように変更できます。このアラーム状態を計測機器のエラー・ログに記録し、長年にわたり同様のエラーを監視してエラーの差異を調べたり、どんな場合にシステム内でエラーが発生するのか見極めたりできるようにすることも可能です。

シリアル・デジタル信号の物理レイヤ・テスト方法

▶ アプリケーション・ノート



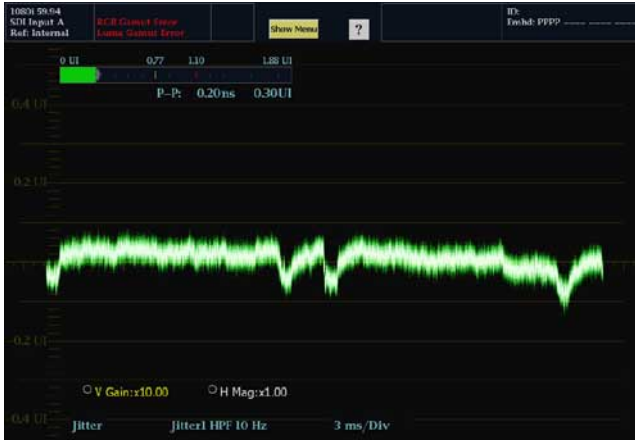
▶ 図13： タイミング・ジッタとアライメント・ジッタの同時測定例



▶ 図14： WFM7100オプションPHY型によるジッタ表示例

WFM7100型・WFM6100型では、2種類の異なるジッタ設定によって、タイミングとアライメント・ジッタの同時測定が可能です。たとえば、片方のフィルタではタイミング・ジッタが測定されるよう設定し、もう一方のフィルタではアライメント・ジッタが測定されるように設定することができます。ここで留意すべきことは、WFM7100型・WFM6100型ではタイル1（画面左上）

およびタイル2（画面右上）はジッタ1の測定値と連動しており、タイル3（画面左下）およびタイル4（画面右下）はジッタ2の測定値と連動しているということです。図13の場合、タイミング・フィルタ（タイル1および2）とアライメント・フィルタ（タイル4）は、2つの異なる高域ジッタ・フィルタを選定して比較できるように設定してあります。



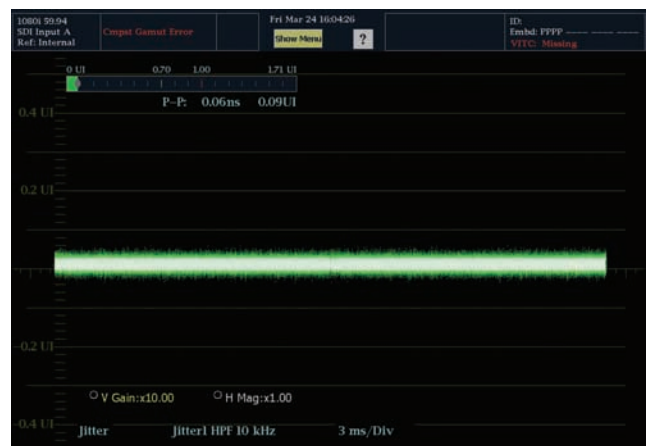
10Hzの (HP) フィルタによるジッタ表示



100Hzの (HP) フィルタによるジッタ表示



1kHzの (HP) フィルタによるジッタ表示



100kHzの (HP) フィルタによるジッタ表示

▶ 図15: 各設定フィルタによるジッタ表示例

図12の事例では、60Hzの単一のジッタ成分のみが示されています。しかし、多くの場合、図13に示したように、信号内には複数のジッタ周波数成分が現れます。このような場合、SDI信号内のジッタ周波数成分をすべて分離するのが困難になります。WFM7100型・WFM6100型に搭載されている各種ジッタ・フィルタを利用することにより、このような周波数成分を簡単に分離することができます。

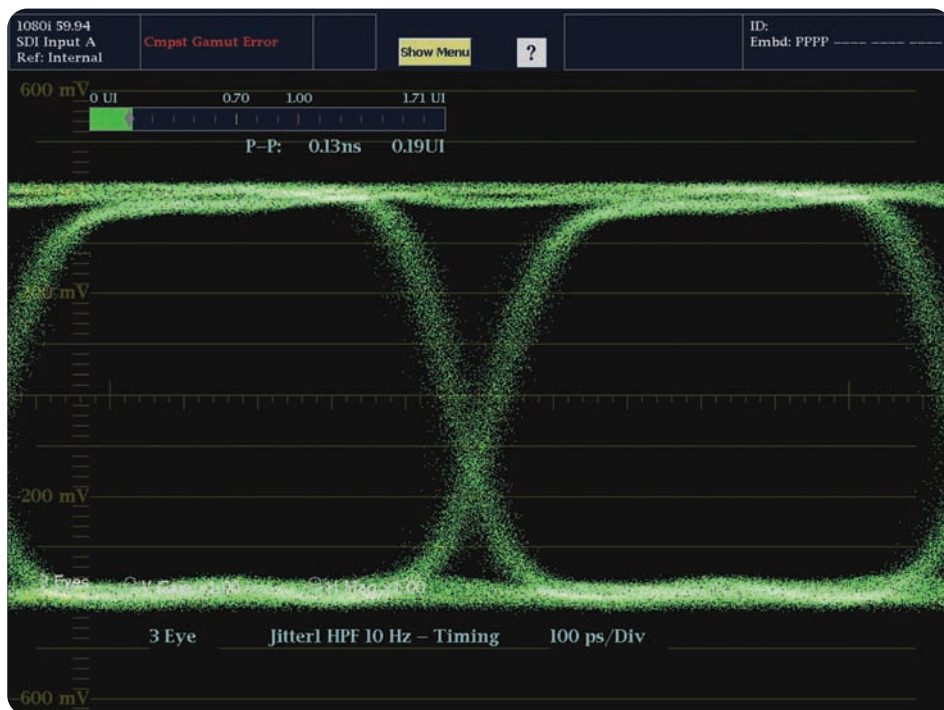
信号から観測可能な周波数成分について、図14でさらに詳しく見てみましょう。10Hzの低い周波数（タイミング・ジッタ向け）にフィルタ設定すると共に（水平軸を）2フィールド・モードでジッタ波形を表示するように設定した場合は、信号内に複数のジッタ周波数成分を確認することができます。各周波数成分を分離させるのはむずかしい場合があるものの、ジッタのピーク・トゥー・ピーク値に影響を及ぼす周波数成分がどれぐらいの範囲に分布しているのか観測するには、各種ジッタ・フィルタを利用するのが有効です。

メニューから、10Hz、100Hz、1kHz、10kHz、100kHzのフィルタを選択できます。図15に示した事例では、各種フィルタを利用して、ジッタの読み取り値とジッタ波形を表示しています。10Hzフィルタではジッタ測定値は0.3UIで、フィールド・レートでのジッタ波形表示パターンに乱れが現れています。さらにジッタ波形表示上で見ると、パターン内に断続的な垂直偏移がいくつか生じています。（図14のスナップショット・イメージには表示されていません）そのジッタ波形表示では、ピーク・トゥー・ピーク値が、表示そのものから実際に目視で測定した値よりも大きくなっています。

このような場合、信号内にワンドと呼ばれるゆらぎ成分があると考えられます。

シリアル・デジタル信号の物理レイヤ・テスト方法

▶ アプリケーション・ノート



▶ 図16：立上り／立下り時間が異なるアイ・パターン表示例

100Hzのフィルタを適用した場合にはジッタの周波数成分の一部が減少し、表示パターンにおける垂直方向の乱れも低減しています。これにより、さらに安定した表示が得られ、測定値は0.17UIとなっています。しかしフィールド・レートでの乱れは、依然存在しています。1kHzフィルタを選択するとジッタの周波数成分がさらに減少し、表示パターンもフラット・ラインに近づきますが、フィールド・レートでの乱れはまだ見られます。1kHzフィルタにおけるジッタ読み取り値は、100Hzフィルタの数値からあまり下がりませんでした（0.17UIから0.14UIへ減少）。100kHzフィルタを選択した場合には、ディスプレイにはフラットなパターンが表示され、ジッタ読み取り値は0.07UIと大きく低下しています。100kHzフィルタでは、デバイスの出力信号がそのユニットの通常の操作パラメータの範囲内にあり、物理レイヤのデコーディングに適した信号が生成されていることとなります。

上記の事例のように、通常、周波数帯域が狭いほど、また周波数の高いフィルタを選ぶほど、ジッタ測定値は小さくなるのが普通です。しかし、フィルタの周波数を上げて測定帯域幅を狭くしたのに、ジッタの読み取り値が上昇した場面に遭遇されたエンジニアの方もおられるでしょう。これは、SD信号に原因があるのでしょうか？ このようなケースについて、上記のように説明するとしたら、信号内にパルス性のジッタが存在して、このパルス性のジッタ成分が設定したフィルタの周波数帯域内に存在するためと言えます。このジッタ成分は選択されたフィルタによって除去される代わりに、実際には微分されて、高い周波数帯域のフィルタによってパルスの実効（RMS）値が低下しても、パルスの立上り／立下り部分のトランジションでリングングが生成されて、ピーク・トゥー・ピークのジッタ値が事実上大きく表されることとなります。

ここで計測器を使用することによって、装置またはシステム内のジッタに関わる問題の検証方法を実証することができます。実際の機器内には非常に低いジッタ周波数成分も含まれています。このジッタによって、長い伝送路を使用する場合やコンポジット・アナログ信号への変換の際に問題が発生する恐れがあります。信号内に残留して周波数の非常に低いジッタ（通常、10Hz以下）成分はワンダと呼ばれ、ジッタ測定の対象には含まないのが一般的です。このワンダは、システム内部で独特の問題を発生させる場合があります。

たとえば、SDI信号を伝送するATM交換網やMPEG伝送システムでは、システムにワンダ成分（絶え間なく周波数シフトが起こる現象）が発生する場合があります。しかし、信号を復号した場合にはSDI伝送に関する影響は見られません。アイ・パターン表示自体では、前後に多少の乱れが見られる場合があります。このSDI信号をコンポジット・エンコーダに入力して変換した場合に、ワンダ成分によって、コンポジット信号のカラー・バーストに軽微な周波数変動が発生する恐れがあります。エンコードされたこのコンポジット信号をレファレンス信号にGENロックした場合、ベクトルスコープで見るとバースト位置に理想的なポジションからの多少のずれが断続的に見られることがあります。旧式のコンポジット・レコーダの中には、ワンダを追跡してビデオ信号に潜在する絶え間ないカラー・シフトを記録できない問題が発生する恐れもあります。



▶ 図17：HD信号の20アイ・パターン表示例

場合によっては乱れが大きく、それが原因でカラー・バーストがアンロックになると、モニタ上にカラー・フラッシュが見られます。このような場合には、システム全体を通して、このワグダ成分を発生している具体的な機器を特定する必要があります。

上記のSDIシステム的设计にあたっては、WFM6100型またはWFM7100型のオプションEYE型またはオプションPHY型による位相復調出力またはクロック出力信号を利用して、各ジッタ成分の分析をさらに細かく行うことが可能です。そしてこの出力信号をスペクトル・アナライザあるいはFFTスペクトル表示機能を備えたオシロスコープを使用して、ジッタ周波数成分をさらに詳しく解析することができます。

図8aに示したとおり、一般的にアイ・パターン表示には中央の50%の位置に遷移を表すクロス・ポイントがあります。信号遷移の立上りまたは立下り時間が一定でない場合には、アイ・パターン表示は、遷移の変動の度合いに応じて50%の位置から離れます。機器間をAC結合すると、高いレベルの信号の場合はシフトして固定の閾値判定ポイントが変化するので、ノイズ・マージンを減少させます。通常、SDI信号では立上り時間と立下り時間は対称的であるものの、非対称なライン・ドライバと光信号源（レーザー）では、図16のような非対称な遷移点が現れる場合があります。このような信号源の非対称性は、重要な影響を及ぼす可能性はあるものの、信号の立上り／立下り時間には特に大きな影響を及ぼしません。とりわけ、ケーブル減衰は概して信号遷移時間に非常に大きな影響を及ぼします。適切な補正やその他の修正を施さないと、SDI信号の非対称性によって、復号の際に使用される閾値判定ポイントのノイズ・マージンが減少し、復号エラーが発生する恐れがあります。

これまで、大抵の測定機器で見ることのできる典型的な3アイ・パターン表示を紹介してきました。この3アイ・パターン表示は、SDI信号のデータ構造との相関性はありません。SDI信号をパラレル・データ・ストリームからシリアル信号へ変換する過程では、数多くの処理が発生します。SDでは、Cb、Y、Cr、Y*データ・ストリームの10ビット・データがシフト・レジスタを経由して、NRZ (Non-Return to Zero) シリアル・データ・フォーマットとして出力されます。パラレル情報はシリアル化後に、以下の数学関数によってデータ・ストリームをスクランブル処理が施されています。

$$G1(X) = X^9 + X^4 + 1$$

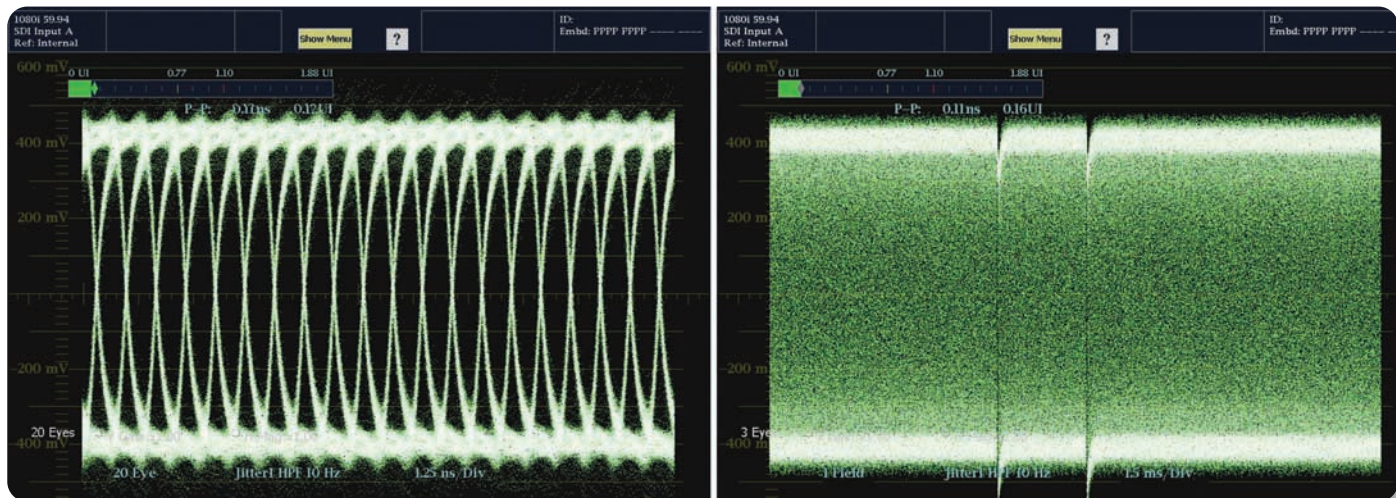
上の式において、指数はクロック遅延を、プラス記号は排他的論理和を表しています。

続いて、以下の数式によってNRZI (Non-Return to Zero Inverse) にエンコードします。

$$G2(X) = X + 1$$

シリアル・デジタル信号の物理レイヤ・テスト方法

▶ アプリケーション・ノート



▶ 図18：パソロジカル・イコライザ・テスト信号の20アイ・パターン表示およびフィールド・パターン表示例

信号をスクランブルすることによって、DC成分を低減して処理のしやすさを向上させたり、遷移点を増やしてクロック修復を容易にしたりすることが（統計上）可能になります。NRZI方式を採用すると、前のビット・インターバル（High/LowまたはLow/High）からの変化およびロジック・ゼロによって変化がない状態から、ロジック・レベル-1によって極性が変化するようにになるので、信号の極性管理が不要になります。

HDの場合、パラレル・データ・ストリームは、SDで多重化される10ビット毎ではなく20ビット・ワードで処理されます。

残りのシリアル化処理はSDの場合と同じです。

パラレルからシリアルへの変換処理では、シフト・レジスタまたは特定のビデオ・データ・パターンのデータのクロッキングの変動はクロック周波数の10分の1または20分の1でワードと相関性のあるジッタを発生する可能性があります。

SDI出力信号内のワードと相関性のあるジッタを分離するために、エンジニアは10アイ・パターン（SD用）または20アイ・パターン（HD用）表示機能を使用することができます。この表示はSDI信号のデータ・ワードと相関性を持っています。この表示では、HD信号のアイ・パターンである図17のように、各データ・ビットについて同一のアイ開口部が複数生成されるはずですが、ビデオ信号が特定のデータ構造の場合、またはパラレルからシリアルへの変換において誤った変換処理がある場合は、10または20アイ・パターンの構造に影響が現れる可能性があります。

図18では、イコライザ・テスト信号を装置に入力して、スクランブラによって特定の初期条件が満たされた場合に、伝送信号内で特定のビット・パターンが頻繁に発生する様子を示しています。このビット・パターンは、20アイ・パターン表示の上下部に現れる不明瞭なぼやけ（Fuzziness）として目視できます。さらに、このアイ・パターン表示をフィールド・モードに切替えると、図18の右側のように、信号内に障害が確認できます。

システムを最適化する際には、信号が伝送されているケーブル長を把握するのが有効です。WFM7100型、WFM6100型、WVRシリーズには、SDIステータス表示で使用されているケーブルの種類を選択して行うケーブル長測定機能が備わっています。WFM7100型・WFM6100型では、一般的なケーブルのうちの数種類（Belden 8281、Belden 1505、Belden 1695A、Belden 1855A、Image 1000、Canare L5-CFB）に対応しています。指定のケーブル長を測定したり、問題の検証を行ったりする際には、このケーブル測定機能が有効です。一方で、施設で異なる種類のケーブルを使用している場合には、そのケーブルは対応外であるため、上記の測定機能は使えないと考えるかもしれません。しかし実際は大半の製造メーカが上記の一般的なケーブルを使って自社のデバイスから信号を伝送する際のケーブル長を定めているため、この機能を利用できます。該当するケーブルを選択し、デバイスを見極め、仕様のケーブル長を超えないようにします。

ケーブルを選択したら、測定機器に入力されるSDI信号によって、ケーブル損失、ケーブル長、推定ソース信号レベルを測定します。

- ▶ ケーブル損失はケーブル長による信号損失をdB（デシベル）単位で表します。0dBは800mVの信号を表し、-3dBは0.707倍のソース振幅であることを示します。
- ▶ ケーブル長は、ソースとなる信号源と波形モニタ間のケーブルの長さを表します。測定機器は、出力側での信号スペクトルの減衰特性に基づきケーブル長の算出を行うので、ソース側の信号振幅には左右されません。ユーザがケーブルを選択した場合は、そのケーブルの物理長、また別の種類のケーブルを選択したり連結して使用している場合には、相当するケーブルの物理長を計算します。
- ▶ ソース・レベルは、ユーザの選択した特定の種類のケーブルに基づき、ケーブル路が途切れていないと仮定した場合の信号源振幅の計算値を表します。

これらの測定機能は、システムを最適化し、その性能を検証する際に特に有用です。システム・インテグレータは、使用するケーブルについて、製造メーカーから提供される性能仕様書の内容を把握することによって、システム内におけるそれぞれの連結部の最大ケーブル長に関して製造メーカーの推奨する性能範囲内にあるか簡単に確認することができます。たとえば、表1には、HD信号用のBelden 1505Aの推奨最大長が91mであることが示されています。もしも、SDIステータス表示に、HD信号における測定値が89mと示された場合には、システム・インテグレータは、システム内のケーブルの許容限界まで余裕が2mしかないことを認識します。

そしてシステム・エンジニアは、これが用途に適しているかどうか判断しなければなりません。その際、この測定値は、ケーブル経路が途切れていないという仮定に基づいていることに留意する必要があります。この測定値は、信号経路内の多数の動作中の機器を経由して得られる場合もあります。その場合には、各連結部毎に、ケーブルの一方の端部にテスト・ソース信号を入力して、反対側の端部に測定機器を使用して個別に測定する必要があります。これによって、システムの各部内のケーブル長の測定値に関してさらに信頼性の高い結果が得られ、システムにおいて、各信号経路間に十分な許容限界を確保できることとなります。信号の伝送距離がケーブル・メーカー指定の最大長を超えている場合には、新たに能動型装置を信号経路内に挿入する必要があります。エンジニアは、各種デジタル分配増幅器から選ぶことができます。

イコライズ機能付分配増幅器（DA）

このタイプの機器には、ケーブル長に起因する信号損失を補正するイコライザが内蔵されており、信号振幅は再構築されますが、信号内に存在している可能性がある内部ジッタや内部ノイズは除去されません。このような等化機能付DAは、複数の信号出力が必要な場合で、機器間を接続するケーブル長が短い場合に最適です。ただし、信号経路内でこのタイプの機器を複数カスケード接続するのは推奨できません。この場合、存在するジッタが信号経路全体に蓄積する恐れがあります。

リクッキング機能付分配増幅器（DA）

このタイプの機器にはイコライザ内蔵型の機能に加え、データ・ストリーム内に埋め込まれているクロックを抽出する機能も備わっています。そしてデータ・ストリームは、安定な抽出クロックによってリクックされます。このタイプのDAは、クロック抽出回路の位相ロックループ（PLL）帯域幅以外のジッタ成分を減少させます。

ただし、位相ロックループ帯域幅以内のジッタ成分は再生成され、同様の処理を繰り返すたびに蓄積される恐れがあります。

したがって、システム内に同時にカスケード接続できるリクッキングDAの数には限界があります。

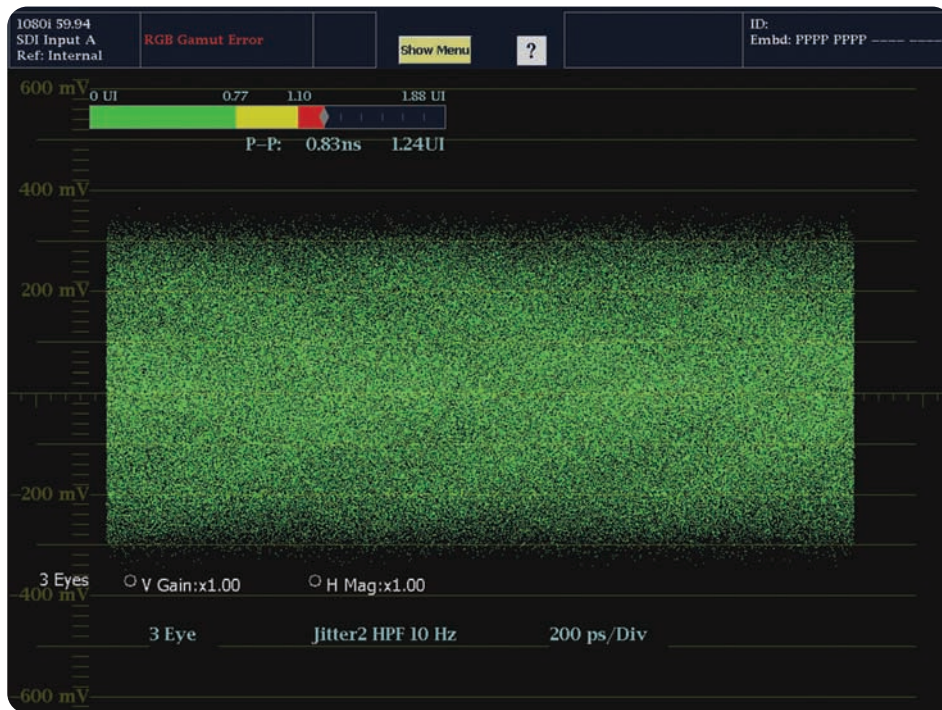
この限界は、使用する機器の種類、使用する発振器のループ帯域幅、システム内で使用するケーブルおよびコネクタの種類によっても異なります。

システムがエラーなく動作するようにするためには、使用するDAの種類を的確に選ぶことが重要です。

また、市販されている各デバイスの違いと各製造メーカーの機器の仕様を理解することも大切です。

シリアル・デジタル信号の物理レイヤ・テスト方法

▶ アプリケーション・ノート

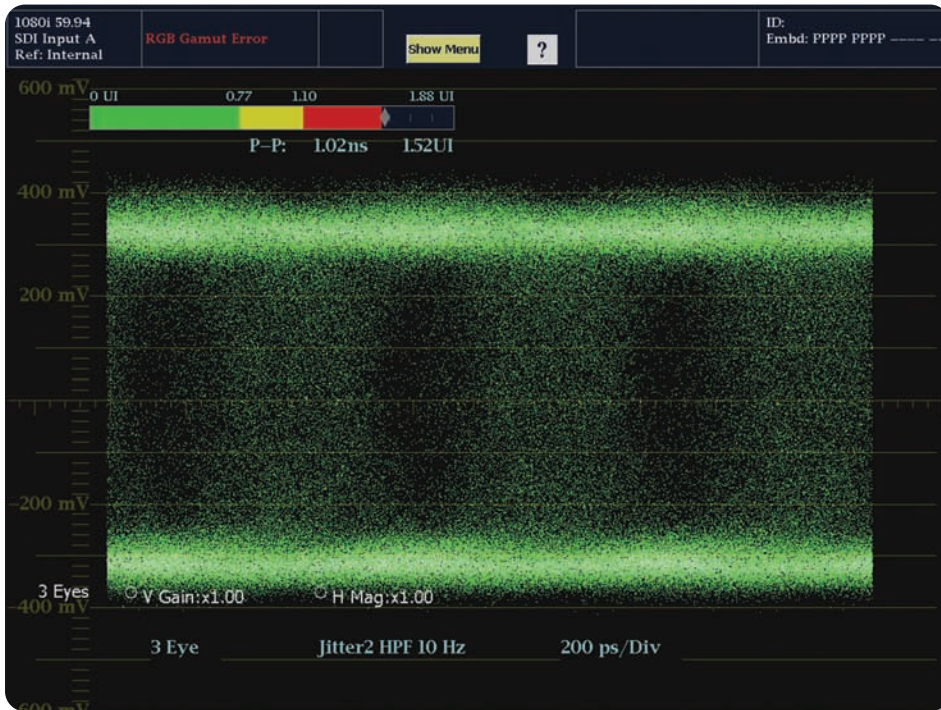


▶ 図19：アイ・パターンが閉じた状態のSDI信号例

HD-SDI設備の検証事例

SDI機器の導入および稼動に際しては、SDI機器の各部がオンラインになるため、これまで取上げてきた各種ツールを使用してシステムの最適化とトラブルシューティングを行うことができます。まず、接続部の一方にカラー・バー、パソロジカル・テスト・パターンの既存のテスト信号発生器を接続し、反対側の端部をWFM7100型・WFM6100型などの波形モニタを使用して監視することによって、各接続部を最適化することが可能です。WFM7100型・WFM6100型およびWVRシリーズのFlexVu®表示を使用すると、複数の信号表示画面を選択して同時に見ることができます。

たとえば、アイ・パターン、SDIステータス、ピクチャ、ビデオ・セッションなどを1画面に同時表示させることができるため、エンジニアはアイ・パターン表示を即座に確認できるだけでなく、SDIステータス表示でジッタ測定値とケーブル長を知ることができます。さらにピクチャ表示を選択して、ドロップ・アウトや画像の乱れがないように、信号を視覚的にチェックできます。ビデオ・セッション表示では、復号したビデオ信号と共にCRCエラー・チェックができるので、エラーのないオペレーションが可能になります。



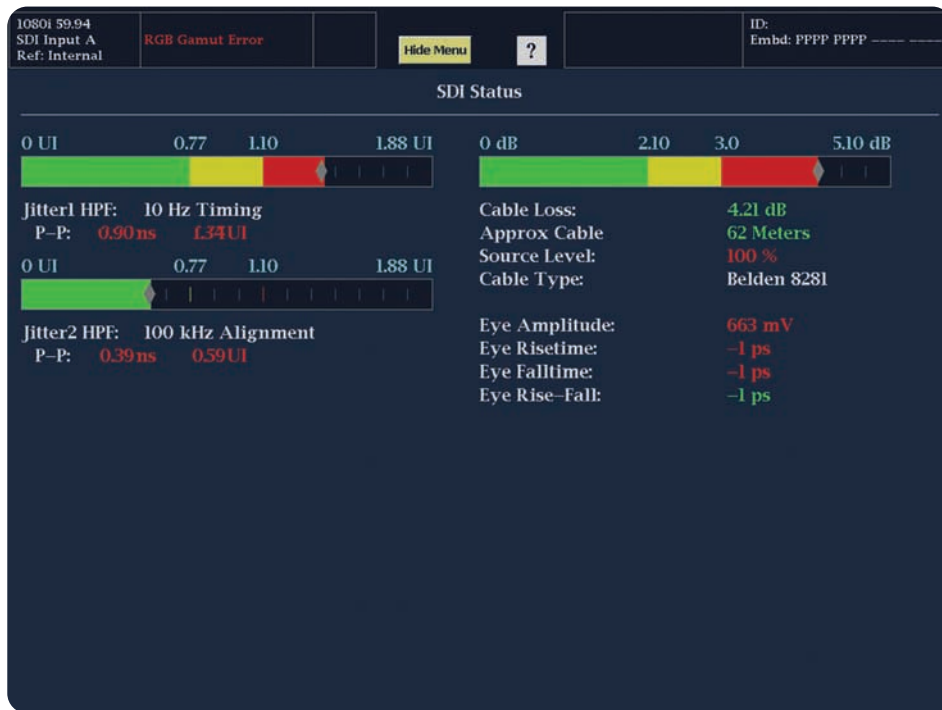
▶ 図20：アイ開口部がわずかなイコライズド・アイ・パターン表示例

ケーブル・システムのチェックが完了したら、各種ビデオ機器をオンラインにすることができます。理想上では、段階的かつ秩序だった方法でオンラインにし、オンラインにする時に各システムのテストを行えるようにする必要があります。各機器の出力信号をテストした場合は、正常で仕様どおりに動作する必要があります。ビデオ機器が独自のテスト信号発生機能を内蔵している場合は、SDI信号がビデオ機器を通過しなくても、ビデオ機器の出力信号をテストしたり検証することが可能になります。また、このような機器を使用すると入出力機器の分離を可能にするので、問題が発生した場合に、システムの信号経路を通して問題のトラブルシューティングする場合に力を発揮します。さらに、物理レイヤを監視する機能を装備した波形モニタを使用すると、施設内の要所要所でシステムの品質の検証をしたり、メンテナンスするのに役立ちます。

施設の稼動中に問題が発生した場合にはその段階を問わず、問題の原因を明らかにできることが大切です。白黒ノイズ (Sparkle Effects)、ラインのドロップ・アウトや画面のフリーズが発生した場合、経路末端の受信装置において、SDI信号から抽出したクロックおよびデータに障害が発生したことになります。信号を波形モニタに接続して、アイ・パターン表示を見ることで、問題をさらに詳しく調べることができます。図19のようにアイ・パターンが閉じた状態だと、信号に生じた問題の内容を見極めるのがむずかしいため、エンジニアは波形モニタのイコライズド・アイ・パターン表示機能を選択する必要があります。計測器に内蔵されたイコライザによってデータ復元が可能な場合には、そのイコライズド・アイ・パターン表示は図9bのようになります。一方で、イコライズド・アイ・パターン表示が図20のようになると、受信機器でクロックおよびデータを復元するのは困難で、この場合、受信機器でデータ・エラーが発生する恐れが高くなります。

シリアル・デジタル信号の物理レイヤ・テスト方法

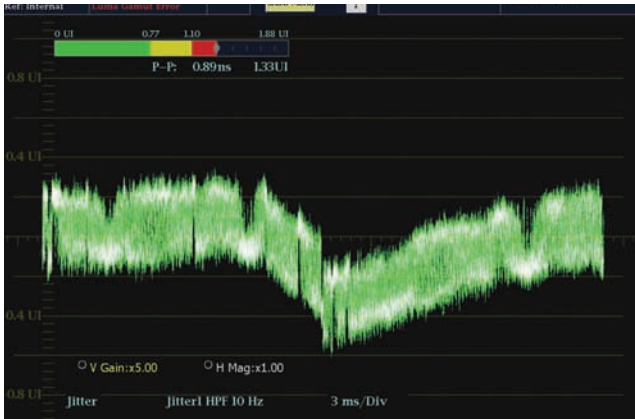
▶ アプリケーション・ノート



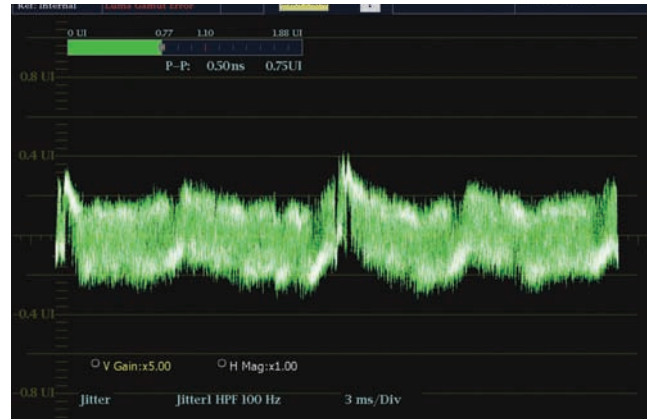
▶ 図21：ケーブル長測定値が表示されるSDIステータス画面例

このようにアイ開口部が識別できないケースでは、ケーブルが長すぎるか、デバイスの伝送やカスケーディングに問題がある可能性があります。そこで問題を割り出すために行う消去法プロセスが有効です。施設内で使われているケーブルの種類を確認して、計測機器を使用して経路のケーブル長を測定しなければなりません。図21のケースでは、信号源と受信装置間のケーブル長が62mと示されています。ただし、この測定値は信号源と受信装置間のケーブルに途切れがないことが前提となっており、また、デバイスのカスケーディングは考慮されていないという点を留意する必要があります。Belden 8281およびHD-SDI信号の最大許容長は79mなので、この信号はケーブルの仕様範囲内であることになります。したがって、この場合の問題はシステムのケーブル長とは直接関連がないということになります。

上記の例のように、同時にカスケードされた動作中の機器が複数あるケースでは、システムにおける前段の動作中の機器まで戻って信号経路をトレースして動作を検証する必要があります。それでも問題が解消されない場合には、エラーのない信号が観測されるまで、システムの経路をさらにさかのぼって追跡しなければなりません。エンジニアによって、SDI信号がエラーを発生させることなく機能しているポイントが特定できた後は、そのポイントにおける機器の出力信号を検証する必要があります。この検証は、既知のSDIテスト信号発生器を使用して機器および信号経路の動作を確認します。ケーブルの問題ではないと考えられるため、アイ・パターンおよびジッタ表示機能を利用して、さらに問題を突き詰めていったところ、この事例では、デバイスの1つの出力部分に大きなジッタが見られたので、その機器を外して別のユニットに交換しなければなりませんでした。



10Hzの (HP) フィルタを選択した場合のジッタ波形表示。ジッタ読み取り表示によると、ジッタは1.33UIで、フィールド・レートでのジッタは大きくシフトしています。



100Hzの (HP) フィルタを使用した場合、パターンは水平に近づき、ジッタ読み取り値は0.75UIになります。このことから、100Hz以下に大きなジッタ成分があり、電源周波数のジッタである可能性があることがわかります。



1kHzの (HP) フィルタを選択した場合のジッタ読み取り値は0.88UIで、信号内にあるジッタは多少増加しており、このフィルタを使用すると、微分現象がフィールド・レートで発生しているのを観察できます。これは、ジッタ成分が測定帯域の境界付近に存在することを示しています。



10kHzの (HP) フィルタを適用した場合のジッタ読み取り値は、0.75UIになっています。ジッタ波形のパターンはさらに水平に近づいています。



100kHzの (HP) フィルタを適用すると、ジッタ読み取り表示ではジッタは0.57UIになります。

▶ 図22: 各種フィルタを選択した場合のジッタ・パターン表示例

シリアル・デジタル信号の物理レイヤ・テスト方法

▶ アプリケーション・ノート

エンジニアは、2フィールド・モードでジッタ波形表示させて、ジッタ・フィルタを選択することによって、信号内に存在する各種ジッタ成分を検証することができます。

このようなシステムでは、エンジニアは、システムにリクッキング機能付分配増幅器を追加するか、問題の原因となるジッタ成分の排除を行える機器を選びたいと考えるでしょう。ひとたびシステムの導入・稼動を完了した後でも、基本的な技術手法を利用して、システムの注意深い監視が必要になります。ポスト・プロダクションや放送設備などでは、時折最終製品の完成を早める方法が取られる場合があります。この様な場合は、混在した設備を運用する必要性があります。現在のほとんどの設備は、関連するシステムに接続するためにアナログやSDデジタル、HD信号によるハイブリッドな運用を行っています。このようなシステムの多様性および複雑性によって、システム内ではさまざまな種類のケーブルおよび終端器などが混在して使用されています。

たとえば、前述したように、不適正な終端器を使うと、SDI信号経路に反射が発生する恐れがあり、HDシステム内での使用に適しているかチェックせずに、単に一番近くにある終端器を選択してしまうと、その使用した不適正な終端器はSDI信号を阻害しかねません。たとえば、WVR7100型にはパッシブ・ループスルー接続機能が搭載されています。無造作に終端器を選んだ場合に、それがアナログ・コンポジット用の仕様であれば、HD-SDI信号に障害が発生する恐れがあります。したがって、上記のような潜在的な障害が発生しないようにするためには、測定機器を使用してシステム動作をモニタリングすることにより、その障害を速やかに判定することが重要になります。

SDIの運用監視

オペレータが簡単なツールを複数使用すれば、HD-SDI信号を絶えず監視することができます。HD信号の各ラインのデータ中には、ルミナンス、クロミナンス双方の成分についてCRCデータが含まれています。図2のビデオ・セッション表示を使ってシステム内の問題発生を認識する場合、このようなシンプルなアプローチが最初の段階では便利です。測定機器で信号経路を監視すると共に、CRCエラーが発生した場合に警告を発生するように設定することができます。もしも、測定機器がCRCエラーがデータ・ストリーム内で発生したことを報告し始めたら、その信号がデジタル・クリフに近づいていることを示している可能性があります。エラー・ログにはCRCエラーがいつ発生したかを示す時間情報が表示することができるため、このエラー・ログを使って、信号経路の問題と装置の問題を切り分けることが可能です。

さらに、波形モニタがアイ・パターン表示している場合には、エンジニアは、信号の物理レイヤの保守のために許容範囲のリミット値を設定できます。信号がこの制限範囲から外れた場合には、エラー・ログに、内部の時計情報またはタイムコード情報を付記してエラーがいつ発生したかを示すリストを表示することができます。上記のCRCエラーが発生した場合、オペレータはアイ・パターン表示に切替えて、アイ開閉率とジッタ波形表示を監視できます。図12のようにジッタ・メータ・バー表示に赤い部分が現れたら、信号に問題が発生する可能性を警告していると考えられ、エンジニアリング部門によって、混合システムが原因となる可能性がある問題をさらに調査することができます。

たとえば、編集者によるプログラム編集作業を終わらせるために適当な装置（アップコンバータなど）を追加して、システムの一部のケーブルを延長したケースについて考えます。このコンテンツを早く放送したいという要請に答えるために、この作業は迅速に行われました。しかし、使用したケーブルはRG59で、このケーブルはアナログ・コンポジット信号の伝送に適当なものでした。通常、この種のケーブルをHD-SDIの導入に使用するのは好ましくないため、周波数応答特性の劣化とシステムにおける許容限界の低減を引き起こしかねません。アイ・パターン測定とCRCエラー検出を通じて、システムをモニタリングすることで、システムがその正常動作範囲を超えており、システム内に問題や変化点が存在している可能性があるという情報を得られます。これにより、エンジニアはさらに詳しく問題を調べて、エラーの原因を特定することが可能になります。

まとめ

物理レイヤを経由してSDIデータをエラーなく伝送するには、導入時に基本的な技術手法に基づいて検証したHD-SDI信号の伝送に適したケーブルを使用することが重要です。また、デジタル・テスト信号発生器や、アイ・パターン表示機能およびジッタ測定機能を備えた波形モニタなどの測定機器を利用して、導入時にシステムの性能を検証したり、システムを稼動させた後に設備の性能を継続的にモニタリングしたりすることが必要です。アイ・パターン表示により、SDI物理レイヤの状態を目視でチェックして、クロックおよびデータを復元させる受信装置に適した、開口部の広いアイ・パターンを確保する必要があります。さらに、ジッタ波形表示機能および自動アイ・パターン測定機能によって、物理レイヤをさらに詳しく調査したり、信号を絶えずモニタすることも重要になります。これらのツールは、SDI信号やデバイスの問題のトラブルシューティングを行う際にも非常に有用です。WFM7000シリーズ・WFM6100型およびWVRシリーズには、物理レイヤ測定のためのアイ・パターン表示機能およびジッタ測定機能を選択できるオプションが用意されています。

シリアル・デジタル信号の物理レイヤ・テスト方法

▶ アプリケーション・ノート

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 +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) 5424700

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 (495) 7484900

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 12 May 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。

05/06 EAWOW

25Z-19525-0

24 www.tektronix.co.jp/video

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
お客様コールセンター ccc.jp@tektronix.com

2006年9月発行