

100Gbps通信システムの 物理レイヤ・テスト

目次

1. はじめに	3	4. 診断テスト	17
2. 最新の100Gbps規格と関連の規格	4	4.1. トランスミッタが不合格になった場合の対処方法	17
2.1. 100GbE - IEEE Std 802.3ba	4	4.2. レシーバが不合格になった場合の対処方法	17
SONET/SDH	5	まとめ	18
2.2. 100 OIF CEI	5	付録 - BUJクロストーク・エミュレーション	19
2.3. Fibre Channel 32GFC	5		
3. 100Gシステムのテスト	6		
3.1. 光トランスミッタのテスト	8		
3.2. 光レシーバのテスト	10		
3.3. 電気トランスミッタのテスト	13		
3.4. 電気レシーバのテスト	15		

1. はじめに

ここ10年、データ帯域幅を必要とするアプリケーションが急速に増加しています。ビデオオンデマンド、VoIP (Voice-over-IP)、クラウドベースのコンピューティング、ストレージなど、帯域を必要とするアプリケーションにより、100Gbps技術の採用が広がっています。

ハイスピード・シリアル技術、ノイズに強い差動シグナリング、ジッタに強いエンベデッド・クロックと閉じたアイのイコライゼーションなどにより、従来のプリント基板では考えられないほどの信号経路長による25+Gbpsの伝送速度が可能になっています。これらのハイスピード・シリアル・リンクをパラレル化することにより、光トランシーバによる100Gbpsの信号伝送が可能になり、光ファイバ・バックプレーンの接続が可能になりました。またSAS、Infiniband、さらにFibre Channelなどを含む、多くのデータコム/テレコム技術で100GbE (100 Gigabit Ethernet) 伝送が可能になり、長年実績のあったSONET/SDHでさえ置き換えられつつあります。

25+Gbpsデータ・レートの十分な実績がないままに急速に100G技術が普及したため、アナログ波形がデジタル信号のBER (Bit Error Rates) に及ぼす影響を理解することがますます重要になっています。25Gbpsにおけるビット周期は40psです。これではジッタの余裕度はほとんどありません。3ps未満のランダム・ジッタはアイをほとんど潰してしまい、最新の規格では一般的に700fs未満のランダム・ジッタしか許容していません。

このアプリケーション・ノートでは、100Gシステム構築に必要なトランスミッタ/レシーバのテストについて説明します。25+Gbpsのどのハイスピード・シリアル技術も同様の方式であるため、このアプリケーション・ノートでは100GbEのコンプライアンス要件にしたがって説明し、Fibre Channelの32GFCなどの高速レート・システムとの差異については、その都度説明します。25~28Gbpsの電気シグナリングなど、100GbE仕様に差異がある場合は、OIF-CEI (Optical Internetworking Forum's Common Electrical Interface) のImplementation Agreementにしたがいます。

テストにおいては、ジッタ、ノイズ、クロストークの相互作用という共通のテーマに直面します。コンプライアンス・テストの概要に続いて、規格非適合のコンポーネント、システムの診断、性能マージンの測定に役立つテストをご紹介します。

規格		形状	距離	データ・レート	BER
100GbE	100GBASE-LR4	4シングルモード・ファイバ	10~40km	4x25.78125Gbps	$\leq 10^{-12}$
	100GBASE-ER4				
	100GBASE-SR4*	4マルチモード・ファイバ	10m以下	4x25.78125Gbps	$\leq 10^{-12}$
	100GBASE-CR4* 100GBASE-KR4*	4ケーブル、バックプレーン*	*	*	$\leq 10^{-12}$
OIF-CEI	OIF-28G-SR OIF-28G-VSR*	プリント基板上のNトレース	15~30cm*	19.90~28.05Gbps	$\leq 10^{-15}$
Fibre Channel	32GFC	Nチャンネルの光/電気	TBA*	28.05*Gbps	$\leq 10^{-12}$ *

表1. 最新規格の概要 (*の付いた規格は発行されていません。推測値として読んでください。)

2. 最新の100Gbps規格と関連の規格

規格では、コンポーネントのインターオペラビリティ (相互運用性) をテストするように推奨しています。この章では、表1の規格概要を説明します。ここで紹介するほとんどの規格は発行前のものであり、記載されている値は推測 (期待) 値です。コンプライアンス・テストにおいては、実際の規格で仕様の値を確認する必要があることにご注意ください。

技術仕様は法律用語的なエンジニアリング版として書かれることがあるため、このアプリケーション・ノートではテストそのものを明確にするための補足とし、その役割、テストの実行方法について説明します。

電気的な視点では、平衡、単方向、100Ω、エンベデッド・クロックによる差動シグナリング、低電圧振幅、NRZ (Non-Return to Zero) 信号、マルチチャンネルなどの特性が使われています。

規格によっては使用する用語が異なりますので、誤解されやすい用語を例に考えてみます。このアプリケーション・ノートでは、「データ・レート」と「ペイロード・レート」は区別します。データ・レートは、ロウ・データが伝搬するレートです。ペイロード・レートはエラー訂正やコーディングからのオーバーヘッドを含んでいないため、ペイロード・レート \leq データ・レートとなります。NRZのシグナリングのみを論じますので、GbaudではなくGbpsを使用し、「シンボル」と「ビット」を同じものとみなします。

2.1. 100GbE – IEEE Std 802.3ba

表1に示すように、IEEE Std 802.3ba 規格のLong Reach **100GBASE-LR4**と、Extended Reach **100GBASE-ER4**の2種類の100GbE光伝送仕様を引用しました。違いは主にレシーバ・エンドにあり、ER4のレシーバ感度は高く、LR4のレシーバに比べてストレス耐性テストがより難しくなっています。

このアプリケーション・ノートが書かれている時点では、Short Reach、100GBASE-SR4、4x25Gbps Low cost、Multi-Mode (MM) 規格、ケーブル/バックプレーンによる電気伝送、100GBASE-CR4、100GBASE-KR4は策定中です。これが完了すると、100GBASE仕様は完全な光インターコネクタ・システムになります。

The Shifting Trends in Optical Spend

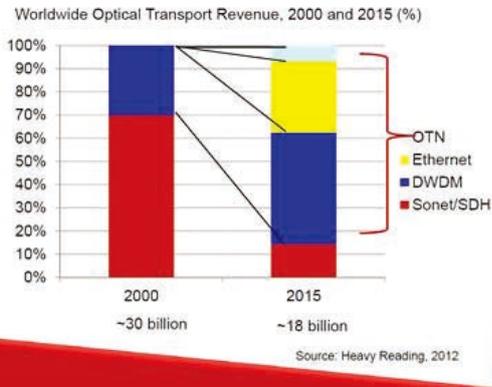


図1. 2000年と2015年の光伝送による売上比較 (グラフィック著作権はHeavy Reading)

SONET/SDH

ここ10年で、Ethernetはデータコム、テレコムの両方のすべてのネットワークにおけるデフォルトの選択肢になりました。図1に示すように、2015年におけるSONET/SDHの光伝送の売上は70%から15%以下まで落ち込むと予想されています。

2.2. 100 OIF CEI

OIF-CEIのIA(Implementation Agreements)では、IEEE 802.3ba 100GbEまたはFibre Channel仕様のようなコンプライアンス・テストは規定されていません。その代わりに、規格を通してコンポーネントのインターオペラビリティを確認するインフォーマティブ (Informative) テストとノーマティブ (Normative) テストがあることが注目すべき点です。ノーマティブ・テストはインターオペラビリティを保証するためのものであり、インフォーマティブ・テストは性能やマージンを十分に理解するためのものです。このアプリケーション・ノートでは、表1に2種類のOIF-CEI IAを引用しています。

距離の短いIAであるOIF-28G-SRは、300mm以上のPCBのマルチレーン、19.90~28.05Gbpsの差動ペア、 10^{-15} 未満のBERで動作する最大1つの接続で構成されています。

さらに短いIAであるOIF-28G-VSRはまだ発行されていませんが、暫定版から引用すると、19.60~28.05Gbpsの複数の電気レーンでSerdes (IAではホストと呼ぶ) とトランシーバ (IAではモジュール) 間でシグナリングします。Serdesとトランシーバはコネクタまで10mmほどのPCBで、さらにその先に50mmほどの配線トレースを持ち、システムは 10^{-15} 未満のBERで動作するように規定されています。

なお、実際は伝送路長ではなく、損失量が規定されています。

2.3. Fibre Channel 32GFC

より高いレート of Fibre Channel規格である32GFCのデータ・レートは28.05Gbpsです。ややこしい名称ですが32GFCは28.05Gbps技術であり、データ・レートではなく、各世代のペイロード・レートが前の世代のものの2倍になっていることを示すことから由来しています。8GFCから16GFCにおいてはデータ・レートが8.5から14.025Gbpsになり、それに伴いオーバーヘッドが大きく低減していますが、ペイロード・レートは6.4から12.8Gbpsと2倍になっています。32GFCのペイロード・レートは25.6Gbpsで16GFCの2倍ですが、28.05Gbpsのデータ・レートは32GFCの略称よりもずいぶん低くなっています。

このアプリケーション・ノートが書かれている時点で32GFCは発行されておらず、暫定版にもわずかな値しか記載されていません。

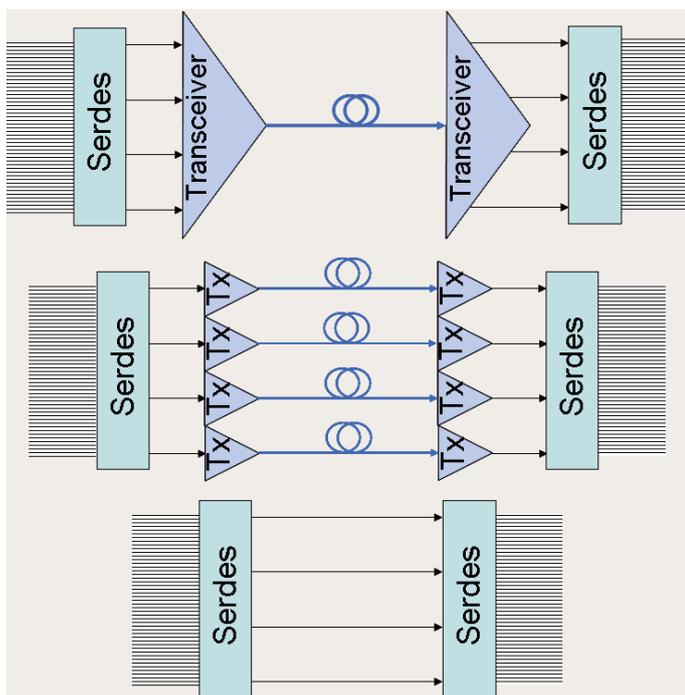


図2. 上から、(a) 4x25Gbps 100G Serdes-トランシーバWDM光システム、(b) 4x25Gbps 100G Serdes-トランシーバ光システム、(c) 4x25Gbps 100G Serdes-Serdes電気システム。この図では対称のリターン・パスにはなっていない

3. 100Gシステムのテスト

図2に、代表的な100Gシステムのコンポーネント図を示します。Serdesは信号をシリアライズして、4つの25+Gbps差動ペアで伝送します。Serdesは統合されるか、または出力ごとに独立したコンポーネントからなります。25+Gbpsの電気信号はSerdesから光トランシーバに伝送されます。トランシーバは信号をリタイムし、シングルモード (SM) またはマルチモード (MM) の光ファイバで光バージョンを伝送します。2番目のトランシーバで光信号を受け、電気信号に変換して別のSerdesに伝送してデシリアライズします。純粋な電気バージョンは、中間のトランシーバ・ドライブによる光シグナリングなしの同様の方式にしたがいます。

テスト・パターン	
0x00FF方形波	8ビット・ロー、8ビット・ハイ
PRBS9	511ビット
PRBS15	32,767ビット
PRBS31	2.1Gビット
スクランブル・アイドル	
OIF CIDジッタ・トレランス・パターン	(72 CIDビット+ ≥ 10328 from PRBS31+シード) +コンプリメント

表2. テスト・パターン

トランスミッタ・テストまたはレシーバ・テストであっても、光または電気であっても、すべてのコンポーネント、システムのコンポーネントをテストするためのテスト・パターンが必要です。PRBSn (Pseudo Random Binary Sequences、擬似ランダム・バイナリ・シーケンス) は、標準化パターンとnビットのすべての置換です。OIFCIDジッタ・トレランス・パターンはPRBS31と72ビット・シーケンスのCID (Consecutive Identical) ビットの最も積極的な要素になるように設計されていますが、管理可能な長さになっています。

テクトロニクスのBERTScopeビット・エラー・レート・テストは、PRBS31、スクランブル・アイドル、または、ついでに言えばすべての代表的なテスト・パターンを含む、最大128Mビット長までの、100G通信で使用されるすべてのテスト・パターンが出力できます。

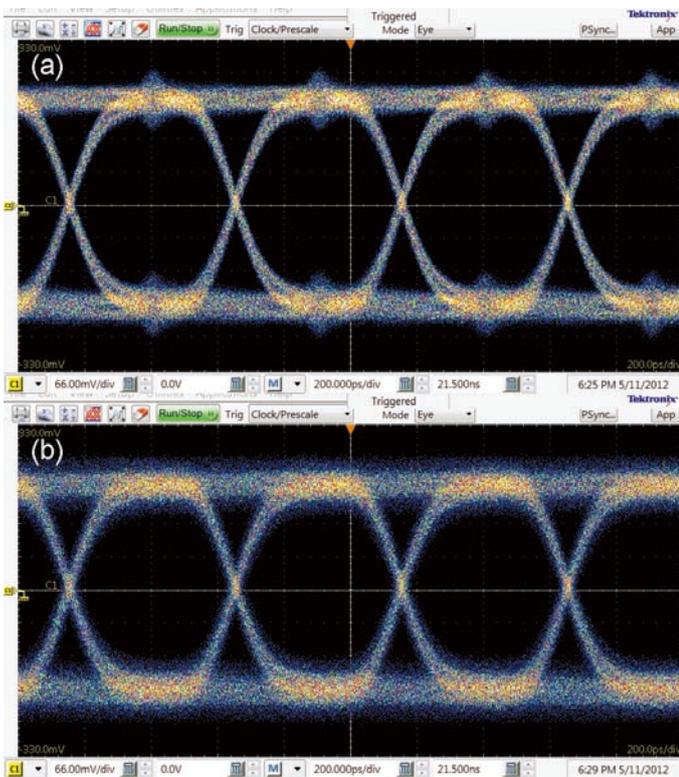


図3. (a) 同期および (b) 非同期クロストークのビクティム・アイ・ダイアグラムの例

すべてのトランスミッタ・テストは、電気、光の両方で、クロストーク干渉のすべてのソースが含まれるよう、すべてのシステム・チャンネルを双方向でアクティブにして実行する必要があります。非現実的なデータ依存性干渉を防ぐため、クロストーク・チャンネルのテスト・パターンは、テスト信号パターンとは異なったものにする必要があります。どちらのアグレッサもユニークなパターンを送送できない場合は、十分な遅延を持たせることでパターンは同期しません。

クロストーク・チャンネルも、2つの理由から非同期タイミングで動作する必要があります。一つは、特殊なケースを除いて、各チャンネルは独立してその入力データからリカバリされたクロックで動作します。各クロックが同じクロックで動作しない限り、周波数も位相もロックされません。すなわち、同期しません。もう一つは、図3に示すように、同期クロストークは、非同期クロストークとは異なった属性を持ちます。同期クロストークでは、アグレッサのロジック・トランジションにおけるテスト信号のアイ・ダイアグラムと同じ領域で低下します。一方、非同期クロストークでは時間的にランダムに低下します。

Serdesが複数のシリアル化出力と1つのチップに統合されている場合は、インターチップ・クロストークに注意する必要があります。出力とコモン・クロックのタイミングが合っている場合、出力はアクティブになっており、テスト・チャンネルと同期し、各チャンネルは独自の信号を送送していなければなりません。プリント基板の周波数応答は高周波成分で低下するため、数センチのプリント基板におけるSerdesチップ間、またはSerdesとトランシーバ間の電気シグナリングでは、トランスミッタでプリエンファシス、レシーバではイコライゼーションの信号処理が必要になります。

ストレステスト・レシーバ・トランス・テストは、適合性が必要なすべてのレシーバが、ワーストケースの適合入力信号に対しても規定のBERで動作することを確認するために実行します。100GbE IEEE 802.3ba、Fibre Channel 32GFCでは、BERは 10^{-12} 、OIF-CEIではBERは 10^{-15} です。

100GbE光トランスミッタ勧告の概要		
	100GBASE-LR4	100GBASE-ER4
平均出力パワー	-4.3~+4.5dBm	-2.9~+2.9dBm
光変調振幅	-1.3~+4.5dBm	0.1~4.5dBm
消光比	4dB	8dB

表3. トランスミッタ観測の概要

3.1. 光トランスミッタのテスト

トランスミッタに関する勧告の概要を、表3にまとめています。

100GbE、100GBASE-SR4、100GBASE-ER4規格の4×25 Gbpsの形状を、図4a、4bに示します。アイ・マスクで使用される正規化されたロジック0、1のレベルは、アイの中心0.2UIの上下半分の平均で設定されます。

アイ・マスク・テストは、DSA8300型ロー・ノイズ等価時間サンプリング・オシロスコープまたはBERTScopeで実行します。どちらで実行する場合も、超広帯域の光-電気レシーバとクロック・リカバリ・ユニットが必要になります。クロック・リカバリの-3dB帯域は仕様内で異なり（代表値： $f_{data}/1667$ ）、CR286A型で対応できます。CR286A型は、フル・デジタルベースの二次PLL（Phase-Locked Loop）、24MHzまでのジッタにトラッキングし、ユーザ設定のコーナ周波数が設定可能です。

光-電気レシーバは、4次ベッセル-トムソン・フィルタと、データ・レート³/ $4f_{data}$ の基準周波数を適用します。このフィルタは適合光レシーバの最適な応答のためではなく、さまざまなテスト・プラットフォームを同じ測定条件でテストするためにあります。

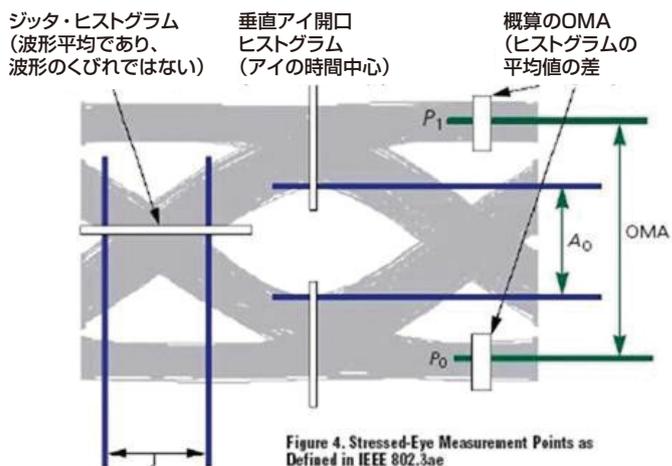


図4a. ストレス・アイ校正におけるローパス・ベッセル-トムソン・フィルタの効果。ロールオフ周波数成分は20GHzを超えている。出典：IEEE 802.3ba規格

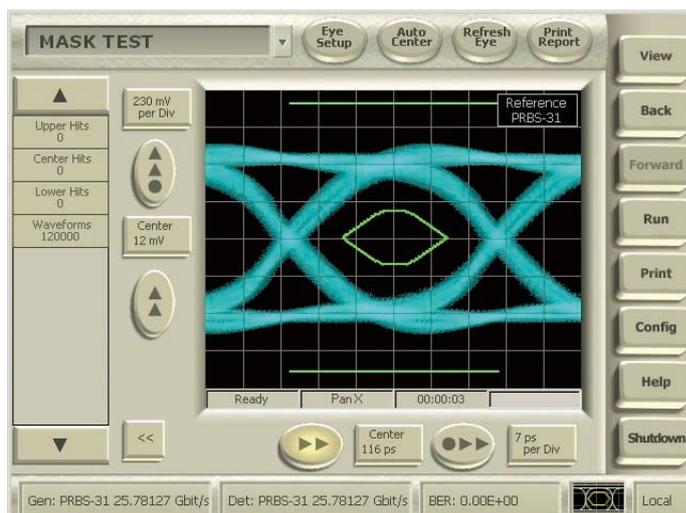


図4b. BERTScopeの100GbEアイ・マスク

マスク・テストのランダム成分は、必要な最小ヒット率で示されます。ヒット率は、マスク違反数とUIあたりの取込んだトータル・サンプル数の比として定義されます。これは統計測定であるため、ヒットが多ければ確度は上がります。

ヒット率が 5×10^{-5} 未満の場合、トランスミッタは適合します。

BERTScopeまたは80SJNBジッタ／ノイズ解析ソフトウェアを装備したDSA8300型を使用することで、より簡単に、より統計的にBER等高線を測定できます。図5aに示すようにBER= 10^{-6} の等高線がマスクの外側にある場合は、トランスミッタは 5×10^{-5} のヒット率アイ・テストに合格となります。BER等高線の方法では、トランスミッタの合格マージンを容易に見ることができます。図5bに示すように、BERTScopeはBER等高線を使用してマージンに余裕のある性能の信号（30Gbps）のJ9性能を検証できます。

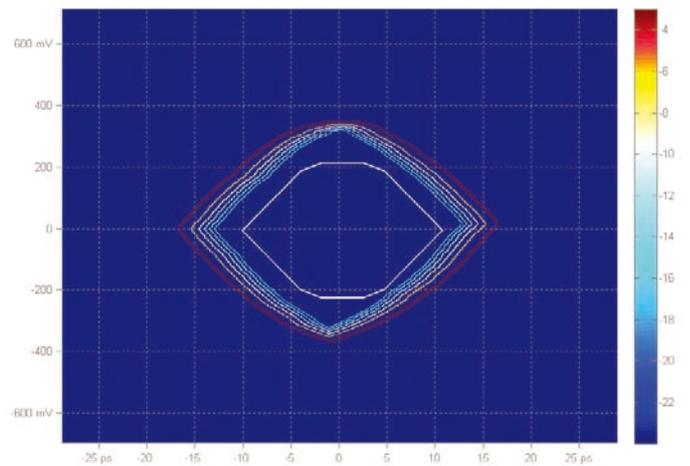


図5a. BER等高線によるアイ・マスク・テスト。黄色がかかったオレンジ色はBER= 10^{-6} の等高線であり、 5×10^{-5} のヒット・レシオに相当する

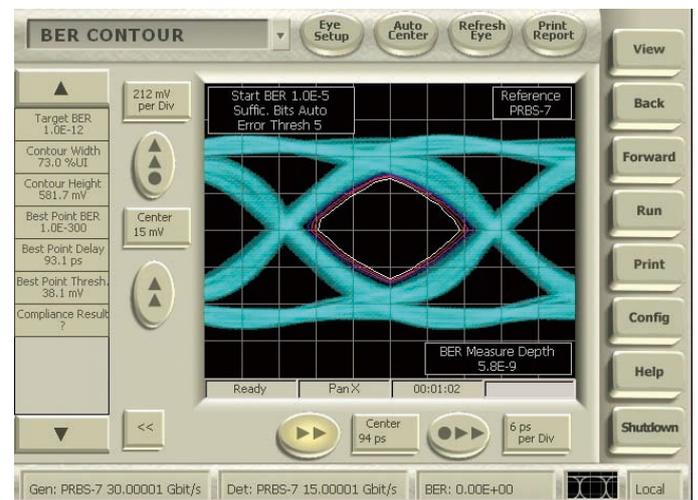


図5b. 30Gbps信号を使用したBERTScopeによるJ9のBER等高線

100GbEストレス光レシーバの代表的なトレランス・テスト条件

	100GBASE-LR4	100GBASE-ER4	周波数
平均受信パワー	4.5~-10.6dBm	4.5~-20.9dBm	
正弦波ジッタ (SJ)	ロールオフ周波数以上で0.05、図5を参照		
正弦波干渉	J2とJ9の加算		0.1~2GHz
RJ			
J2ジッタ	0.3UI		
J9ジッタ	0.47UI		

表4. 100GbEストレス・レシーバ感度テスト条件の概要。すべてのストレスによる影響の合計は、垂直のアイ開口とJ2、J9ジッタ仕様に適合するように規定されている

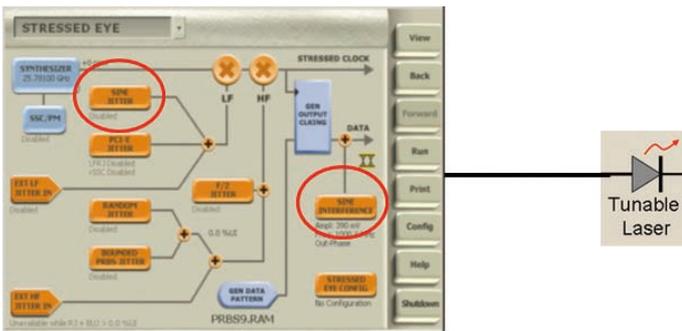


図6. 光レシーバ・テストのレーザを、BERTScopeの正弦波干渉から直接出力

3.2. 光レシーバのテスト

表4で示すように、ER4は高い感度とロバスト（堅牢）性があるものの、4x25Gbpsトポロジ（100GBASE-LR4と100GBASE-ER4）の光レシーバ・ストレス・テストはどちらも似たものになっています。

図6は、校正されたレベルのストレスをどのようにテスト信号に適用するかを、表4にはそのストレスをまとめています。このデータ・レートでは、適用されるストレス・レベルの生成は手の込んだものになります。Opt. STRを備えたBERTScopeはストレス印加システムを内蔵しており、光レシーバDUTのチューナブル・レーザベース信号をドライブするための、規格に準拠したストレス・アイを生成できます（図6参照）。

まず、MZ（Mac-Zehnder）光変調器をドライブするようにBERTScopeを設定します。次に、MZのバイアスを最適な1/0対称になるように調整します。ただし、表4に示すOMA（光変調振幅）を超えないように注意します。

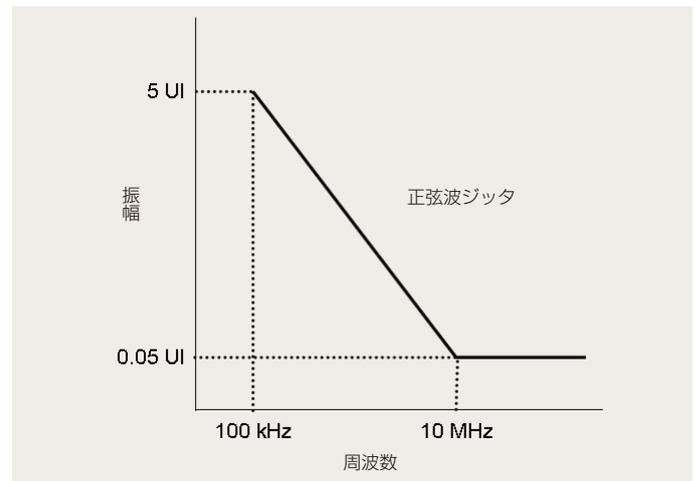


図7. 正弦波ジッタ (SJ) のストレス・テンプレート

図7のテンプレートにしたがって正弦波ジッタ (SI) をパターン・ジェネレータのクロックに適用し、レシーバが低周波ジッタをトラックできるようにします。

4次のベッセル-トムソン・フィルタでISI（シンボル間干渉）を生成します。IEEE802.3baのストレスコンディショニング・ブロックで規定されているように、19GHzのローパス・フィルタ特性によりテスト・ジェネレータ出力の高次の高調波が除去できるため、再現性のある垂直アイ開口ペナルティ、データ依存性ジッタ (DDJ) の測定が可能になります。

正確なガウシャン・ジェネレータでランダム・ジッタ (RJ) を適用します。ガウシャンRJは、ノイズを加え、リミット・アンプに通すことで信号に適用できます。このデータ・レートで求められる確度のためには、RJ適用においてリミッタのAM-PM（振幅変調一位相変調）変換が理想的です。

発行されている規格では規定されていませんが、経験的に、25Gbps以上では**ランダム・ノイズ (RN)** も仕様で規定されることを期待されています。正確なガウシアン・ノイズが信号に加わることでRNは発生しますが、当然のことながらフィルタがない場合です。

垂直アイ開口ペナルティ (VECP) を表4のレベルに設定するには、数多くの手順が必要になります。光VECPは、次の式で求められます。

$$VECP = 10 \log \frac{OMA}{EH(2.5 \times 10^{-3})}$$

ここで、アイ高さEH (2.5×10^{-3}) はBERで規定される垂直アイの開口です。EH (BER)は概念的にわかりづらいものの、平均ピーク・ピーク電圧スウィングより正確な定義です。 2.5×10^{-3} のBER等高線の中心からの垂直方向の距離と等価であり、BERTScopeまたはDSA8300型/80SJNBで簡単に測定できます。

VECP設定後に、**J2とJ9のジッタ**・レベルを調整しますJ2とJ9は、ジッタ分布の属性を示します。高い確率のジッタである99%分布はJ2に含まれているため、J2はBER= 2.5×10^{-3} で規定されるトータル・ジッタ (TJ) と等価になります。一方、J9はジッタ分布の外側、十億分の一でRJが占めているため、J9はBER= 2.5×10^{-10} のTJと等価となります。

必要とされるJ2に達するまで、信号に正弦波干渉 (振幅変調) を加えます (図8を参照)。

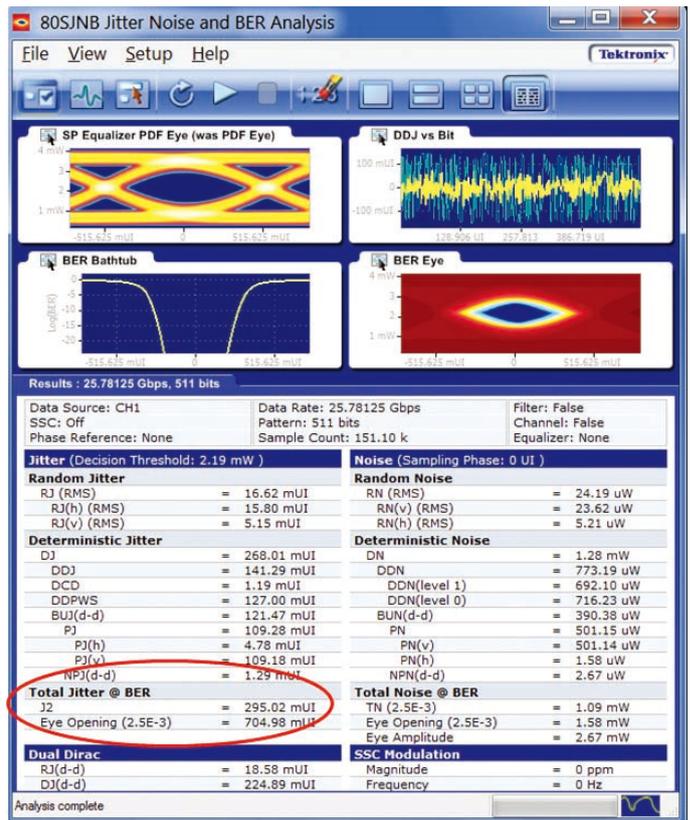


図8. DSA8300型と80SJNBでJ2を測定した例

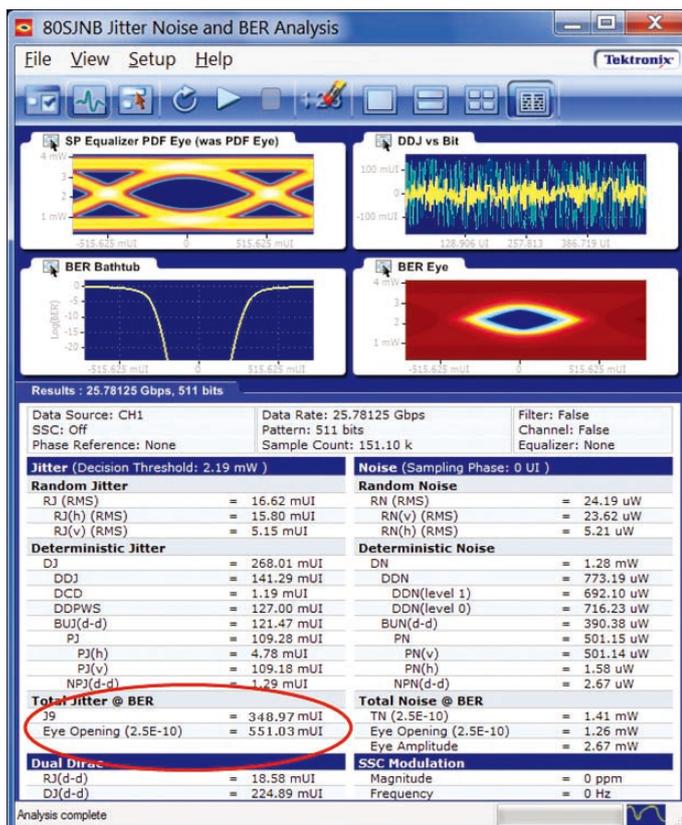


図9. J2設定後、J9レベルは0.35UIであり、J9の仕様に合わせるため335fs rms未満のRJを加える

J2とJ9ではBERに大きな差があるため、わずかな実効値RJでJ9は規定のレベルに達します。J2にはほとんど影響しません。例えば、図9において、J2設定後とするとJ9のレベルは0.35UIであり、J9の仕様の0.47UIにするためには、RJの0.12UIを追加します。**これは、実効値RJの335fs未満になります。**ジェネレータ固有のRJが332fs以下になるように注意する必要があり、これ以上になると図9に示すJ2とJ9の同時インターセプトは不可能になります。計測器のノイズ・フロア以上の、非常に小さなRJを加えるために精密ランダム・ノイズ・ソースを使用すると、信号経路にフェムト秒レベルのランダム・ノイズを加えることができます。J9ジッタ・レベルをインターセプトするためには、一般的に非常に小さなRJを加える必要があります。この手順では、BERTScopeのジェネレータとDSA8300型サンプリング・オシロスコープを組み合せ、システムとして校正することが重要になります。

ストレス信号を、クロストークのための3つの信号とともにシステムの複製に伝送します (図11を参照)。

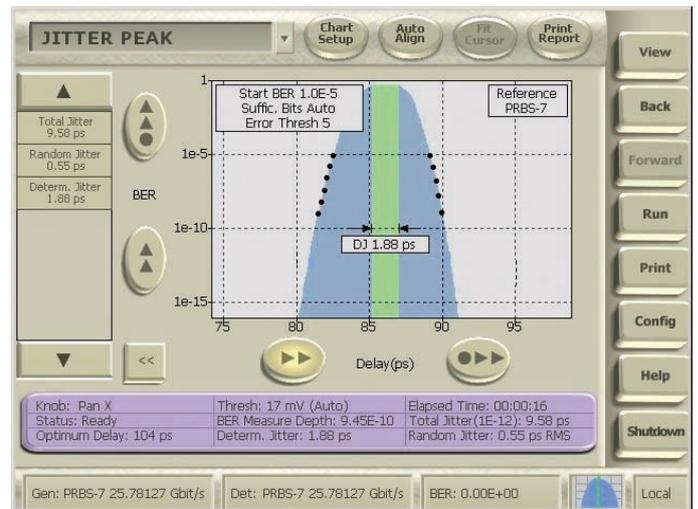


図10. BERTScopeで測定したジッタ・ピークとJ9の例

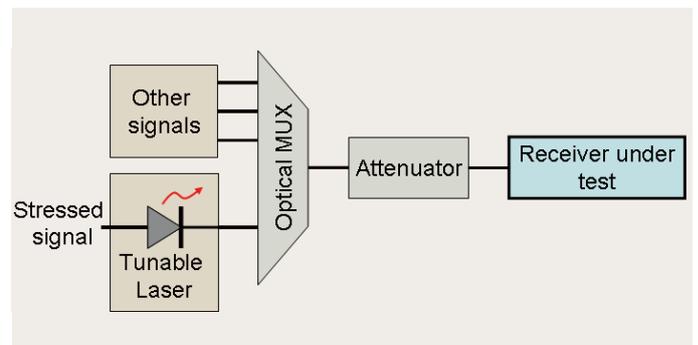


図11. 光ストレス・レーザ・テスト

レーザが自身のBERをカウントできれば、テストは完了です。できない場合は、レーザの出力をBERTScopeに接続します。レーザにクロック出力機能がない場合は、クロック・リカバリ・ユニットを使用してエラー・ディテクタのタイミングを合わせる必要があります。クロック・リカバリ・ユニットがない場合は、レーザの出力はリタイムされ、手が加わっていないため、BERTScopeのクロック出力が使用できます。

レーザにストレス信号を入力します。まず、図7のテンプレートに示すように、ロールオフ周波数以上の低振幅のSJを入力します。レーザがBER ≤ 10⁻¹²で動作する場合は、その他すべてのストレスを加え、図7のSJ周波数-振幅テンプレートでテストを続けます。BERTScopeのジッタ伝送測定機能では、自動で実行されます。すべてのテストでレーザがBER ≤ 10⁻¹²で動作すれば、適合していることになります。

主な電気トランスミッタ要件

データ・レート (参照: ボー・レート)	19.90~28.05Gps
標準のFR-4基板と等価の長さ、1つのコネクタ	10~30cm
ナイキスト周波数における適合テスト・ボードのインサージョン・ロス	-1.75~-1.25dB
プリエンファシス・パルス応答の最適化	3タップ以上 8UI以上
ピーク・ピーク差動電圧	800~1200mV
立上り/立下り時間 (20~80%)	8~10ps
Vertical Eye Closure (VEC)	3~9dB
デューティ・サイクル歪み (DCD)	0.035UI以下
非相関データ・ミニスティック・ジッタ (参照: SJ + DCD)	0.15UI以下
ランダム・ジッタ (RJ at BER=10 ⁻¹⁵)	0.15UI以下
アイ幅 (EW)、BER=10 ⁻¹⁵	≥0.46 - 0.72UI
トータル・ジッタ (TJ)、BER=10 ⁻¹⁵	≤0.28 - 0.54UI
アイ高さ (EH)、BER=10 ⁻¹⁵	≥100 - 300mV

表5. 主な電気トランスミッタ要件

3.3. 電気トランスミッタのテスト

表5に、主な電気トランスミッタ要件を示します。

表5に示す広範囲の要件は、図2の3種類の電気シグナリング・サブシステム (Serdes→Serdes、Serdes→トランシーバ、トランシーバ→Serdes) における違いを示しています。図2の一番下のSerdes→Serdesが最も長く、最も厳しい要件になっています。Serdes→トランシーバが最も緩く、トランシーバ→Serdesがその中間となっています。

トランスミッタ特性は、DSA8300型またはBERTScopeで測定できます。どちらの場合でも、リファレンス・レシーバとCR286A型クロック・リカバリ・ユニットなどのゴールデンPLLが必要になります。

伝送された信号振幅の仕様は、BERにおけるアイの高さとして、EH (BER) と表されます。同様に、アイ幅はEW (BER) と表されます。BERに対して定義されるTJと関連しているため、馴染みやすくなっています。TJはアイの閉じであり、EWはアイの開きになります。

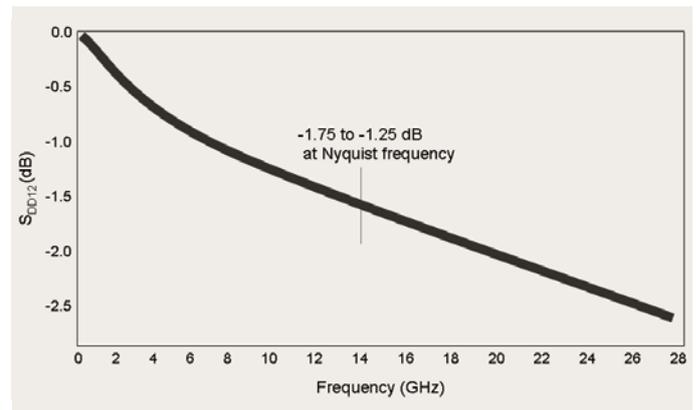


図12. 代表的なコンプライアンス・テスト・ボードの差動周波数応答

このレートでの電気トランスミッタは、出力される伝送信号のテストのためだけでなく、部分的なチャンネル応答の補正のために信号のプリエンファシスを適用するため、適合テスト・ボードはトランスミッタ出力とテスト機器の間に挿入します。コンプライアンス・テスト・ボードの代表的なナイキスト・レート ($f_{data}/2$) の損失値を表5に、代表的な差動損失を図12に示します。

仕様は、アプリケーションやPCBのトレース長によって異なるため、損失や周波数応答の属性によって必要なコンプライアンス・テスト・ボードも異なります。テクトロニクスは、さまざまな種類の校正されたトレース長を用意しています。場合によっては、コンプライアンス・テスト・ボードの役割を自動化することもできます。

最低でも**3つのタップを持ったプリエンファシス**が必要になります。3つのタップとは、遷移するビットおよびそれに前後するビットの電圧レベルは、チャンネルの周波数応答の補正のために変更されることを意味しています。 C_{-1} 、 C_0 、 C_1 のタップ値は、チャンネルのパルス応答の最低8UIから求められます。伝送されるビットごとのプロファイルで畳み込まれるチャンネル周波数応答の影響としてチャンネルで発生するISIを考えてみます。各ビットの波形は、多くのUIになります。主な25+Gbpsの仕様では、8UI以上の最適化が求められています。

アプリケーション・ノート

中間的な、ごく普通のプリエンファシスの値でトランスミッタをテストしてみます。コンプライアンス・テスト・ボードを用意し、規定された最短のトレース長を選び、トランスミッタのプリエンファシス方法を最適化します。結果として得られるプリエンファシスのレベルが許容値の半分未満であれば、少しだけ長いトレース長を使用します。許容値の半分以上であれば、少しだけ長いトレース長を使用します。

このデータ・レートでは、PCBからわずか数cmの伝送であっても、プリエンファシスがあったとしてもレシーバでのアイ・ダイアグラムは狭くなります。したがって、テスト機器はCTLE (Continuous Time Linear Equalization) 手法などの仕様にも適合する必要があります。トランスミッタのプリエンファシスと最小のレシーバ・イコライゼーションの相互作用は、このテストに含まれています。CTLEは一般的に、シングル・ゼロ、 $f_{data}/2$ のナイキスト・レートでピークを持つ2極フィルタです。

異なったテスト・パターンでは別の仕様が必要になります。トランスミッタ・テストでは、通常はPRBS9パターンで十分です。当然のことながら、他のすべてのシステム・チャンネルはアクティブである必要があり、これによりクロストークがテストに含まれます。可能な限りクロストーク・アグレッサは異なるパターンを送送する必要があり、上記の理由からアグレッサは非同期である必要があります。

このテストは、DSA8300型またはBERTScopeを使用し、信号からリカバリされたクロックでトリガすることで実行できます。このデータ・レートに最適なクロック・リカバリ・モジュールはCR286A型であり、適切な3dB帯域（通常は $f_{data}/1667$ ）が適用できることを仕様で確認する必要があります。

BER、EH (BER)、EW (BER) に対して定義される**アイの高さとアイの幅**は、80SJNB BER解析ソフトウェアをインストールしたDSA8300型のBERアイ・ダイアグラム (図13参照)、または物理レイヤ・テスト機能 (Opt. PL) を備えたBERTScopeのBER等高線で簡単に測定できます。

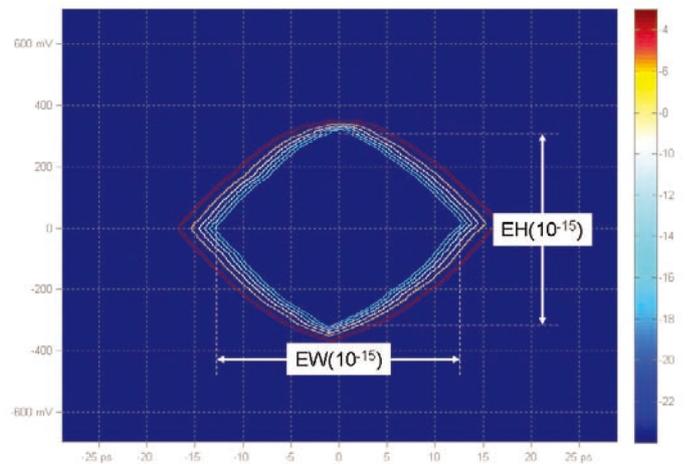


図13. BERアイ・ダイアグラムによるEH (10^{-15}) とEW (10^{-15}) の測定例

コンプライアンス・テスト・ボードを用意し、プリエンファシスを最適化します。CTLEのゲインを仕様にしたがって設定し（通常は1~3dB）、最適なEH (BER) を生成します。DSA8300型を使用する場合は最低でも12Mサンプル、BERTScopeを使用する場合は最低でも4Mビットを取込みます。統計サンプルが多いほど、よい結果が得られます。

EH (10^{-15}) は、BER= 10^{-15} の等高線内側のアイの中心における垂直方向の距離です。同様に、EW (10^{-15}) は、BER= 10^{-15} の等高線内側のアイの中心における水平方向の距離です。

VEC (Vertical Eye Closure) は平均電圧スウィングとアイの高さの比で、次のように表されます。

$$VEC = 20 \log \frac{V_{avg\ swing}}{EH(10^{-15})}$$

BERTScopeでは、平均電圧スウィングはBER等高線から読み取ることができます。DA8300型では、最低でも12Mサンプルでアイ・ダイアグラムを取込み、信頼性の高いハイとローのロジック・レベルを確認する必要があります。その差が平均電圧スウィングになります。

Serdesとトランシーバのストレス・アイ・レシーバ・テストの概要	
テスト・パターン	PRBS31
ナイキスト周波数における適合テスト・ボードのインサージョン・ロス	-2.5~-1.5dB
図7のロールオフ周波数以上におけるSJ	0.05UI
ローパス・フィルタによるDJ+BUJクロストーク+TJ (10 ⁻¹⁵) となるためのRJ=	0.28UI
スウィング電圧	600mV
EH (10 ⁻¹⁵) となる正弦波ジッタ=	240mV
TJ(10 ⁻¹⁵) となる正弦波ジッタ=	0.43UI
図7の任意のSJ振幅/周波数でのBER	10 ⁻¹⁵ 以下

表6. Serdesとトランシーバの電気ストレス・アイ仕様

3.4. 電気レシーバのテスト

ストレス・レシーバのトレランス・テストは、レシーバにおけるワーストケースの信号を考えます。内部のイコライゼーション方法も含め、レシーバが規定のBER (100GbE、32GFCではBER ≤ 10⁻¹²、OIF-CEIではBER ≤ 10⁻¹⁵) 以下で動作する場合、レシーバは適合します。

仕様ごとに、求められるレベル、ストレスの種類は異なります。SJのみの仕様もあります。この章では、第2章で説明した規格の代表的なストレス、表6に示されている代表的なレベルを例にとります。実際の適合性については、テストする仕様をご確認ください。

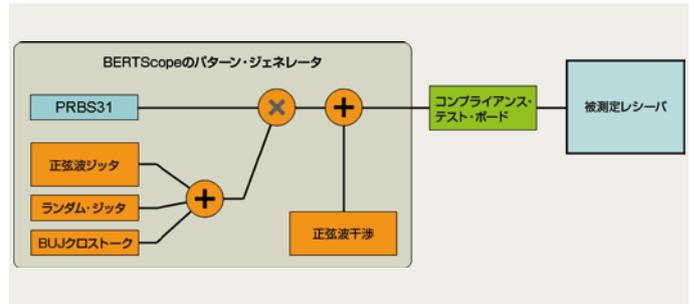


図14. 電気ストレス・レシーバ・テストのセットアップ

ストレス信号を生成するには、コンプライアンス・テスト・ボードをBERTScopeのパターン・ジェネレータの出力に接続します (図14を参照)。考えられるすべてのビット軌跡を作成するため、31の置換シンボルによるロング・パターンのPRBS31テスト・パターンを生成します。

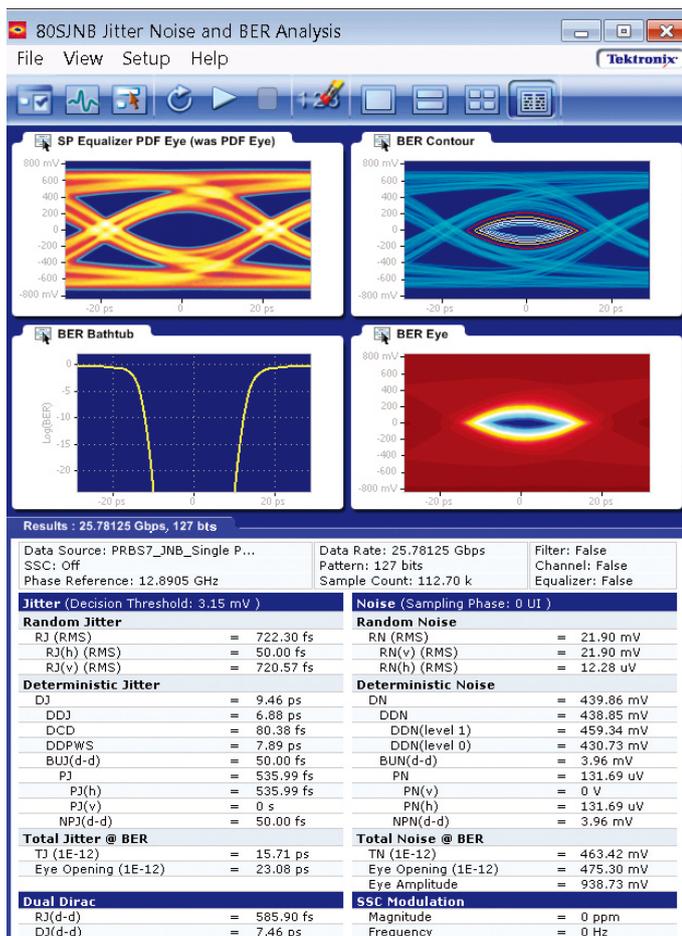


図15. ストレス信号

コンプライアンス・テスト・ボードの他に、ローパス・フィルタと図7のロールオフ周波数より上の0.05UIのSJを加えることで**DJを適用**します。

「付録 - BUJクロストークのエミュレーション」で説明する**BUJクロストークを適用**します。信号振幅を約600mVの規定レベルに設定します。

コンプライアンス・テスト・ボード以上のPCB損失をエミュレートするために、ジッタのある信号に**正弦波干渉を追加**し、テスト信号が規定のEH (10^{-15})、約240mVになるようにします。

TJ (10^{-15}) が規定のレベルになるまで**RJを加えます**。

信号に加わるストレスによる影響を、図15に示します。

設定した信号をレシーバが確実に受信するまで、テストを実行します。レシーバとコンプライアンス・テスト・ボードは、テストのセットアップで使用したのと同じケーブルで接続します。

レシーバが自身のBERをカウントできれば、テストは完了です。できない場合は、レシーバの出力をBERTScopeのエラー・ディテクタに接続します。レシーバでクロック出力が得られない場合は、クロック・リカバリ・ユニットを使用してエラー・ディテクタをリタイムします。クロック・リカバリ・ユニットがない場合は、レシーバの出力がリタイムされているため、BERTScopeのデータ・レート・クロックが使用できません。

レシーバにストレス信号を入力します。まず、図7のテンプレートに示すように、ロールオフ周波数以上の低振幅のSJを入力します。イコライゼーション方法が有効で、最適化された状態でレシーバが規定のBER以上で動作する場合、図7のSJ周波数-振幅のテンプレートでテストを続け、適用されたすべてのストレスでレシーバが低周波ジッタを追従できることを確認します。BERTScopeのジッタ・トレランス機能では、自動で実行されます。

SJの周波数レンジにおいて規定以上のBERで動作する場合、レシーバは適合します。

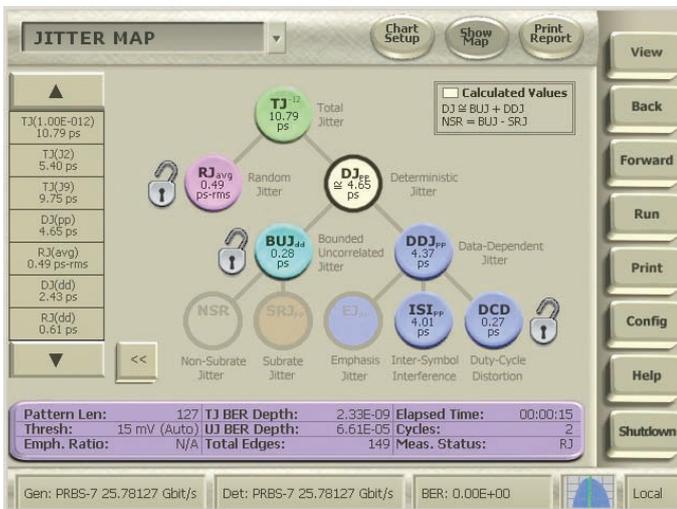


図16. BERTScopeによるジッタの分離測定例 (ジッタ・マップ)

4. 診断テスト

コンプライアンス・テストと診断テストの差は複雑です。簡単に解釈するため、コンプライアンス・テストには数多くの要素が含まれる傾向があります。システムのどの要素、成分が問題を起こしているか理解するため、戦略的に診断テストを計画して特定の弱点を見極めます。複雑に構築し、テストにテストを重ね、問題を検出してマージンを求めます。

4.1. トランスミッタが不合格になった場合の対処方法

トランスミッタが不合格になった場合、コンプライアンス・テスト・ボードを外し、可能な限り直接接続になるようにしてトランスミッタの出力を解析し、テスト条件を簡単にします。ジッタとノイズを解析します。より複雑なパターンを適用して分離解析し、PCBのトレース長を伸ばし、プリエンファシスを適用し、クロストーク・アグレッサをオンにします。それぞれの条件でアイ・ダイアグラム、BER等高線を解析、さらにジッタ／ノイズを分離解析します (図16を参照)。

80SJNBをインストールしたDSA8300型、ジッタ・マップ・オプション (Opt.J-MAP) を装備したBERTScopeは、以下のようなさまざまなタイプのジッタを自動的に認識し、問題解決に貢献します。

- 非周期性BUJ → クロストークが十分にシールドされていない
- DCD → トランスミッタの歪み
- ISI → 出力経路によるトラブル
- ハイレベルのRJ → トランスミッタのクロックによるトラブル
- SJと周期性ジッタ (PJ)、正弦波／周期性ノイズ → 近傍のコンポーネント、おそらくスイッチング電源からの電磁干渉。ジッタ周波数のスペクトラムを調べることで、干渉の原因を特定します。CR286A型クロック・リカバリ・ユニットは、リアルタイムのジッタ・スペクトラムが測定できます。スペクトラムのピークの周波数が、他のコンポーネントの高調波と関係していませんか。

4.2. レシーバが不合格になった場合の対処方法

ストレスごとに、レシーバの応答を調べます。BERTScopeのパターン・ジェネレータ機能を利用し、クリーンなパターンで開始し、複雑なパターンを追加します。

- マーク密度の低いテスト・パターンを適用し、ベースライン・ワンドをチェックします。
- 長いシンボル列のCID (Consecutive Identical) ビットとトランジション密度の低いパターンで、クロック・リカバリ回路をテストします。パターンがより多くのストラクチャを持つほど、コンプライアンス・テスト・ボードまたはフィルタを適用した場合により多くのISIが発生します。
- さまざまな振幅におけるレシーバのクロック・リカバリ周波数でSJを掃引します。どんなジッタにトラックするか、クロック・リカバリ回路の能力を見極めます。
- コンプライアンス・テスト・ボードの長さを増やすことで、レシーバのイコライザをテストします。パターンの複雑さとトレース長を組み合わせることで、さまざまなISIレベルを生成し、イコライザのマージンを見つけます。
- BUJクロストークとRJを増やすことで、レシーバのジッタ／ノイズ耐性、すなわちセットアップ／ホールドを調べます。
- 正弦波干渉を入れることで、電圧感度をチェックします。

レシーバの感度の様子を調べ、さまざまなストレスの組み合わせを適用します。レシーバが非常に堅牢な所に、予想外で固有の組み合わせのストレスの組み合わせがあるかもしれません。

アプリケーション・ノート

まとめ

100Gbpsの信号伝送は簡単ではありません。各コンポーネントやシステム全体を検証するには、高性能なテスト機器が必要になります。当社のDSA8300型、BERTScope、CR286A型クロック・リカバリ・ユニットは、光／電気のトランスミッタ／レシーバのコンプライアンス・テスト、診断テストに最適なツールです。

付録 ー

BUJクロストーク・エミュレーション

クロストークは、PRBS BUJ (Bounded Uncorrelated Jitter、有界非相関ジッタ) を適用することで簡単にエミュレートできるため、電気レシーバの重要なストレスになります。この手法はここ10年のハイスピード・シリアル規格で採用されており、BERTScopeで簡単に実行できます。BERTScopeがない場合は、最低でも25Gbps以上のパターン・ジェネレータを用意してBUJでクロストークをエミュレートしなければなりません。

PRBSパターンはパターン・ジェネレータの電圧遅延に適用されるため、トランジション・タイミングがシフトします。PRBSタイミング・ノイズは信号タイミングの急激なシフトの原因となります。信号と同期しますが、仕様で規定されるクロストークのように、ビット周期の整数倍になります。

Nチャンネル・システムでPRBS BUJクロストーク信号を校正するには、パターン・ジェネレータを差動アグレッサ・チャンネル、オシロスコープの差動ビクティム・チャンネルに接続します。オシロスコープで実効値クロストーク電圧ノイズ、 X_{rms} を測定します。他のアグレッサ・チャンネルで測定を繰り返し、 $X_{rms}(1)$ 、 $X_{rms}(2)$ 、…、 $X_{rms}(N-1)$ を測定します。各アグレッサにおける電圧・タイミング・ノイズ等価は、次のように求められます。

$$1つのアグレッサにおけるBUJクロストーク \approx \frac{5\sqrt{2} t_{rf} X_{rms}}{3 V_{Swing}}$$

ここで、 t_{rf} はクリーンな信号の20~80%の立上り/立下り時間、 V_{Swing} はハイ、ローのロジック電圧の平均差分になります。Nチャンネル・システムにおけるBUJクロストーク等価は、次のように求められます。

N-1のアグレッサにおけるBUJクロストーク

$$\approx \frac{5\sqrt{2}}{3} \frac{t_{rf}}{V_{Swing}} \sqrt{X_{rms}(1)^2 + X_{rms}(2)^2 + \dots + X_{rms}(N-1)^2}$$

ASEAN/オーストラリア・ニュージーランドと付近の諸島 (65) 6356 3900
ベルギー 00800 2255 4835*
中央/東ヨーロッパ、バルト海諸国 +41 52 675 3777
フィンランド +41 52 675 3777
香港 400 820 5835
日本 81 (3) 6714 3010
中東、アジア、北アフリカ +41 52 675 3777
中国 400 820 5835
韓国 001 800 8255 2835
スペイン 00800 2255 4835*
台湾 886 (2) 2722 9622

オーストリア 00800 2255 4835*
ブラジル +55 (11) 3759 7627
中央ヨーロッパ/ギリシャ +41 52 675 3777
フランス 00800 2255 4835*
インド 000 800 650 1835
ルクセンブルク +41 52 675 3777
オランダ 00800 2255 4835*
ポーランド +41 52 675 3777
ロシア / CIS +7 (495) 7484900
スウェーデン 00800 2255 4835*
イギリス/アイルランド 00800 2255 4835*

バルカン諸国、イスラエル、南アフリカ、その他SE諸国 +41 52 675 3777
カナダ 1 800 833 9200
デンマーク +45 80 88 1401
ドイツ 00800 2255 4835*
イタリア 00800 2255 4835*
メキシコ、中央/南アメリカ、カリブ海諸国 52 (55) 56 04 50 90
ノルウェー 800 16098
ポルトガル 80 08 12370
南アフリカ +41 52 675 3777
スイス 00800 2255 4835*
アメリカ 1 800 833 9200

* ヨーロッパにおけるフリーダイヤルです。ご利用になれない場合はこちらにおかけください。+41 52 675 3777

Updated 10 February 2011

11/12



65Z-28494-1



〒108-6106 東京都港区港南2-15-2 品川インターシティ B棟6階
テクトロニクス お客様コールセンター TEL:0120-441-046
電話受付時間/9:00~12:00・13:00~19:00(土・日・祝・弊社休業日を除く)

www.tektronix.com/ja

Copyright © Tektronix. All rights reserved. TEKTRONIX および TEK は Tektronix, Inc. の登録商標です。記載された製品名はすべて各社の商標あるいは登録商標です。本製品の仕様および価格は、予告なく変更させていただく場合がございますので、予めご了承ください。